

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE**  
**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

**Ing. Vladimír Kujan**

**Autoreferát dizertačnej práce**

**ENERGETIKA ASYNCHRÓNNYCH POHONOV S FREKVENČNÝM MENIČOM  
MODERNIZOVANÝCH ZDVÍHACÍCH ZARIADENÍ A ICH VPLYV NA ELEKTRICKÚ  
SIĚŤ**

na získanie akademického titulu  
doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Elektroenergetika**

**Miesto a dátum:** Bratislava, 8.7.2019

**Dizertačná práca bola vypracovaná v externej prezenčnej forme doktorandského štúdia.**

**Na:** Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská technická univerzita v Bratislave

**Predkladateľ:** **Ing. Vladimír Kujan**  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

**Školiteľ:** **prof. Ing. František Janíček, PhD.**  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Ústav elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky

**Oponenti:** **prof. Ing. Pavol Rafajdus, PhD.**  
externý spolupracovník  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**doc. Ing. Juraj Wagner, PhD.**  
externý spolupracovník  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**Autoreferát bol rozoslaný:** .....

**Obhajoba dizertačnej práce sa koná: 23.8.2019 o 8:00 hod..**

**Na** Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Slovenská technická univerzita v Bratislave  
Ilkovičova 3, miestnosť: C-417

.....  
**dekan FEI**  
**prof. Dr. Miloš Oravec**

# Obsah

Úvod .....	4
Ciele dizertačnej práce a tézy.....	5
<b>1. Súčasný stav legislatívy a noriem v SR.....</b>	<b>6</b>
1.1 Posudzovanie energetiky výťahov vo svete a možnosti jej zlepšenia.....	7
<b>2. Trakčný lanový výťah ako mechanická sústava.....</b>	<b>9</b>
<b>3. Asynchrónny motor.....</b>	<b>11</b>
3.1 Regulácia asynchrónneho motora zmenou frekvencie.....	12
<b>4. Menič napätia a frekvencie pre elektrické pohony.....</b>	<b>13</b>
<b>5. Počítačová simulácia prevádzkových režimov asynchrónneho motora.....</b>	<b>14</b>
<b>6. Použitie statickej kondenzátorovej kompenzácie na výťahoch.....</b>	<b>16</b>
<b>7. Meranie realizované na motoroch, meničoch a výťahoch.....</b>	<b>17</b>
7.1 Laboratórne meranie na asynchrónnych motoroch 2,2kW, 5kW, 7,5kW.....	17
7.2 Laboratórne meranie na meničoch napätia a frekvencie 2,5kW a 5kW .....	18
7.3 Praktické meranie na reálnych výťahoch 250kg, 320kg a 500kg.....	19
7.4 Strednodobé meranie na výťahu 250kg.....	21
<b>8. Ekonomická analýza prevádzky trakčných lanových výťahov.....</b>	<b>23</b>
<b>Prínos práce a výstupy pre prax.....</b>	<b>26</b>
<b>Záver.....</b>	<b>28</b>
<b>Použitá literatúra.....</b>	<b>29</b>
<b>Publikácie autora príbuzne k téme dizertačnej práce.....</b>	<b>31</b>

## Úvod

Súčasná spoločensko-politická situácia, ako aj nedávna globálna hospodárska recesia, nás núti čoraz viac zamýšľať sa nad efektívnosťou využívania energetických zdrojov. Možnosti primárnych zdrojov sú konečné, racionálne využitie obnoviteľných, respektíve alternatívnych zdrojov je stále obmedzené. Hospodárnosť pri využívaní súčasných technológií, nielen vystupuje do popredia odborného záujmu, ale aj musí byť našim prvoradým záujmom v prostredí rozvinutého kapitalizmu s prihliadnutím na trvalo udržateľný rozvoj a záujmy Európskeho spoločenstva. Predkladaná práca si preto kladie za cieľ analyzovať situáciu ako na teoretickej, tak na praktickej úrovni v oblasti pohonov zdvíhacích zariadení a navrhnúť prakticky realizovateľné opatrenia vedúce k celkovému zlepšeniu v sledovanej oblasti na národnej úrovni.

V oblasti veľkoodberateľov elektrickej energie je energetická bilancia prísne sledovaná. Či už z hľadiska dodávateľa, pre ktorého sú esenciálne údaje ako denný diagram zaťaženia DDZ (respektíve výkonové profily intervalového merania), maximálna výkonová rezervovaná kapacita (MRK), respektíve rezervovaná výkonová kapacita (RK), dohodnutý účinník a charakter odberu, potrebné pre reguláciu elektrizačnej sústavy. Ale aj na strane odberateľa, pre ktorého je riadne objednanie a dodržanie zmluvných parametrov (15-minútové maximum, odber, respektíve dodávka reaktívneho výkonu, objednaná činná práca) záruka minimalizácie nákladov na dodávku elektrickej energie. Súčasné digitálne registračné prístroje, ako aj elektromechanické (analogové) prístroje pre nepriame, respektíve polopriame meranie nasadzované v minulosti, umožňujú zaznamenanie potrebných údajov, najmä kumulatívnu registráciu – činnnej dodávky práce, činnného odberu práce, jalovej dodávky práce, jalového odberu práce a dosiahnuté 15-minútové maximum. Tieto údaje sú následne použité pre účely vyúčtovania spotreby elektrickej energie a následnej fakturácii v obchodnom styku.

V prípade drobných maloodberov, ako aj stredných odberateľov elektrickej energie pripojených k distribučnej sústave zväčša na úrovni NN, respektíve aj na úrovni VN, je situácia komplikovanejšia. Aj keď zmluvné podmienky vyžadujú dodržanie dohodnutého účinníka, meranie odberu elektrickej energie bolo často, s prihliadnutím na periódu obmeny meracích prístrojov, vybavené elektromechanickým registračným prístrojom (elektromerom), ktorý registruje iba činnú odobratú prácu pri účinníku  $\cos \varphi = 1$ . Údaje o charaktere reaktívneho odberu pre dané odberné miesto tak neboli vždy k dispozícii. Pri priemyselných maloodberoch je možné stretnúť sa so zlou energetickou bilanciou z hľadiska reaktívneho výkonu, nakoľko najrozšírejší asynchrónny (indukčný) motor je tu prevádzkovaný často pri malom zaťažení bez príslušnej kompenzácie. V prípade, že meranie odberu elektrickej energie, na takomto odbernom mieste, nie je vybavené registráciou reaktívnej (jalovej) energie, ostáva nevyhovujúca situácia dlhodobo bez povšimnutia a prípadná kompenzácia jalového výkonu je realizovaná až na úrovni distribučného transformátora VN/NN, prípadne vôbec.

S prihliadnutím na predmet pojednávanej problematiky v rámci tejto práce, považujeme za samostatnú skupinu malých odberov elektrickej energie "spoločné technologické zariadenia budov", ako napríklad výťahy, strojovne vzduchotechniky, požiarne ventilátory, prečerpávacie a zosilňovacie stanice vody, tepelné čerpadlá, požiarne čerpadlá, a ďalšie. Z hľadiska elektrizačnej sústavy sa jedná o drobné maloodbery na napäťovej hladine NN, ale z hľadiska charakteru ich odberu sa blížia priemyselným odberom, nakoľko aj tu stále prevláda použitie asynchrónnych (indukčných) elektromotorov. Väčšina spomenutých technologických zariadení nie je vybavená individuálnou kompenzáciou jalového výkonu. S nástupom moderných elektronických registračných prístrojov nasadzovaných v súčasnosti na meranie odberu elektrickej energie (smart metering), ktoré umožňujú registráciu toku energie vo všetkých 4 kvadrantoch, aj v prípade maloodberov, tak možno očakávať, že problematike energetiky týchto odberov bude potrebné venovať v blízkej budúcnosti výrazne väčšiu pozornosť.

## Ciele dizertačnej práce

Riešená úloha dizertačnej práce si kladie za cieľ analyzovať energetiku a vplyv pôvodných a modernizovaných pohonov zdvíhacích zariadení - trakčných lanových výťahov, inštalovaných ako pevná súčasť budov. Snaží sa identifikovať a kvantifikovať túto problematiku, vytvoriť prehľad súčasnej situácie a úrovne jej spracovania vo vedeckej literatúre doma i vo svete. Navrhuje metódu merania energetickej efektívnosti a ďalších vplyvov (obsah vyšších harmonických v prípade elektronických meničov), popisuje realizáciu vlastného merania na vzorke najčastejšie štandardne v praxi používaných pohonov výťahov. Podrobne analyzuje a vyhodnocuje takto získané údaje, na základe ktorých odporúča možné opatrenia a konkrétne optimalizácie vedúce k zlepšeniu energetiky na úroveň maximálnej finančnej efektívnosti a tiež ekologickosti prevádzky. Skúma možnosti úspory spotreby činnnej práce, eliminácie jalového odberu, využitia režimu generátorického brzdenia na kontrolovanú rekuperáciu energie do siete smart grid. K popisu tejto problematiky je náležite využitý teoretický aparát, ktorý dáva za vznik matematickému modelu použitému v počítačovej simulácii ako aj praktická verifikácia následným vyhodnotením širokého spektra nameraných údajov. Maximalizované je tiež použitie názorných a didaktických metód, ktoré prácu robia vhodnú aj k použitiu vo forme doplnujúcich študijných materiálov pri výučbe predmetov Ústavu elektroenergetiky a aplikovanej elektrotechniky FEI STU v Bratislave.

## Tézy dizertačnej práce

1. Analýza súčasného stavu energetických vlastností elektrického pohonu trakčného výťahu vybaveného asynchrónnym motorom s prihliadnutím na možnosti zvýšenia energetickej efektívnosti jeho prevádzky ako aj elimináciu negatívnych spätných vplyvov na sieť.
2. Matematický opis a počítačová simulácia vlastností signifikantného prvku vyšetrovanej pohonnej sústavy pre určenie predpokladaných vlastností v rôznych prevádzkových stavoch.
3. Optimalizácia návrhu a konfigurácie meniča napätia a frekvencie VVVF pre dosiahnutie optimálnych vlastností pohonu v rôznych prevádzkových stavoch na základe prevedených simulácií ako a reálnych meraní.
4. Meranie energetických vlastností vyšetrovaného pohonu v reálnych podmienkach v rôznych prevádzkových režimoch činnosti s vyhodnotením energetickej a ekonomickej efektívnosti.

## 1. Súčasný stav legislatívy a noriem v SR

Podľa zákona Národnej rady SR č. 124/2006 a vyhlášky Ministerstva práce, sociálnych vecí a rodiny SR č. 508/2009 sú výťahy trvale inštalované ako súčasť budov považované za vyhradené technické zariadenia (VTZ) skupiny “A”, t.j. s vysokou mierou ohrozenia.

V zmysle zákona Národnej rady SR č. 264/1999 je možné na trh uvádzať iba výrobky, ktorých zhoda bola posúdená autorizovanou osobou (napríklad Technická Inšpekcia SR, TUV). Technická inšpekcia SR (TI SR) je autorizovanou osobou SKTC-169 v zmysle § 11 ods. 1 zákona Národnej rady SR č. 264/1999 v znení neskorších predpisov na vykonávanie posudzovania zhody. Posudzovanie zhody podľa § 12 zákona Národnej rady SR č. 264/1999 v znení neskorších predpisov je zisťovanie, či skutočné vlastnosti určeného výrobku zodpovedajú ustanoveným technickým požiadavkám na výrobok, uvedených v príslušných nariadeniach vlády SR (pre výťahy je to Nariadenie vlády SR č. 571/2001). Zhoda sa považuje za preukázanú, ak určený výrobok spĺňa všetky technické požiadavky, ktoré sa naň vzťahujú. Posudzovanie zhody sa vykonáva postupmi (modulmi) uvedenými v predmetnom nariadení. Posúdenie zhody, vykonané autorizovanou osobou, pozostáva z posúdenia súladu technickej (konštrukčnej) dokumentácie podľa technickej normy STN EN 81-1, respektíve 81-2, skúšky elektromagnetickej kompatibility predloženej vzorky podľa technickej normy STN EN 12016, respektíve 12015 a typovej skúšky predloženej vzorky zariadenia podľa technickej normy STN EN 61439-1.

Zachovanie kvality a bezpečnosti zariadení pri sériovej výrobe je zabezpečené výkonom kusovej skúšky každého vyrobeného zariadenia. Výrobca je povinný v zmysle zákona Národnej rady SR č.264/2009 vydať ku každému zariadeniu tzv. “ES vyhlásenie o zhode”, v ktorom deklaruje, že dodané zariadenie je v zhode s typovo schválenou vzorkou zariadenia a podrobilo sa kusovej skúške. Opravu, údržbu, rekonštrukciu a montáž výťahu môže vykonávať iba fyzická osoba, ktorá má platné osvedčenie aspoň podľa §18 (pracovník na riadenie opráv zdvíhacích zariadení) vyhlášky MPSVaR SR č. 508/2009, alebo zamestnávateľ (firma) s oprávnením podľa §15 zákona NR SR č. 124/2006.

Pred uvedením vyhradeného technického zariadenia zdvíhacieho do prevádzky je zmysle vyhlášky Ministerstva práce, sociálnych vecí a rodiny SR č. 508/2009 nutné vykonať tzv. úradnú skúšku oprávnenou osobou. Bezpečnosť zariadenia v bežnej prevádzke je overovaná v intervale 3 mesiacov odbornou prehliadkou (tzv. revízia), ktorú vykonáva revízny technik VTZ zdvíhacích, ďalej v intervale 3 rokov odbornou skúškou (tzv. 3-ročné skúšky), ktorú vykonáva revízny technik VTZ zdvíhacích a v intervale 6 rokov opakovanou úradnou skúškou (tzv. 6-ročné skúšky), ktorú vykonáva oprávnená osoba (napríklad Technická Inšpekcia SR, TUV). Zistenia z prehliadok a skúšok sa zaznamenávajú v Knihe výťahu (pasporte), respektíve v protokole z úradnej skúšky, alebo opakovanej úradnej skúšky.

Štúdiom uvedených právnych predpisov a technických noriem je možné dospieť k záveru, že energetika zariadenia – výťahu, uvádzaného na trh popísaným spôsobom, nie je posudzovaná v rámci rozsahu typovej skúšky, kusovej skúšky, úradnej skúšky, odbornej prehliadky ani odbornej skúšky. Ustanovenia technickej normy STN EN 81-1 v článku 13.4.4 respektíve technickej normy STN EN 81-2 v článku 13.4.4., dokonca explicitne uvádzajú, že kompenzačné zariadenie môže byť zapojené len pred svorkami hlavného vypínača. Keďže svorky hlavného vypínača sú deliacim miestom ohraničujúcim strojné zariadenie výťahu, je týmto vylúčené, aby kompenzačné zariadenie bolo súčasťou výťahu.

Problematika výťahovej techniky bola v minulosti v bývalom Československu, podobne ako iné odbory miestneho hospodárstva, dôsledne prepracovaná. V súčasnosti sú stále platné mnohé pôvodné ČSN. Ide o nasledovné technické normy, ktoré sú potrebné pri posudzovaní výťahov uvedených do prevádzky v čase ich platnosti (literatúra [10] - [30] v dizertačnej práci).

Vzhľadom na neustály technologický pokrok ako aj harmonizáciu Slovenských technických noriem a aproximáciu práva v rámci Európskych štruktúr, nastalo počas vypracovania ziertačnej práce k niekoľkým, aj zásadným zmenám v súvisiacej legislatíve a normách SR.

Pôvodné nariadenie vlády SR č. 571/2001 Z.z, ktorým sa ustanovujú podrobnosti o technických požiadavkách a postupoch posudzovania zhody na výťahy, bolo nahradené novým nariadením vlády SR č. 235/2015 Z.z. o uvádzaní výťahov na trh a sprístupňovaní bezpečnostných častí do výťahov na trhu, s účinnosťou od 1.3.2017.

Smernica Európskeho spoločenstva č. 95/16/ES o aproximácii právnych predpisov členských štátov, týkajúcich sa výťahov bola nahradená smernicou Európskeho parlamentu a rady č. 2014/33/EÚ o harmonizácii právnych predpisov členských štátov týkajúcich sa výťahov a bezpečnostných komponentov do výťahov s účinnosťou od 20.4.2016.

Snahu o zjednotenie a sprehľadnenie obsahu súborov noriem je možné sledovať vo vydaní STN EN 81-20 Bezpečnostné pravidlá na konštrukciu a montáž výťahov. Výťahy na prepravu osôb a nákladov. Časť 20: Osobné výťahy a nákladné výťahy s prístupom osôb. a normy STN EN 81-50 Bezpečnostné pravidlá na konštrukciu a montáž výťahov. Kontroly a skúšky. Časť 50: Pravidlá na konštrukciu, výpočty, kontroly a skúšky súčastí výťahu. Ktoré nahrádzajú s účinnosťou od 1.9.2017 slovenské technické normy STN EN 81-1+A3 Bezpečnostné pravidlá na konštrukciu a montáž výťahov. Časť 1: Elektrické výťahy. A normu STN EN 81-2+A3 Bezpečnostné pravidlá na konštrukciu a montáž výťahov. Časť 2: Hydraulické výťahy.

## 1.1 Posudzovanie energetiky výťahov vo svete a možnosti jej zlepšenia

V oblasti výťahovej techniky je možné dodnes pozorovať skutočnú rozmanitosť v prístupoch k bezpečnosti a efektívnosti prevádzky výťahov naprieč krajinami Európy a sveta. Napriek nesmiernej snahe o globalizáciu, najmä z radov nadnárodných spoločností, udržuje sa v národných implementáciách harmonizovaného práva EÚ stále pomerne silný lokálny precedens. Nie je tajomstvom, že prístup k bezpečnosti, spoľahlivosti a efektívnosti bol v období pred pádom „železnej opony“ diametrálne odlišný. Kým východný prístup kládol dôraz najmä na vysokú bezpečnosť, spoľahlivosť a trvácnosť, západný prístup kládol dôraz na cenu, efektívnosť a ekologickosť. Tieto rozdiely v prístupe dodnes spôsobujú praktické problémy, kedy sa kvalitné normy ČSN, neaktualizujú, zohľadňujúc pritom charakter lokálnych realizácií, ale bezhlavo nahradzujú normami európskymi, často nie vysokej úrovne, obsahovo prevzaté z odporúčaní súkromných združení a spoločností (lobbying), preferujúc tak často technológie konkrétnych výrobcov.

Z hľadiska energetickej efektívnosti prevádzky výťahov, pojednávanej v tejto práci, je potrebné spomenúť najmä súbor odporúčaní nemeckého združenia inžinierov VDI [6, 7], ktoré pojednáva o energetickej efektívnosti výťahov. Cieľom odporúčania je zaviesť a poskytnúť transparentnú metódu reprezentácie klasifikácie energetických nárokov výťahov. Odporúčanie je určené pre projektantov, konštruktérov, architektov, montážne a servisné, ako aj inšpekčné organizácie a orgány.

Uvedené odporúčanie prezentuje metodiku klasifikácie výťahov do energetických tried (podobne ako energetické štítkovanie domácich spotrebičov) na základe výkonových nárokov v stand-by režime a špecifickej (mernej) energetickej náročnosti pri jazde. Odber v stand-by režime je charakterizovaný ekvivalentným výkonom (W), ktorý zariadenie odoberá trvalo mimo jazdy. Odber v režime jazdy je charakterizovaný náhradným špecifickým pomerným výkonom (mWh/kgm), ktorý reprezentuje elektrickú činnú prácu potrebnú na premiestnenie bremena s hmotnosťou 1 kg o 1 m skúmaným zdvíhacím zariadením. Súbor odporúčaní nemá v Slovenskej republike žiadny právny účinok a keďže sa jedná o návrh súkromného charakteru, uvádzame ho len pre informáciu, ako negatívny príklad.

Možnosti zlepšenia energetických vlastností pohonov výťahov možno kategorizovať rôznymi spôsobmi. Z hľadiska evolučného vývoja a aplikácie vedecko-technických poznatkov všeobecne, je možné delenie previesť časovo, respektíve generačne, na okruh **zlepšenia energetických vlastností pôvodných pohonov s priamo na sieť pripojeným motorom**, kde k racionalizácii energetiky prevádzky môže dôjsť napríklad aplikáciou sofistikovanejšieho riadenia jazd, alebo individuálnej kompenzácie reaktívneho (jalového) výkonu, prípadne vo využití rekuperovanej energie v rámci skupiny výťahov. A druhý okruh, ktorý je tvorený **zlepšením energetickej náročnosti pohonov, napájaných pomocou VVVF meničov**, kde úspory dosahujeme rekuperáciou energie motora pohonu v

režime generátorického brzdienia, miesto jej marenia v brzdovom odporíniku, alebo akumuláciou energie vzniknutej pri generátorickom brzdení, napríklad do super-kondenzátorov a jej následným využitím.

Iný pohľad na klasifikáciu riešenia problému nás vedie k nadčasovému rozdeleniu možnej racionalizácie prevádzky elektrických pohonov zdvíhacích zariadení na oblasť **eliminácie negatívnych vplyvov na sieť a okolie**, za ktoré možno považovať najmä zhoršovanie účinníka siete, vznik neharmonických priebehov prúdov a napätí, ako aj vysokofrekvenčné (rádiové) rušenie, vznikajúce pri činnosti nelineárnych obvodov výkonovej elektroniky. A druhú oblasť, ktorej zameranie možno charakterizovať ako **zníženie odberu činnnej práce z elektrickej siete**. Úsporu v tejto oblasti je možné dosiahnuť už spomínaným rekuperačným brzdením do siete (ak Smart grid umožní), alebo akumuláciou a využitím prebytočnej činnnej energie vhodným zariadením, namiesto jej marenia v odporínikoch premenou na teplo.

V oblasti racionalizácie odberu činnnej práce je možné podľa odporúčania [6, 7] uvažovať s odberom činnnej práce v stand-by režime, kedy nie je mechanická sústava zdvíhacieho zariadenia v pohybe, ale riadiace, kontrolné a bezpečnostné zariadenia sú v prevádzke. A ďalej odberom činnnej práce na dopravu bremena (mernú prácu možno vyjadriť v [mWh/kg.m]). Podľa gréckej štúdie [8] sa na celkovej energetickej náročnosti prevádzky výťahu, v prípade málo využívaných výťahov, napríklad v skladových priestoroch, môže stand-by odber podieľať až na 80% odobratej činnnej práce. Podobné úvahy potvrdzuje aj švajčiarska štúdia [9]. Signifikantnou zložkou odberu výťahu, ktorá nie je využitá na mechanický pohyb je aj osvetlenie kabíny. Túto zložku odberu je možné jednoducho zefektívniť výmenou svetelných zdrojov (náhrada klasických žiaroviek) respektíve zmenou ovládania osvetlenia, tak aby toto nebolo v činnosti v čase, keď nie je potrebné.

Autori Jinping He, Chengxiong Mao, Jiming Lu, a Jiawei Yang vo svojej práci [10] prezentujú návrh a realizáciu rekuperačnej jednotky pripojenej k jestvujúcemu frekvenčnému meniču, za pomoci ktorej je možné z VVVF meniča odoberať prebytočnú energiu z jednosmerného medziobvodu pri generátorickom brzdení pohonu a túto rekuperovať naspäť do napájacej siete. Výsledky ich meraní na zhotovenom prototypu použitom na pohone 18,5 kW výťahu priniesli priamu úsporu 227 kWh za 25 dní merania. Návratnosť investície do takejto jednotky pri lokálnych cenách predstavovala 16 mesiacov, čo možno považovať za racionálnu investíciu. Zdôraznime však veľkosť pohonu 18,5 kW, ktorá je v našich podmienkach veľmi zriedkavá.

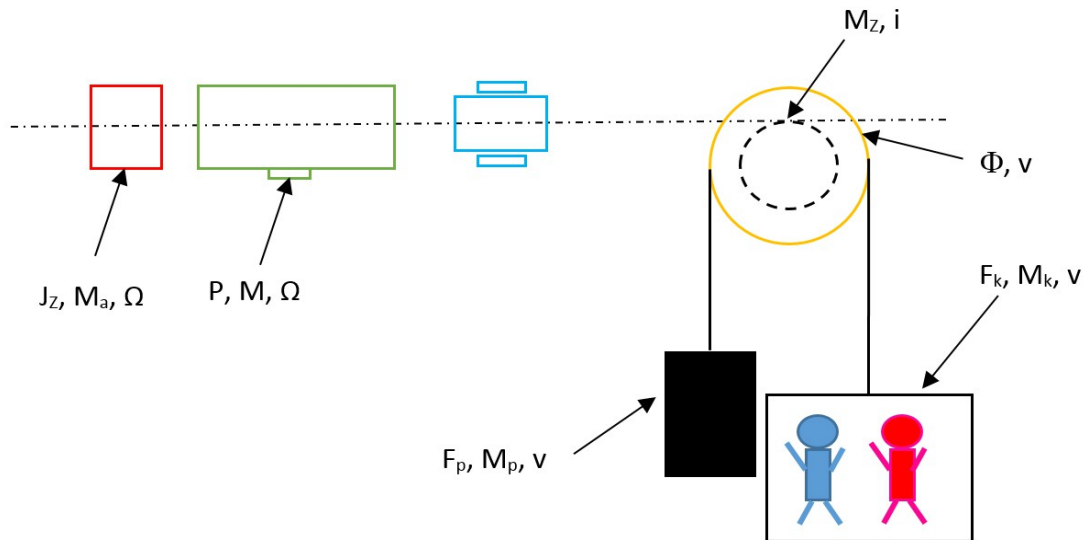
Autori Boonyang Plangklang, Sittichai Kantawong, Sirichai Dangeam a Yuttana Kumsuwan analyzujú vo svojom príspevku [11] na 17-tej Medzinárodnej konferencii elektrických strojov a systémov (ICEMS 2014), možnosti rekuperácie energie z bezprevodového pohonu výťahu so synchronným motorom s permanentnými magnetmi pomocou ERU - Energy Regenerative Unit. Popisovaná jednotka, podobne ako v predošlom prípade, predstavuje elektronický menič odoberajúci prebytočnú energiu jednosmerného medziobvodu VVVF meniča pohonu, rekuperujú túto naspäť do siete. Pri meraniach na 7,4 kW motore reálneho pohonu výťahu dosiahli okamžitý výkon, rekuperovaný do siete počas generátorického brzdienia plne zaťaženej kabíny o veľkosti 5,5 kW. Je potrebné mať na pamäti, že vhodne inštalovaný napr. 7,5 kW pohon s AM u nás môže ľahko dodávať rekuperovaný výkon 5,5 kW bez zložitých elektronických zariadení.

Zaujímavý prístup k zníženiu odberu činnnej práce pohonu výťahu, rešpektujúc pri tom súčasný legislatívny stav v mnohých krajinách (nemožnosť jednoduchej dodávky činnnej práce späť do rozvodnej siete v mieste odberu) popisuje príspevok uverejnený v IEEE od autorov: E.D. Mitronikas, D.V. Spyropoulos, N.P. Papanikolaou, E.C. Tatakis, N. Spyropoulos. Pomocou super-kondenzátorov akumulujú energiu, ktorá by inak bola marená v brzdovom odporíniku, premenou na teplo. Táto energia je použitá pri bezprostredne nasledujúcich jazdách výťahu, kedy je potrebná dodávka energie. Rozdiel energie potrebnej na pohon záťaže a energie dodanej zo super-kondenzátora, je úspora činnnej práce odobratej zo siete. Nevýhodou je obmedzený objem energie ako aj trvácnosť energie akumulovanej v kapacite super-kondenzátorov. Najlepšie využitie energie, je pri bezprostrednom striedaní jazdy hore a dole, respektíve zaťaženej a nezaťaženej kabíny. Prezentované výsledky simulácií predstavujú (v prípade po sebe nasledujúcich režimoch motor / generátor) až 25 % úsporu v odbere činnnej práce z napájacej siete. Takúto v cudzine ťažko dosiahnutú signifikantnú úsporu 25 % na činnnej práci je možné u nás dosiahnuť napríklad triviálnym znemožnením privolania oboch výťahov na rovnaké podlažie, ktoré je bežné v panelových domoch na sídliskách.



## 2. Trakčný lanový výťah ako mechanická sústava

Trakčný lanový výťah je mechanická fyzikálna sústava, v ktorej pracujeme s rotačným aj translačným pohybom. Z fyzikálneho hľadiska popíšeme prvky tejto pohonnej sústavy nasledovne podľa schémy na obr. 2.1.



Obr.2.1 Schéma mechanickej pohonnej sústavy trakčného lanového výťahu

**Motor** – je charakterizovaný mechanickým výkonom na hriadeli  $P$  (kW), rýchlosťou otáčania  $\Omega$  ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a mechanickým momentom  $M$  (Nm). Rotor motora je rotujúca časť a podieľa sa tiež na celkovom momente zotrvačnosti sústavy momentom zotrvačnosti  $J_m$  ( $\text{Nms}^2$ ).

**Zotrvačník** – predstavuje prídavný moment zotrvačnosti  $J_z$  ( $\text{Nms}^2$ ), ktorý prispôsobuje priebeh rozbehu a spomalenia kabíny výťahu fyziologickým potrebám prepravovaných osôb. Otáča sa rovnakou uhlovou rýchlosťou  $\Omega$  ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ako motor a vyvíja dynamický moment  $M_a$  (Nm).

**Prevodovka** – charakterizovaná prevodovým pomerom  $i$  (-) prispôsobuje otáčky motora potrebe pohonu trakčnej kladky. Rotujúce súčasti prevodovky sa podieľajú tiež na celkovom momente zotrvačnosti sústavy momentom zotrvačnosti  $J_p$  ( $\text{Nms}^2$ ).

**Trakčná kladka** – s priemerom  $D$  (m) premieňa rotačný pohyb prenášaný prevodovkou z motora na translačný pohyb nosných lán. Jej obvodová rýchlosť  $v$  ( $\text{ms}^{-1}$ ) je totožná s rýchlosťou translačného pohybu kabíny a závažia protiváhy.

**Kabína a závažie protiváhy** – sú charakterizované hmotnosťou  $m_k$  (kg), respektíve  $m_p$  (kg) a silou tiaže  $F_k$  (N), respektíve  $F_p$  (N), ktorou pôsobia na trakčnú kladku, pohybujúc sa rýchlosťou translačného pohybu  $v$  ( $\text{ms}^{-1}$ ).

Výsledná sila  $F$  (N) je sila tiaže kabíny redukovaná o silu tiaže hmotnosti protizávažia:

$$F = F_k - F_p = (m_k - m_p) \cdot g \quad (1)$$

kde  $g$  ( $\text{ms}^{-2}$ ) je gravitačné zrýchlenie, pre našu geografickú polohu je  $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$ . Prevodovka s prevodovým pomerom  $i$  (-) a trakčná kladka s priemerom  $D$  (m) tak prenáša celkovú silu  $F$  (N) v podobe záťažného momentu  $M_z$  (Nm) na motor pohonu.

$$M_z = F \cdot \frac{D}{2} \cdot i \quad (2)$$

Rýchlosť translačného pohybu kabíny a protiváhy ( $\text{ms}^{-1}$ ) je zhodná s obvodovou rýchlosťou trakčnej kladky, jej veľkosť je závislá od priemeru trakčnej kladky  $D$  (m) a uhlovej rýchlosti otáčania sa motora pohonu  $\Omega$  ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a prevodu prevodovky  $i$  (-).

$$v = \Omega \cdot \frac{D}{2} \cdot i \quad (3)$$

Pretože celková suma momentov sústavy musí byť rovná 0.

$$\sum M_s = M - M_a - M_z = 0 \quad (4)$$

Bude v ustálenom stave platiť, že moment motora je rovný momentu záťaže.

$$\sum M_s = M - M_a - M_z = 0 \quad (4)$$

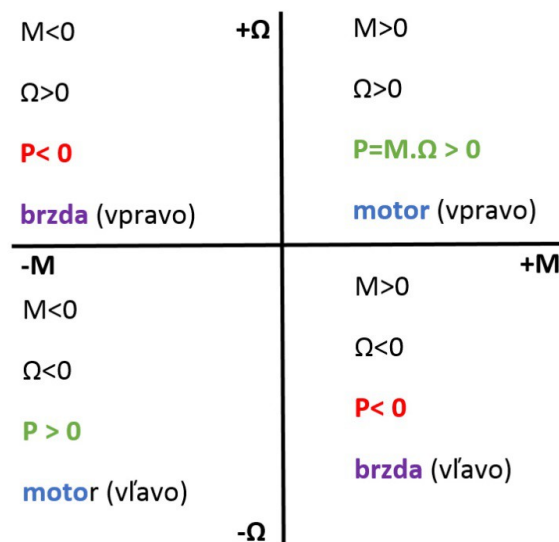
Mechanický výkon potrebný na pohyb kabíny pri zanedbaní strát je potom  $P$  (kW) :

$$P = M_z \cdot \Omega \quad (5)$$

Nakoľko pracovný moment v ustálenom stave sústavy je závislý od zaťaženia a nie rýchlosti otáčania, bude záťažný moment v celom rozsahu otáčok konštantný. Mechanická charakteristika sa v tomto prípade zvykne príhodne nazývať “výťahová charakteristika”.

Z doteraz uvedeného výkladu je zrejmé, že pri konštantnej hmotnosti závažia protiváhy  $m_p = \text{konšt.}$  a premenlivom zaťažení kabíny  $m_k$ , je možné teoreticky ohraničiť prevádzkové stavy pohonnej sústavy výťahu nasledovnými štyrmi krajnými polohami:

- jazda **nezat'aženej** kabíny smerom **hore**,  $m_k < m_p$ ,  $\Omega > 0$ ,  $P < 0$ ,
- jazda **nezat'aženej** kabíny smerom **dole**,  $m_k < m_p$ ,  $\Omega < 0$ ,  $P > 0$ ,
- jazda plne **zat'aženej** kabíny smerom **hore**,  $m_k > m_p$ ,  $\Omega > 0$ ,  $P > 0$ ,
- jazda plne **zat'aženej** kabíny smerom **dole**,  $m_k > m_p$ ,  $\Omega < 0$ ,  $P < 0$ .



Obr.2.2 Prevádzkové stavy pohonného motora výťahu

Uvažujme, že hmotnosť kabíny  $m_k$  pozostáva z hmotnosti prázdnej kabíny  $m_{k0}$  a z užitočnej hmotnosti bremena  $m_b$ .

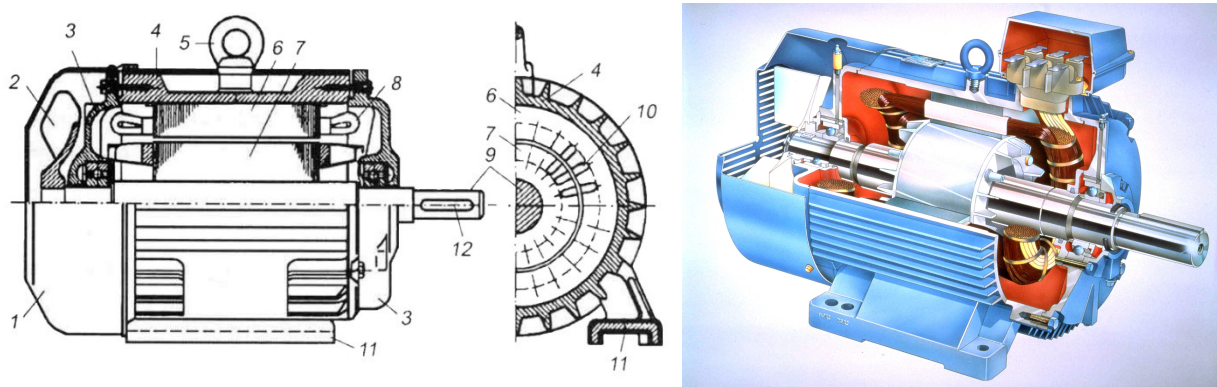
$$m_k = m_{k0} + m_b \quad (6)$$

Hmotnosť závažia protiváhy  $m_p$  sa volí ako polovica hmotnosti plne zat'aženej kabíny zväčšená o hmotnosť prázdnej kabíny  $m_{k0}$ . Aplikáciou vzťahov (1) až (6) možno odvodiť, že v ustálenom stave môže pohon výťahu pracovať vo všetkých štyroch kvadrantoch momentovo – otáčkovej charakteristiky t.j. v celkom rozsahu kladných a aj záporných mechanických výkonov  $P$  a uhlových rýchlostí  $\Omega$  (obr. 2.2).

### 3. Asynchrónny motor

Asynchrónny, alebo tiež indukčný motor, je v súčasnosti stále najpoužívanejším elektrickým točivým strojom vôbec. Vďaka jednoduchšej konštrukcii a vysokej prevádzkovej spoľahlivosti teší sa mimoriadnej obľube naprieč celého spektra národného hospodárstva. Asynchrónny motor je v súčasnosti stále najpoužívanejším pohonom zdvíhacích zariadení – výťahov. Preto sa oboznámime s mechanickou konštrukciou, princípom činnosti ako aj matematickým popisom vlastností tohto elektrického stroja za použitia odbornej literatúry [27 – 33].

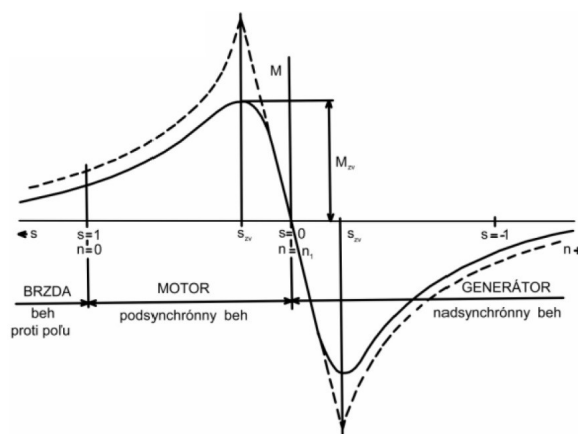
Asynchrónny motor (obr. 3.1) pozostáva najmä z vinutí statora, vinutí rotora a magnetického obvodu z plechov. Na statore je umiestnené statorové vinutie s príslušným počtom fáz. Rotorové vinutie môže byť tvorené kliečkou (stroj nakrátko), alebo vinutím vyvedeným na svorkovnicu (krúžkový stroj). V prevádzke pri menovitých parametroch je obvykle rotorové vinutie spojené nakrátko.



Obr.3.1 Rez asynchrónnym (indukčným) elektromotorom.

Statorové vinutie, napájané trojfázovou sústavou napätia, vytvorí vo vzduchovej medzere otáčavé magnetické pole. Točivý moment v asynchrónnom stroji vzniká pôsobením elektromagnetickej indukcie (preto tiež "indukčný" stroj), ktorá v rotorovom obvode indukuje prúd. Aby asynchrónny stroj mohol vyvíjať moment, musí sa rotor otáčať inými otáčkami ako magnetické pole vytvorené statorom. Podľa smeru a rýchlosti otáčania sa rotora a magnetického poľa vytvoreného statorom, sa môže asynchrónny motor nachádzať v troch prevádzkových stavoch a to motor, generátor a brzda.

Vlastná momentová charakteristika (obr. 3.2) asynchrónneho motora je charakteristika nameraná pri dodržaní štítkových (menovitých) údajov. Pre sklzy  $s < 0$  sa jedná o generátorické brzdenie, pre sklzy  $0 < s < 1$  ide o motorickú prevádzku a pri sklzoch  $s > 1$  dochádza k brzdeniu protiprúdom.



Obr.3.2 Vlastná momentová charakteristika asynchrónneho (indukčného) motora

### 3.1. Regulácia asynchrónneho motora zmenou frekvencie

Pri zmene frekvencie  $f_1$  napätia, ktorým napájame statorové vinutia asynchrónneho motora, zmení sa aj synchronná uhlová rýchlosť otáčania  $\Omega_1$ .

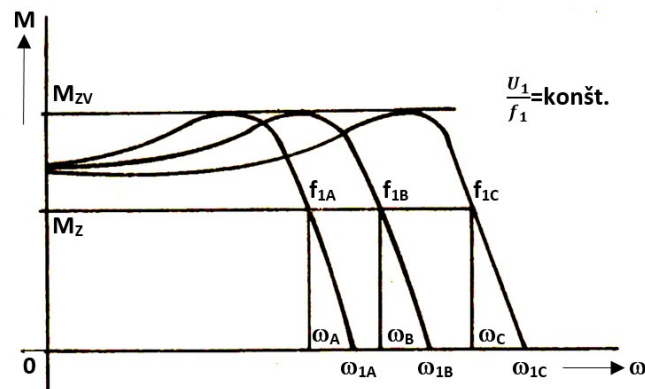
(7)

Okamžitá rýchlosť otáčania:

$$\Omega = \frac{2\pi f_1}{p} \cdot (1-s) \quad (8)$$

Moment zvratu  $M_{zV}$  je tiež funkciou frekvencie statorového napätia  $f_1$ :

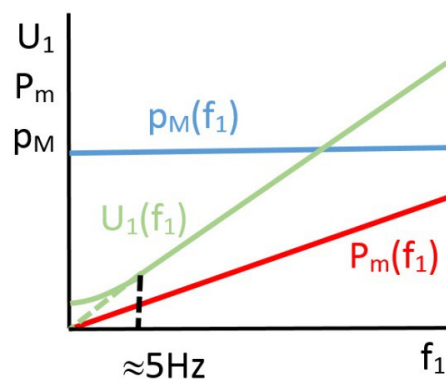
$$M_{zV} = c \cdot \left(\frac{U_1}{f_1}\right)^2 \quad (9)$$



Obr.3.3 Charakteristiky asynchrónneho motora pri zmene frekvencie statorového napätia

Ak má ostať zachovaná momentová preťažiteľnosť  $p_M$  v požadovanom rozsahu regulácie otáčok asynchrónneho motora, je potrebné spolu so zmenou frekvencie  $f_1$  meniť aj veľkosť efektívnej hodnoty napätia  $U_1$  privádzaného na statorové vinutie motora (obr. 3.3).

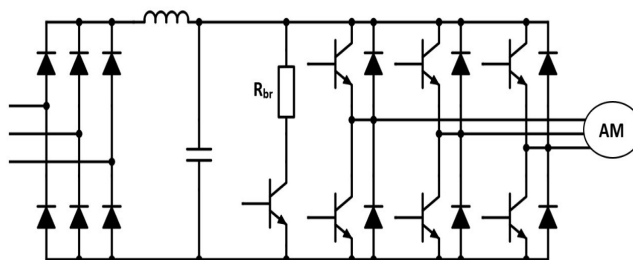
Konštantnú momentovú preťažiteľnosť motora  $p_M$  je možné zachovať ak budeme udržiavať konštantný magnetický tok  $\Phi$  vo vzduchovej medzere. To je možné keď, bude zachovaný pomer  $U_1 / f_1$ . Priebeh závislosti momentovej preťažiteľnosti  $p_M$ , napätia  $U_1$  a mechanického výkonu  $P_m$  možno pozorovať na obr. 3.4.



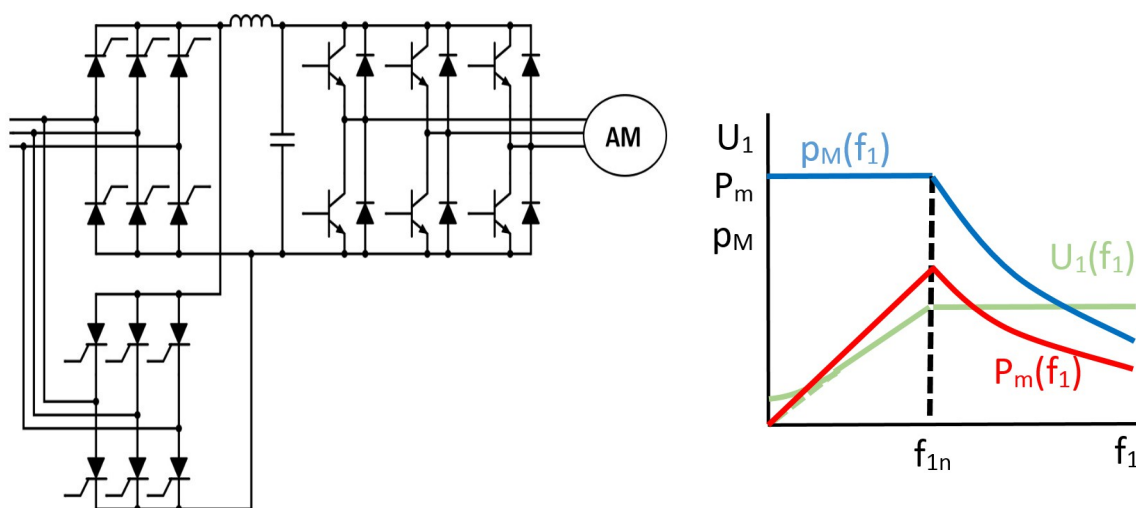
Obr.3.4 Priebehy charakteristík pri regulácii meniča na konštantnú momentovú preťažiteľnosť

## 4. Menič napätia a frekvencie pre elektrické pohony

Meniče napätia a frekvencie (Variable Voltage Variable Frequency), v praxi nazývané skrátene aj **frekvenčné meniče**, sú v súčasnosti vo veľkej miere nasadzované aj na pohonoch výťahov. Napájajú ako asynchrónne (indukčné) motory, tak aj motory synchronne, hlavne s permanentnými magnetmi (PMSM). Frekvenčné meniče sú zhotovené obvodovou kombináciou niekoľkých meničov. V našom prípade najmä s jednosmerným medziobvodom, tento je napájaný z usmerňovača z trojfázovej siete. Jednosmerný obvod ďalej obsahuje filter zostavený zo sériovej indukčnosti a paralelnej kapacity. Do jednosmerného medziobvodu je zaradený tiež jednosmerný impulzový menič, ktorý v prípade zvýšenia napätia v jednosmernom medziobvode, marí prebytočnú energiu v **brzdnom odporníku**. Jednosmerný napäťový medziobvod napája mostíkový trojfázový striedač. Vymenované obvody možno sledovať na schéme 4.1 a 4.2 [18, 33].



Obr.4.1 Zapojenie výkonového obvodu frekvenčného meniča s napäťovým js. medziobvodom



Obr.4.2 Zapojenie výkonového obvodu frekvenčného meniča s reverzačným usmerňovačom a priebeh závislosti výkonu  $P_m$ , momentovej preťažiteľnosti  $p_M$  a statorového napätia  $U_1$  od frekvencie statorového napätia  $f_1$  reálneho pohonu s frekvenčným meničom (skalárne riadenie)

V prípade, že má menič umožňovať **rekuperovať** energiu pri brzdení pripojeného asynchrónneho motora, musí byť na vstupe zapojený usmerňovač, ktorý umožňuje tok energie späť do siete, v tomto prípade reverzačný usmerňovač. Invertorový režim riadeného usmerňovača nie je možné použiť, nakoľko polarita jednosmerného medziobvodu sa v režime brzdenia nemení a teda neumožňuje tok takto zapojenými ventilmi.

V oblasti najnižších frekvencií od 0 Hz do cca. 5 Hz je udržiavané isté minimálne napätie  $U_1$ , potrebné na kompenzáciu vplyvu činného odporu statorového vinutia  $R_1$ . Nasleduje oblasť od 5 Hz do menovitej frekvencie (často 50 Hz), kde je pohon regulovaný na konštantnú momentovú preťažiteľnosť. Udržiavaný je teda konštantný pomer  $U_1 / f_1$ . Pri menovitej frekvencii sa dostávame na menovité napätie  $U_1$ , ktoré nemôžeme prekročiť. Ďalšia prípadná regulácia sa preto deje pri konštantnom napätí (obr. 4.2).

## 5. Počítačová simulácia prevádzkových režimov asynchrónneho motora

Práve **asynchrónny**, alebo **indukčný motor** je člen pohonnej sústavy výtahu, ktorý je primárne zodpovedný za neblahé energetické vlastnosti takéhoto pohonu z hľadiska odberu reaktívneho, alebo tiež jalového výkonu. Aj keď sa jedná nepochybne stále o najpoužívanejší elektrický točivý stroj vôbec, často sa možno práve v odbornej praxi stretnúť s otázkami typu "prečo má ten motor tak zlý účinník", alebo "či je to naozaj v poriadku". Teoretický výklad dostatočne vedecky vysvetľuje podstatu (**induktívneho**) charakteru odberu **indukčného stroja**, ktorý pre svoju činnosť nepochybne potrebuje magnetizačný prúd na vytvorenie magnetického silového poľa prenášajúceho výkon medzi statorom a rotorom stroja (viď. pojem "indukčný"). Rozhodli sme sa s pomocou simulačných prostriedkov dostupných v súčasnosti overiť respektíve simuláciou dodatočne podložiť teoretické tvrdenia, následne overené praktickým meraním, tak aby vznikol symbiotický systém: teória - simulácia - meranie.

Aby sme mohli realizovať simulácie v prostredí **MATLAB** respektíve **SIMULINK** na osobnom počítači, je potrebné poznať hodnoty prvkov **náhradnej schémy**. Tieto sme vypočítali na základe hodnôt z prevedených meraní naprázdno a nakrátko na vyšetrovanom AM 2,2 kW pomocou aplikácie rovníc a vzťahov z teoretického úvodu dizertačnej práce a odbornej literatúry [27, 29, 30].

Tab.5.1 Namerané hodnoty merania naprázdno na motore 2,2 kW, motor č.1

Výsledky merania naprázdno na AM 2,2 kW		
$I_{a0} = 2,03 \text{ A}$	$P_0 = 280 \text{ W}$	$U_0 = 380 \text{ V}$
$I_{b0} = 2,08 \text{ A}$	$Q_0 = 1330 \text{ VAr}$	$\cos \varphi_0 = 0,20$
$I_{c0} = 2,06 \text{ A}$	$S_0 = 1360 \text{ VA}$	$R_1 = 2,935 \text{ } \Omega$

Tab.5.2 Namerané hodnoty merania nakrátko na motore 2,2 kW, motor č.1

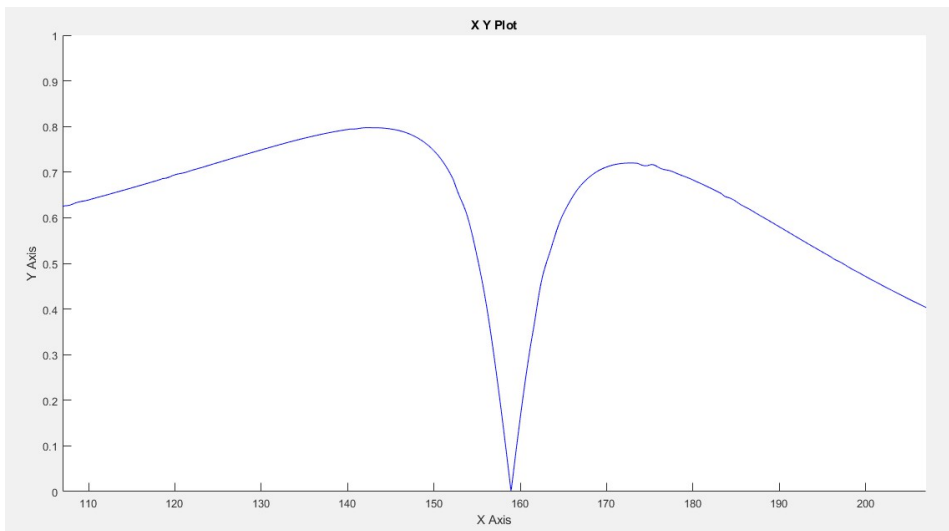
Výsledky merania nakrátko na AM 2,2 kW		
$I_{ak} = 4,98 \text{ A}$	$P_k = 606 \text{ W}$	$U_k = 123 \text{ V}$
$I_{bk} = 4,94 \text{ A}$	$Q_k = 884 \text{ VAr}$	$\cos \varphi_0 = 0,56$
$I_{ck} = 5,07 \text{ A}$	$S_k = 1071 \text{ VA}$	

Pomocou vývojového prostredia MATLAB sme mohli aplikovať rovnice z teoretického úvodu pre náhradnú schému a následne aplikovať hodnoty **prepočítaných prvkov náhradnej schémy** respektíve aplikácie zjednodušenia a transformácie náhradnej schémy. Hodnoty prvkov všeobecnej náhradnej schémy ako aj nameraná **magnetizačná charakteristika** boli aplikované v modeli indukčného stroja v prostredí SIMULINK.

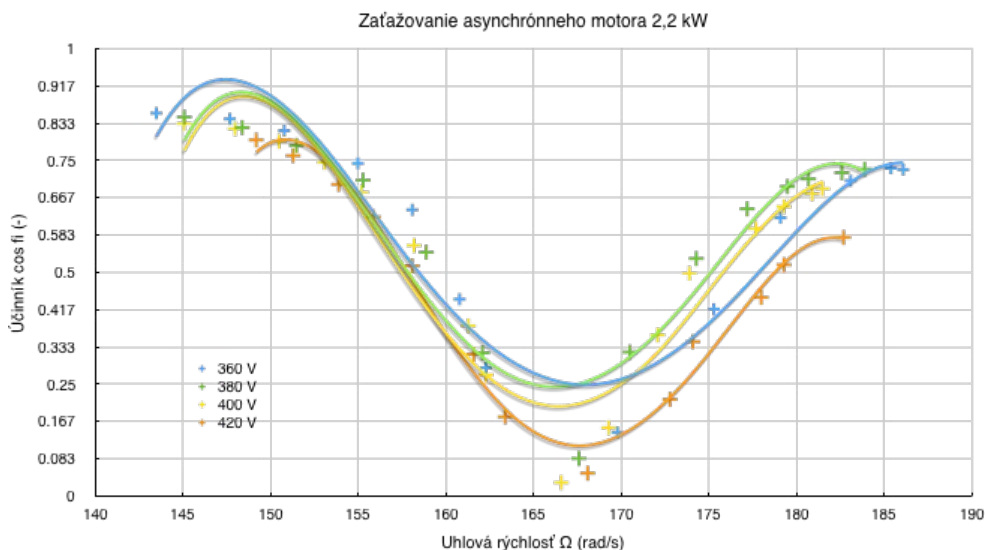
Nasleduje grafická interpretácia výsledkov simulácie činnosti asynchrónneho motora pripojeného na sieť s napätím  $U = 360, 380, 400, 420 \text{ V}$  pri frekvencii 50 Hz v rozsahu uhlovej rýchlosti 107 až 207 rad/s. Uvedené rozsahy korešpondujú s praktickým meraním, ktoré bolo realizované na motore č.1 (2,2 kW). Pre každú hodnotu napätia sú uvedené nasledovné závislosti:

- zaťažovacia charakteristika ako funkcia  $\mathbf{M} = \mathbf{f}(\Omega)$ ,
- závislosť statorového prúdu ako funkcia  $\mathbf{I} = \mathbf{f}(\Omega)$ ,
- závislosť činného výkonu na statore ako funkcia  $\mathbf{P} = \mathbf{f}(\Omega)$ ,
- závislosť jalového výkonu na statore ako funkcia  $\mathbf{Q} = \mathbf{f}(\Omega)$ ,
- závislosť účinníka prvej harmonickej na statore ako funkcia  $\mathbf{\cos \varphi} = \mathbf{f}(\Omega)$ .

Vzhľadom na obmedzený rozsah autoreferátu, uvádzame príklad vybranej simulovanej závislosti účinníka pri zaťažovaní AM 2,2 kW a napájaní napätím  $U = 400 \text{ V}$  na obr. 5.1. a nameranú závislosť účinníka AM 2,2 kW pri rovnakom napájaní ako funkciu  $\cos \varphi = f(\Omega)$  na obr. 5.2.



Obr.5.1 Účinník pri zaťažovaní AM 2,2 kW pri napájaní napätím  $U = 400 \text{ V}$ ,  
X Axis = Uhlová rýchlosť  $\Omega$  (rad/s), Y Axis = Účinník  $\cos \varphi$  (-)



Obr.5.2 Nameraná závislosť účinníka AM 2,2 kW ako funkcia  $\cos \varphi = f(\Omega)$

Simulačné modely asynchrónneho motora ako aj výpočet parametrov náhradnej schémy sú vytvorené na základe teoretického matematického aparátu a preto priebehy závislostí veličín vygenerovaných simuláciou zodpovedajú teoretickému predpokladu, čo zároveň potvrdzuje správnosť aplikácie použitých výpočtov. Zaujímavé je však porovnanie **simulovaných charakteristík** a **nameraných charakteristík** asynchrónneho motora o výkone 2,2 kW.

Je možné si povšimnúť, že v porovnateľných rozsahoch veľkosti uhlovej rýchlosti sa tvary priebehov **funkčných závislostí** dokonale **zhodujú**. Napriek tomu však je možné pozorovať niektoré odlišnosti, ktoré pripisujeme nasledovným skutočnostiam:

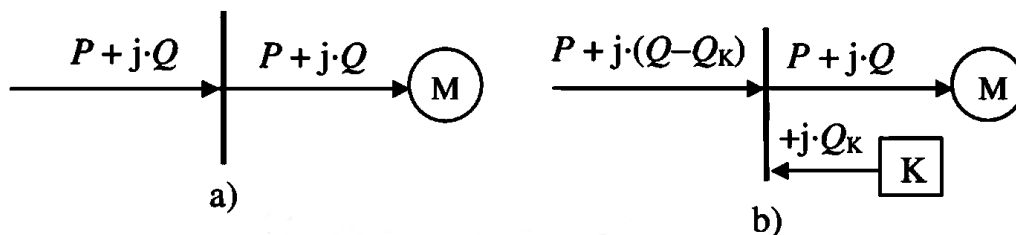
- nulový moment zaťažovacej charakteristiky, minimá prúdu, jalového výkonu a účinníku nenastávajú v nameraných charakteristikách pri synchronnej uhlovej rýchlosti 157 rad/s, ale pri hodnote 165 rad/s, čo je spôsobené skutočnosťou, že na hriadeli dynamometra boli okrem vyšetřovaného stroja mechanicky pripojené ďalšie dva stroje, otáčkomer vykazoval systematickú chybu merania, nebola prevedená korekcia na straty vlastného dynamometra,
- namerané a simulované hodnoty momentu, prúdu, činného výkonu, jalového výkonu a účinníku sa mierne odlišujú, čo je spôsobené skutočnosťou, že pracujeme so zjednodušenou náhradnou schémou, ďalej neistotou merania ako aj vekom vyšetřovaného stroja s rokom výroby 1952.



## 6. Použitie statickej kondenzátorovej kompenzácie na výťahoch

Kompenzácia reaktívneho (jalového) výkonu je známa od počiatkov priemyselného využitia striedavého prúdu. V minulosti boli okrem statických kondenzátorov používané napríklad synchrónne kompenzátory, ktoré sú predstavované naprázdno bežiacim prebudeným synchrónnym strojom. Podstatou kompenzácie je dodávka reaktívneho výkonu čo najbližšie miesta jeho spotreby (centrálne, skupinová, individuálna kompenzácia). Najdokonalejšia, ale ekonomicky najnáročnejšia je kompenzácia individuálna, ktorá rieši potrebu reaktívneho výkonu konkrétneho spotrebiča.

Je nesporné, že asynchrónny motor je **spotrebičom reaktívneho výkonu**, ktorý je možné aproximovať výpočtom, simuláciou, odčítať z katalógových údajov, respektíve najlepšie odmerať pre konkrétny stroj. Následne je možné vypočítať hodnotu požadovaných kompenzačných kondenzátorov tak, aby sme sa priblížili požadovanej hodnote účinníka.



Obr. 6.1 Tok energie (a) nekompenzovaného a (b) individuálne kompenzovaného motora

Potrebný **kompenzačný výkon** kondenzátorov  $Q_K$  je možné vypočítať napríklad z rozdielu požadovaného účinníka, skutočného účinníka (vyjadreného ako tangens  $\varphi_K$  a  $\varphi$ ) a známeho činného výkonu  $P$  pomocou vzťahu:

$$Q_K = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_K) \quad (10)$$

Potrebnú kapacitu kompenzačných kondenzátorov zapojených do hviezdy určíme pri známom fázovom napätí  $U_f$  a frekvencii  $f$  pomocou vzorca:

$$C_K = \frac{Q_K}{(3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_f^2)} \quad (11)$$

Prípadne pre zapojenie kompenzačných kondenzátorov do trojuholníka použijeme vzťah so združeným napätím  $U_z$ :

$$C_K = \frac{Q_K}{(3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_z^2)} \quad (12)$$

Pri výpočte požadovaného kompenzačného reaktívneho výkonu je treba voliť cieľový účinník  $\cos \varphi = 0,95$  induktívneho charakteru, **nie je vhodné pohybovať sa v bezprostrednom okolí hodnoty 1**, nakoľko takýto stav by znamenal, že kapacitancia kondenzátora a induktancia motora sú v rovnosti  $X_L = X_C$ , čo je veľmi účinný rezonančný obvod. Takto vytvorený rezonančný obvod by mohol zakmitať pri vypínaní obvodu a svojím indukovaným rezonančným napätím, napríklad poškodiť izoláciu vinutí stroja.

V prípade elektrického pohonu výťahu nie je možné aplikovať kompenzáciu jalového výkonu jednoduchým pripojením kondenzátora paralelne k vinutiám motora z dvoch dôvodov:

- príslušné technické normy STN a EN pre výťahy takúto možnosť explicitne zakazujú,
- strojné zariadenie výťahu je ako celok VTZ zdvíhacie, jeho konštrukčná dokumentácia podlieha typovej skúške a do zapojenia už inštalovaného VTZ nie je možné zasahovať.

Napriek uvedenému je možné použiť statickú kondenzátorovú kompenzáciu jalového výkonu aj v prípade výťahu s asynchrónnym motorom a to takým spôsobom, že kompenzačné zariadenie (rozdávčač) bude pripojené pred hlavným vypínačom výťahu. Takáto kompenzačná jednotka musí byť schopná indikovať potrebu jalového výkonu a pripájať kondenzátory len v čase kedy je pohon v činnosti. Priame prepojenie kompenzačnej jednotky a výťahového rozvádzača je neprípustné. Príklad vhodného zapojenia kompenzačnej jednotky pre výťahy je uvedený na obr. 6.3. v dizertačnej práci.



## 7. Meranie realizované na motoroch, meničoch a výt'ahoch

Aby sme mohli posúdiť energetické vlastnosti konkrétneho elektrického pohonu potrebujeme poznať celý súbor informácií, ktoré možno popísať minimálnym rozsahom [8 – 11]:

- štítkové a katalógové hodnoty motora pohonu,
- hodnoty elektrické - činný, zdanlivý a jalový výkon, účinník, prúdy fáz, THD I, THD U,
- hodnoty mechanické - ako rýchlosť otáčania, menovitý moment, momentová preťažiteľnosť.

### 7.1. Laboratórne meranie na asynchrónnych motoroch 2,2 kW, 5 kW, 7,5 kW

Za účelom získania podrobnejšej predstavy o energetických vlastnostiach reálnych asynchrónnych motorov vo vyšetrovanom výkonovom rozsahu, realizovali sme nasledujúce merania v Laboratóriu elektrických pohonov nášho ústavu. Asynchrónny motor **2,2 kW**, respektíve **5,5 kW** a **7,5 kW** napájaný konštantným napätím z indukčného regulátora, bol pomocou dynamometra zaťažovaný v rozsahu od chodu naprázdno po menovité zaťaženie. Pomocou laboratórných prístrojov boli registrované hodnoty napätia, prúdu, činného výkonu, otáčok a momentu. Z nameraných hodnôt boli vypočítané hodnoty zdanlivého výkonu, mechanického výkonu, účinnosti, účinníka a sklzu. Údaje sú prehľadne spracované v tabuľkách, ako aj graficky interpretované pomocou vyobrazenia relevantných závislostí.

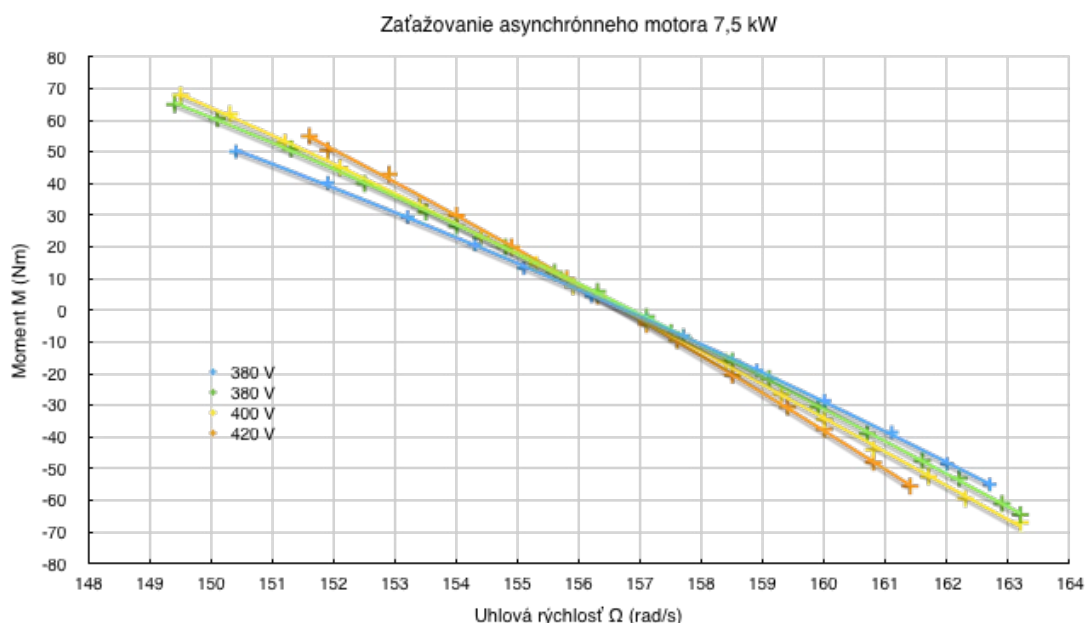
Charakteristiky strojov boli merané pomocou jednosmerného dynamometra MEZ VSETÍN, bez korekcie na straty dynamometra, pri hodnotách napájacieho napätia  $U = 360, 380, 400$  a  $420$  V v motorickom aj generátorickom režime práce stroja. Meranie bolo vykonané podľa dlhodobo uznávanej metodiky popísanej v odbornej literatúre [13, 14].

Štítkové údaje stroja č.1: Motor 3~ JNF 2,2 kW, Y/D 380/220V, 5/8,65 A, 1400 ot/min, 50 Hz.

Štítkové údaje stroja č.2: Motor 3~ 5,5 kW, D 380 V, 12 A, 1460 ot/min., 50 Hz.

Štítkové údaje stroja č.3: AM 3~ 7,5 kW, Y/D 380/220 V, 16,4/23,4 A, 1435 ot/min., 50Hz.

Vzhľadom na obmedzený rozsah autoreferátu vyberáme demonštratívne zaťažovaciu charakteristiku na obr.7.1. pre zvolené prípady napájacieho napätia statora 360, 380, 400 a 420 V.



Obr.7.1 Nameraná momentová charakteristika AM 7,5 kW ako funkcia  $M = f(\Omega)$

## 7.2 Laboratorne meranie na meničoch napätia a frekvencie 2,5 kW a 5 kW

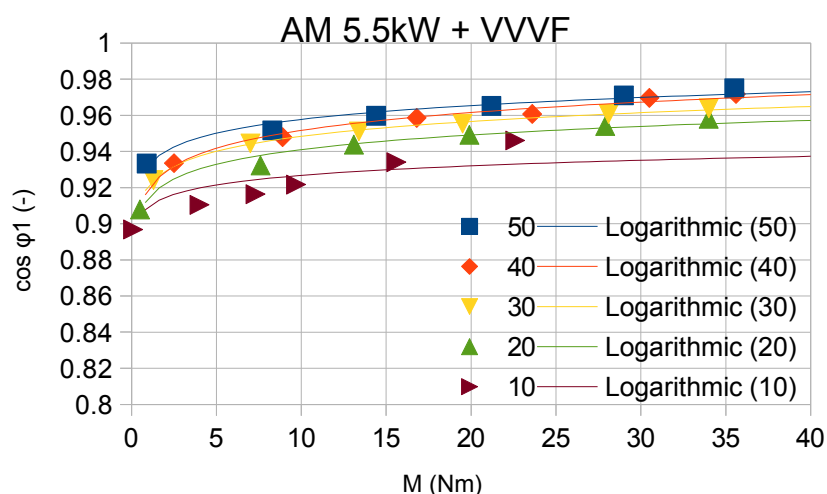
Asynchronný motor napájaný z meniča napätia a meniča frekvencie (VVVF) bude charakterizovaný vlastnosťami takto vzniknutej sústavy menič - motor. Vlastnosti pohonu budú modelované najmä nastavením meniča a ohraničené charakteristikami stroja. Aby sme správne predpokladali správanie sa pohonu napájaného z VVVF meniča, previedli sme nasledujúce laboratorne merania [33].

Pri meraní na 2,5 kW meniči bol použitý rovnaký motor označený ako č.1. Rozdielne je **napájanie**, ktoré je tu realizované z **frekvenčného meniča** SIEMENS SIMOVERT príslušnej typovej veľkosti. Vykonané boli dve sady meraní, v prvom prípade sme zaťažovali motor napájaný VVVF meničom pomocou dynamometra momentom 0 - 15 Nm pri konštantnej frekvencii 50, 40, 30, 20 a 10 Hz. V druhom prípade sme motor napájaný VVVF meničom zaťažovali pomocou dynamometra pri konštantnom momente 10, 8, 4, 2 a 0 Nm pri zeme frekvencie 0 - 50 Hz. Výsledky meraní výkonových pomerov, celkového účinníka a účinníka 1. harmonickej sú uvedené v tab. 7.15 až 7.24 a graficky interpretované ako závislosti na obr. 7.20 až 7.23 v dizertačnej práci.

V prípade merania na 5 kW meniči bol použitý rovnaký motor označený ako č.2. Rozdielne je napájanie, ktoré je tu realizované z **frekvenčného meniča** VACON príslušnej typovej veľkosti. Vykonané boli obdobne dve sady meraní. V prvom prípade sme zaťažovali motor napájaný VVVF meničom pomocou dynamometra momentom 0 - 35 Nm pri konštantnej frekvencii 50, 40, 30, 20 a 10 Hz. V druhom prípade sme motor napájaný VVVF meničom zaťažovali pomocou dynamometra pri konštantnom momente 20, 15, 10, 5 a 0 Nm pri zmene frekvencie 0 - 50 Hz. Výsledky meraní výkonových pomerov, celkového účinníka a účinníka 1. harmonickej sú uvedené v tab. 7.25 až 7.34 a graficky interpretované ako závislosti na obr. 7.24 až 7.27 v dizertačnej práci.

Tab.7.1 Zaťažovanie VVVF meniča motorom 5,5 kW pri konštantnom momente  $M = 0$  Nm

M (Nm)	0										
P (W)	Q (VAr)	S (VA)	f (Hz)	n (ot/min)	n <sub>KOR</sub> (ot/min)	$\lambda$ (-)	$\cos \varphi_1$ (-)	D (VA)	n <sub>1</sub> (ot/min)	s (%)	
723	305	1134	50	1498	1498	0.638	0.921	818.659	1500	0.133	
610	262	1008	40	1199	1199	0.605	0.919	758.499	1200	0.083	
497	225	853	30	898	898	0.583	0.911	655.725	900	0.222	
360	183	651	20	599	599	0.553	0.891	510.600	600	0.167	
221	119	434	10	299	299	0.509	0.880	354.054	300	0.333	



Obr.7.2 Nameraná závislosť účinníka 1.harmonickej pri zaťažovaní VVVF s AM 5,5 kW

### 7.3 Praktické meranie na reálnych výťahoch 250 kg, 320 kg a 500 kg

Aby sme mohli analyzovať vlastnosti pohonu **skutočného výťahu**, realizovali sme pomerne široké spektrum meraní zameraných na energetiku takéhoto pohonu. So súhlasom prevádzkovateľa sme vykonali okamžité aj strednodobé merania. Za použitia zhotoveného meracieho prípravku so sieťovým analyzátorom SCHRACK a neskôr laboratórneho analyzátoru kvality elektrickej energie CHAUVIN ARNOUX, sme určovali spotrebu činnej a jalovej práce, veľkosť činného, zdanlivého, jalového a deformačného výkonu, celkového harmonického skreslenia prúdu a napätia, účinníka prvej harmonickej (displacement power factor) a celkového účinníka (true power factor) v motorovom obvode výťahu. Kde to okolnosti umožňovali previedli sme aj meranie charakteru odberu svetelných a riadiacich obvodov, ktoré však nie je možné stotožňovať s hlavným predmetom záujmu, ktorým je motorový obvod (elektrický pohon).

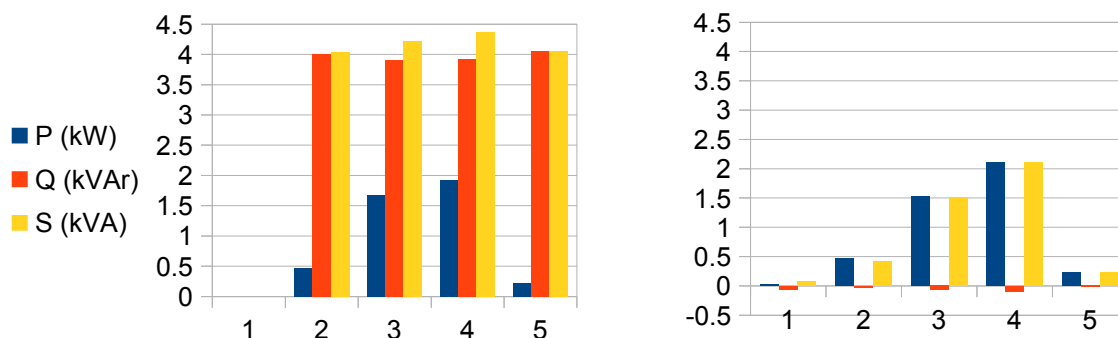
Na základe dlhoročných skúseností autora, boli ako reprezentatívna vzorka vybrané 3 typy najčastejšie sa vyskytujúcich výťahov v budovách občianskej vybavenosti a to konkrétne:

- trakčný lanový výťah s nosnosťou 250 kg, dopravnou rýchlosťou 0,7 m.s<sup>-1</sup> a motorom 2,5 kW,
- trakčný lanový výťah s nosnosťou 320 kg, dopravnou rýchlosťou 0,7 m.s<sup>-1</sup> a motorom 3,5 kW,
- trakčný lanový výťah s nosnosťou 500 kg, dopravnou rýchlosťou 0,7 m.s<sup>-1</sup> a motorom 5 kW.

Za účelom analyzovania energetiky reálneho pohonu sme pripravili niekoľko **praktických meraní** na pohone výťahu OT 250/0,7 s nosnosťou 250 kg a s rýchlosťou jazdy 0,7 m/s, inštalovaného v obytnej budove. Skúmaný pohon výťahu je opatrený jednorýchlostným asynchrónnym motorom s kotvou nakrátko o výkone 2,5 kW. Elektromotor pohonu je rozbiehaný priamym pripojením na sieť prostredníctvom stýkačov, ktoré tiež zabezpečujú reverzáciu. V tab. 7.2 je možné sledovať namerané hodnoty prvého merania pre prevádzkové stavy jazdy **prázdnej** (nezaťaženej) ako aj **zaťaženej** kabíny smerom **hore** a jazdy prázdnej a zaťaženej kabíny smerom **dole**, vrátane odberu svetelných a riadiacich obvodov.

Tab.7.2 Namerané hodnoty odberu pôvodného 2,5 kW pohonu výťahu

	Kľudový stav bez osvetlenia	Jazda prázdnej kabíny HORE	Jazda prázdnej kabíny DOLE	Jazda zaťaženej kabíny HORE	Jazda zaťaženej kabíny DOLE	
<b>m (kg)</b>	0	0	0	200	200	
<b>Svetelný obvod</b>	<b>U<sub>s</sub> (V)</b>	238	237.3	236.7	236.8	236.9
	<b>I<sub>s</sub> (A)</b>	0	0.25	0.25	0.25	0.25
	<b>P<sub>s</sub> (kW)</b>	0.005	0.0609	0.0592	0.0616	0.0591
	<b>cos φ<sub>s</sub> (-)</b>	1	1	1	1	1
<b>Motorový obvod</b>	<b>U<sub>1</sub> (V)</b>	239.7	238.6	238.2	239.2	239.1
	<b>U<sub>2</sub> (V)</b>	238.4	238.3	237.9	237.1	238
	<b>U<sub>3</sub> (V)</b>	238.7	238	237.6	238.6	237.6
	<b>I<sub>1</sub> (A)</b>	0	5.86	6.22	6.54	5.93
	<b>I<sub>2</sub> (A)</b>	0	5.68	5.93	6.1	5.76
	<b>I<sub>3</sub> (A)</b>	0	5.36	5.67	5.9	5.32
	<b>P (kW)</b>	0	0.473	1.67	1.93	0.22
	<b>Q (kVAr)</b>	0	4.01	3.901	3.932	4.053
	<b>S (kVA)</b>	0	4.032	4.223	4.365	4.056
	<b>cos φ<sub>1</sub> (-)</b>	1	0.087 ind.	0.381 ind.	0.433 ind.	0.050 ind.
	<b>THD U<sub>1</sub> (%)</b>	0	0	0	0	0
	<b>THD U<sub>2</sub> (%)</b>	0	2	2	2	2
	<b>THD U<sub>3</sub> (%)</b>	0	0	0	0	0
	<b>THD I<sub>1</sub> (%)</b>	0	4	0	0	3
<b>THD I<sub>2</sub> (%)</b>	0	3	2	3	4	
<b>THD I<sub>3</sub> (%)</b>	0	5	4	4	5	



Obr.7.3 Grafická interpretácia odberu motora pre stavy podľa tabuľky 7.2 (vľavo) a 7.3 (vpravo)

Druhé meranie bolo uskutočnené na pôvodnom pohone s asynchrónnym motorom, ale už vybavenom reguláciou pomocou frekvenčného meniča (VVVF), po výmene zastaraného a opotrebovaného stýkačového riadenia typu VRN3. Výsledky merania je možné sledovať v tab. 7.3. Grafické znázornenie nameraných hodnôt je vyobrazené na korešpondujúcich prvkoch obr. 7.3. Signifikantná je zmena v oblasti odberu jalového výkonu, po aplikácii frekvenčného meniča (správne meniča napätia a frekvencie - VVVF) je účinník prvej harmonickkej, vďaka obodom optimalizácie účinníka (PFC), blízky 1 v širokom rozsahu prevádzkových režimov stroja pohonu. Zaujímavé výsledky merania predstavuje aj celkové hramonické skreslenie prúdu, ktoré je blízke nule a teda svedčí o správne aplikovaných prostriedkoch na jeho elimináciu (algoritmy PFC a sínusové filtre).

Tab.7.3 Namerané hodnoty odberu rekonštruovaného 2,5 kW pohonu výťahu

		Kľudový stav bez osvetlenia	Jazda prázdnej kabíny HORE	Jazda prázdnej kabíny DOLE	Jazda zaťaženej kabíny HORE	Jazda zaťaženej kabíny DOLE
<b>m (kg)</b>		0	0	0	200	200
<b>Svetelný obvod</b>	<b>U<sub>s</sub> (V)</b>	238.6	238.7	238.7	238.3	238.8
	<b>I<sub>s</sub> (A)</b>	0.06	0.26	0.26	0.26	0.26
	<b>P<sub>s</sub> (kW)</b>	0.0107	0.059	0.0592	0.059	0.0592
	<b>cos φ<sub>s</sub> (-)</b>	0.725	0.941	0.941	0.941	0.941
<b>Motorový obvod</b>	<b>U<sub>1</sub> (V)</b>	238.9	238.9	238.3	238.8	239.3
	<b>U<sub>2</sub> (V)</b>	239.4	238.5	238.4	238	239
	<b>U<sub>3</sub> (V)</b>	239.3	239.3	239.1	239	239.5
	<b>I<sub>1</sub> (A)</b>	0.14	1.25	4.28	5.71	0.6
	<b>I<sub>2</sub> (A)</b>	0.11	1.03	4.07	5.45	0.51
	<b>I<sub>3</sub> (A)</b>	0.13	0.49	3.32	4.76	0.09
	<b>P (kW)</b>	0.015	0.464	1.521	2.103	0.225
	<b>Q (kVA)</b>	-0.06	-0.03	-0.07	-0.1	-0.02
	<b>S (kVA)</b>	0.07	0.417	1.504	2.105	0.225
	<b>cos φ<sub>1</sub> (-)</b>	0.240 kap.	0.999 kap.	0.999 kap.	0.999 kap.	0.992 kap.
	<b>THD U<sub>1</sub> (%)</b>	0	0	0	0	0
	<b>THD U<sub>2</sub> (%)</b>	0	0	0	0	0
	<b>THD U<sub>3</sub> (%)</b>	0	0	0	0	0
<b>THD I<sub>1</sub> (%)</b>	0	0	9	0	0	
<b>THD I<sub>2</sub> (%)</b>	0	0	0	0	0	
<b>THD I<sub>3</sub> (%)</b>	0	0	0	0	0	

## 7.4 Strednodobé meranie na výťahu 250 kg

Za použitia rovnakej meracej aparatury bolo realizované strednodobé meranie na reálnom pohone výťahu pred, ako aj po rekonštrukcii v popisovanom rozsahu, t.j. so zachovaním pohonného sústrojenstva a osadeným frekvenčným meničom. So súhlasom servisnej organizácie bolo počas obdobia 8 dní pred rekonštrukciou a počas obdobia 22 dní po rekonštrukcii predmetného pohonu realizované meranie, pri ktorom boli predmetom záujmu kumulatívne počítadlá sieťového analyzátora pre všetky 4 kvadranty, ako aj počítadlo jazd riadenia výťahu.

V rámci interpretácie nameraných hodnôt je vykonaný prepočet na relatívnu hodnotu odobratej činnnej a jalovej práce vzťahujúcu sa na priemerný deň ako aj priemernú jazdu. Nameraná kumulatívna spotreba podelená počtom dní predstavuje relatívnu hodnotu v kWh / deň. Nameraná kumulatívna spotreba podelená počtom jazd v sledovanom období predstavuje relatívnu hodnotu v kWh / jazdu. Analogicky pre jalový výkon kVArh / deň respektíve kVArh / jazdu.

Tab.7.4 Namerané kumulatívne hodnoty odberu pôvodného 2,5 kW pohonu výťahu

	Začiatok merania	Koniec merania	Rozdiel		
<b>Dátum a čas (hod.)</b>	08/22/16 02:40 PM	08/30/16 12:30 PM	7.91	Interval merania	
<b>Počít. Jazd</b>	587136	589460	2324	Počet jazd	
<b>P+ (kWh)</b>	0.008	1.365	1.357	Odobratá činná práca	
<b>t (hod.)</b>	18.03	206.39	188.36	Kontrolné počítadlo	
<b>Svetelný obvod</b>	<b>P+ (kWh)</b>	98.30	115.20	16.90	Odobratá činná práca
	<b>Q+ (kVArh)</b>	105.90	157.00	51.10	Odobratá jalová práca
	<b>P- (kWh)</b>	0.10	0.10	0.00	Dodaná činná práca
	<b>Q- (kVArh)</b>	23.00	23.00	0.00	Dodaná jalová práca
	<b>t (hod.)</b>	0	0	0	Kontrolné počítadlo

Tab.7.5 Namerané kumulatívne hodnoty prepočítané na deň a jazdu (2,5 kW pred rekonštrukciou)

<b>Svetelný obvod</b>	<b>P+/deň</b>	0.1715610	Odobratý činný výkon kWh/deň
	<b>P+/jazdu</b>	0.0005839	Odobratý činný výkon kWh/jazdu
<b>Motorový obvod</b>	<b>P+/deň</b>	2.1366111	Odobratý činný výkon kWh/deň
	<b>Q+/deň</b>	6.4604039	Odobratý jalový výkon kVArh/deň
	<b>P-/deň</b>	0.0000000	Dodaný činný výkon kWh/deň
	<b>Q-/deň</b>	0.0000000	Dodaný jalový výkon kVArh/deň
	<b>P+/jazdu</b>	0.0072719	Odobratý činný výkon kWh/jazdu
	<b>Q+/jazdu</b>	0.0219880	Odobratý jalový výkon kVArh/jazdu
	<b>P-/jazdu</b>	0.0000000	Dodaný činný výkon kWh/jazdu
	<b>Q-/jazdu</b>	0.0000000	Dodaný jalový výkon kVArh/jazdu

V motorovom obvode výťahu je možné sledovať zjavnú elimináciu potreby reaktívneho (jalového) výkonu po nasadení VVVF meniča. Naopak sústava sa javí mierne kapacitná, najmä v pohotovostnom režime, čo je dané charakterom napäťového jednosmerného obvodu meniča v ktorom je zaradená veľká kapacita. V prevádzkových režimoch sa vplyvom optimalizácie účinníka PFC dostávame na hodnotu účinníka veľmi blízku 1. Miernu úsporu sme dosiahli aj v oblasti odberu činnnej práce, nakoľko plynulou reguláciou akcelerácie a decelerácie klesá potreba energie na krytie dynamických momentov zotrvačnosti pohybujúcich sa hmôt.

Tab.7.6 Namerané kumulatívne hodnoty odberu rekonštruovaného 2,5 kW pohonu výt'ahu

	Začiatok merania	Koniec merania	Rozdiel		
	08/30/16 12:30 PM	09/21/16 02:30 PM	22.08333333	Interval merania	
	Počít. Jazd	100	6506	6406	Počet jazd
Svetelný obvod	P+ (kWh)	1.365	9.802	8.437	Odobratá činná práca
	t (hod.)	206.39	736.17	529.78	Kontrolné počítadlo
Motorový obvod	P+ (kWh)	115.20	159.80	44.60	Odobratá činná práca
	Q+ (kVArh)	157.00	157.00	0.00	Odobratá jalová práca
	P- (kWh)	0.10	0.10	0.00	Dodaná činná práca
	Q- (kVArh)	23.00	58.70	35.70	Dodaná jalová práca
	t (hod.)	0	0	0	Kontrolné počítadlo

Tab.7.7 Namerané kumulatívne hodnoty prepočítané na deň a jazdu (2,5 kW po rekonštrukcii)

Svetelný obvod	P+/deň	0.3820528	Odobratý činný výkon kWh/deň
	P+/jazdu	0.0013170	Odobratý činný výkon kWh/jazdu
Motorový obvod	P+/deň	2.0196226	Odobratý činný výkon kWh/deň
	Q+/deň	0.0000000	Odobratý jalový výkon kVArh/deň
	P-/deň	0.0000000	Dodaný činný výkon kWh/deň
	Q-/deň	1.6166038	Dodaný jalový výkon kVArh/deň
	P+/jazdu	0.0069622	Odobratý činný výkon kWh/jazdu
	Q+/jazdu	0.0000000	Odobratý jalový výkon kVArh/jazdu
	P-/jazdu	0.0000000	Dodaný činný výkon kWh/jazdu
	Q-/jazdu	0.0055729	Dodaný jalový výkon kVArh/jazdu

Tab.7.8 Porovnanie merného odberu elektrickej energie pohonu 2,5 kW skúmaného výt'ahu s pôvodným stýkačovým riadením a modernizovaným riadením s frekvenčným meničom

	pred rekonštrukciou	po rekonštrukcii	percentuálne porovnanie		
Svetelný obvod	P+/deň	0,1715610	0,3820528	122,6920973	Odobratý činný výkon kWh/deň
	P+/jazdu	0,0005839	0,0013170	125,5575615	Odobratý činný výkon kWh/jazdu
Motorový obvod	P+/deň	2,1366111	2,0196226	-5,4754196	Odobratý činný výkon kWh/deň
	Q+/deň	6,4604039	0,0000000	-100	Odobratý jalový výkon kVArh/deň
	P-/deň	0,0000000	0,0000000	-	Dodaný činný výkon kWh/deň
	Q-/deň	0,0000000	1,6166038	-	Dodaný jalový výkon kVArh/deň
	P+/jazdu	0,0072719	0,0069622	-4,25913576	Odobratý činný výkon kWh/jazdu
	Q+/jazdu	0,0219880	0,0000000	-100	Odobratý jalový výkon kVArh/jazdu
	P-/jazdu	0,0000000	0,0000000	-	Dodaný činný výkon kWh/jazdu
	Q-/jazdu	0,0000000	0,0055729	-	Dodaný jalový výkon kVArh/jazdu

Z uvedených údajov je možné usudzovať, že došlo k miernemu nárastu spotreby činnej práce v svetelnom obvode po modernizácii výt'ahu vplyvom aplikácie indikátorov polohy (polohová signalizácia) z LCD panelov a tiež vplyvom použitia podsvietenia ovládacích tlačidiel vonkajších aj vnútorných tlačidlových zostáv. Tieto indikačné prvky sú v činnosti nepretržite a prispievajú najmä k spotrebe elektrickej energie v pohotovostnom režime výt'ahu.

## 8. Ekonomická analýza prevádzky trakčných lanových výtáhov

Realizované merania na pohonoch reálnych výtáhov s nosnosťou 250 kg, 320 kg a 500 kg s pôvodným asynchrónnym pohonom a neskôr s pohonom s motorom napájaným z VVVF meniča nám dáva súbor hodnôt, ktoré je možné aplikovať pri ekonomickej analýze prevádzky takýchto výtáhov. Na ekonomické vyhodnotenie boli použité údaje z faktúr za dodávku elektrickej energie a tiež údaje z cenníkov Západoslovenskej distribučnej, a.s. Prevádzkové náklady sa môžu líšiť pre prípady výtáhov prevádzkovaných v iných distribučných sústavách.

Celkové porovnanie mernej energetickej náročnosti prepočítanej na 1 priemernú jazdu, respektíve 1 priemerný deň prevádzky 250 kg výtahu je uvedené v tab. 7.8. Dĺžka meraní bola v každom prípade minimálne 1 pracovný týždeň tak, aby vyhodnocované údaje boli štatisticky relevantné.

Z uvedených údajov je možné usudzovať, že došlo k miernemu nárastu spotreby činnnej práce v svetelnom obvode po modernizácii výtahu vplyvom aplikácie indikátorov polohy (polohová signalizácia) z LCD panelov a tiež vplyvom použitia podsvietenia ovládacích tlačidiel vonkajších aj vnútorných tlačidlových zostáv. Tieto indikačné prvky sú v činnosti nepretržité a prispievajú najmä k spotrebe elektrickej energie v pohotovostnom režime výtahu.

V motorovom obvode výtahu je možné sledovať zjavnú elimináciu potreby reaktívneho (jalového) výkonu po nasadení VVVF meniča. Naopak sústava sa javí mierne kapacitná, najmä v pohotovostnom režime, čo je dané charakterom napäťového jednosmerného obvodu meniča v ktorom je zaradená veľká kapacita. V prevádzkových režimoch sa vplyvom optimalizácie účinníka PFC dostávame na hodnotu účinníka veľmi blízku 1. Miernu úsporu sme dosiahli aj v oblasti odberu činnnej práce, nakoľko plynulou reguláciou akcelerácie a decelerácie klesá potreba energie na krytie dynamických momentov zotrvačnosti pohybujúcich sa hmôt.

Vzhľadom na skutočnosť, že účtovací interval pre vyúčtovanie spotreby elektrickej energie je časový rámeček (mesiac, rok) a nie počet vykonaných jazd, budeme v ďalšom uvažovať s priemernými hodnotami vzťahnutými na časové obdobie prevádzky výtahu. Pri zvolenom účtovacom intervale 30 kalendárnych dní (mesiac) možno odhadovať nasledovné.

**Pri pôvodnom napájaní pohonu** výtahu priamo z elektrickej siete dosiahli sme priemerné hodnoty ktoré rezultujú v predpokladaný mesačný odber nasledovne:

- svetelný obvod - činná práca: 30 dní x 0,1715 kWh / deň = 5,1468 kWh / mesačne,
- motorový obvod - činná práca: 30 dní x 2,1366 kWh / deň = 64,0983 kWh / mesačne,
- **spolu činná práca: 69,2451 kWh / mesačne,**
- motorový obvod - jalová práca: 30 dní x 6,4604 kVArh / deň = 193,8121 kVArh / mesačne,
- **spolu jalová práca: 193,8121 kVArh / mesačne,**
- **tangens  $\phi$  pre účely výpočtu prirážky: 2,799.**

**Pri modernizovanom napájaní pohonu** výtahu prostredníctvom VVVF meniča dosiahli sme priemerné hodnoty ktoré rezultujú v predpokladaný mesačný odber nasledovne:

- svetelný obvod - činná práca: 30 dní x 0,3820 kWh / deň = 11,4615 kWh / mesačne,
- motorový obvod - činná práca: 30 dní x 2,0196 kWh / deň = 60,5886 kWh / mesačne,
- **spolu činná práca: 72,0502 kWh / mesačne,**
- motorový obvod - jalová práca: 30 dní x - 1,6166 kVArh / deň = - 48,4981 kVArh / mesačne,
- **spolu jalová práca: - 48,4981 kVArh / mesačne.**

Zo známych cien účtovaných za dodávku elektrickej energie podľa cenníkov dodávateľa je možné zostaviť predpokladanú štruktúru faktúry za odber elektrickej energie pre skúmané prípady. V tab. 8.1 až 8.3 je možné sledovať predpokladané náklady v prípade nemodernizovaného pohonu pred a po zavedení smart-meteringu ako aj modernizovaného pohonu za použitia frekvenčného meniča po zavedení smart-meteringu distribučnou spoločnosťou.



Tab.8.1 Štruktúra faktúry za združenú dodávku a distribúciu elektrickej energie - stav s pôvodným pohonom pred zavedením smart-meteringu.

položka	(kWh)	(€/kWh)	(€)
Cena za elektrinu odobratú v 1T	69,245163	0,0473	3,27529621
Spotrebná daň	69,245163	0,00132	0,091403615
Platba za straty pri distribúcii	69,245163	0,00553	0,382925751
Platba za systémové služby	69,245163	0,0068919	0,477230739
Platba za prevádzkovanie systému	69,245163	0,026988	1,868788459
Odvod do jadrového fondu	69,245163	0,00327	0,226431683
Variabilna zložka tarify za distribúciu	69,245163	0,025417	1,760004308
		<b>(A.faz)</b>	<b>(€/A/faza)</b>
Rezervovaná kapacita	75	0,2202	16,515
<b>spolu</b>			<b>24,60</b>
<b>DPH 20%</b>			<b>4,92</b>
<b>suma</b>			<b>29,52</b>

Tab.8.2 Štruktúra faktúry za združenú dodávku a distribúciu elektrickej energie - stav s pôvodným pohonom po zavedení smart-meteringu.

položka	(kWh)	(€/kWh)	(€)
Cena za elektrinu odobratú v 1T	69,245163	0,0473	3,27529621
Spotrebná daň	69,245163	0,00132	0,091403615
Platba za straty pri distribúcii	69,245163	0,00553	0,382925751
Platba za systémové služby	69,245163	0,0068919	0,477230739
Platba za prevádzkovanie systému	69,245163	0,026988	1,868788459
Odvod do jadrového fondu	69,245163	0,00327	0,226431683
Variabilna zložka tarify za distribúciu	69,245163	0,025417	1,760004308
Prirážka za nedodržanie účinníku 269.74% zo 101,284% podielu tarify za distribúciu elektriny bez strát vrátane prenosu elektriny pri sadzbe C2-X3			12,87000638
		<b>(A.faz)</b>	<b>(€/A/faza)</b>
Rezervovaná kapacita	75	0,2202	16,515
Prirážka za nedodržanie účinníku 269.74% z tarify za výkon			44,547561
<b>spolu</b>			<b>82,01</b>
<b>DPH 20%</b>			<b>16,40</b>
<b>suma</b>			<b>98,42</b>

Výpočet zmluvných pokút je založený na informáciách z cenníka za distribúciu elektrickej energie podľa tabuľky "Tarifné prirážky pre užívateľov distribučnej sústavy za nedodržanie predpísanej hodnoty účinníku v percentách z tarify za výkon a zo 101,284 % podielu tarify za distribúciu elektriny bez strát vrátane prenosu elektriny pri sadzbe C2-X3."



Tab.8.3 Štruktúra faktúry za združenú dodávku a distribúciu elektrickej energie - stav na rekonštruovanom pohone po zavedení smart-meteringu.

položka	(kWh)	(€/kWh)	(€)
Cena za elektrinu odobratú v 1T	72,050262	0,0473	3,407977393
Spotrebná daň	72,050262	0,00132	0,095106346
Platba za straty pri distribúcii	72,050262	0,00553	0,398437949
Platba za systémové služby	72,050262	0,0068919	0,496563201
Platba za prevádzkovanie systému	72,050262	0,026988	1,944492471
Odvod do jadrového fondu	72,050262	0,00327	0,235604357
Variabilna zložka tarify za distribúciu	72,050262	0,025417	1,831301509
	<b>(kVArh)</b>	<b>(€/kVArh)</b>	<b>(€)</b>
Jalová dodávka elektriny do sústavy	48,498114	0,0166	0,805068692
	<b>(A.faz)</b>	<b>(€/A/faza)</b>	<b>(€)</b>
Rezervovaná kapacita	48	0,2202	10,5696
<b>spolu</b>			<b>19,78</b>
<b>DPH 20%</b>			<b>3,96</b>
<b>suma</b>			<b>23,74</b>

Po zavedení smart-meteringu a modernizácii pohonu výtahu s použitím frekvenčného meniča je eliminovaná potreba reaktívneho výkonu a však sústava sa najmä v pohotovostnom režime javí ako kapacitná, čo má za následok dodávku reaktívneho výkonu späť do siete. Tento jalový výkon však už na rozdiel od odobraného jalového výkonu nie je pokutovaný tarifnou prirážkou z celkovej ceny za odobratú prácu, ale je spoplatnený sadzbou za každú dodanú kVAr-hodinu. Pri cene 0,0166 € za kVArh a dodanej jalovej práci 48,498 kVArh mesačne toto činí sumu 0,80 €, čo možno pokladať za zanedbateľné.

Vzhľadom na prijateľnejšie prúdové pomery pri rozbehu motora pohonu pomocou VVVF meniča voči rozbehu asynchrónneho motora priamym pripojením na sieť (záberový prúd je 5 až 7-násobkom menovitého) je možné znížiť hodnotu hlavného ističa výtahu z obvyklých 25A na 16A a tým ďalej redukovať prevádzkové náklady v položke paušálnych platieb za rezervovaný výkon (veľkosť hlavného ističa).

## Prínos práce a výstupy pre prax

Vzhľadom na skutočnosť, že v našej odbornej ani vedeckej literatúre nie je možné stretnúť sa s publikáciami, ktoré by sa monotematicky venovali problematike pohonov elektrických výťahov, napriek tomu, že tieto predstavujú nezanedbateľný podiel na inštalovanom výkone štátu, je možné túto prácu považovať za **komplexný pohľad na pohony trakčných lanových výťahov**. Rozšírenie predmetu záujmu o ostatné druhy pohonov výťahov, ako sú v súčasnosti synchronne stroje s permanentnými magnetmi a hydraulické pohony, dáva za vznik námetu na vydanie odbornej monografie venujúcej sa pohonom výťahov.

V prvej kapitole diela je uvedená podrobná **analýza stavu legislatívy**, ktorá sa vzťahuje na vyhradené technické zariadenia zdvíhacie skupiny "A/c - výťahy", vrátane uceleného prehľadu **súvisiacich technických noriem**. V období ostatných 5 rokov došlo k významným zmenám (bohužiaľ vplyvom EU k horšiemu) v oblasti noriem pre výťahy, ktoré pred tým boli len sporadicky novelizované. Uvádzame preto **podrobný výklad zmien týchto noriem**, ktorý bol použitý aj ako osnova pri školeniach odborných pracovníkov zdvíhacích zariadení.

Súčasťou uvedenej práce je aj **pochopiteľný popis a výklad fyzikálnych vlastností pohonnej sústavy výťahu**. Takýto popis je potrebný pre pochopenie pojednávanej problematiky. Simulácia vlastností asynchronného motora na základe aplikácie náhradnej schémy respektíve určenia hodnôt parametrov jej prvkov z merania nakrátko a naprázdno na reálnom stroji, predstavuje **návod** na prípravu podkladov pre teoretickú časť odborných prác venujúcich sa problematike elektrických pohonov nie len zdvíhacích zariadení. Prevedené merania na elektrických strojoch a elektronických meničov energie spolu s ich interpretáciou a následným vyhodnotením sú **referenciou** pre ďalšie obdobné práce.

Možné je tiež čerpať zo skúseností pri **aplikácii individuálnej statickej kondenzátorovej kompenzácie**, ktorá sa objavila v ostatnej dobe na výťahoch. Aj keď je použitie kompenzačných kondenzátorov ako súčasti výťahového zariadenia explicitne (z bezpečnostných dôvodov) vylúčené znením ustanovení technických noriem, je prípustné použitie kompenzačných jednotiek zapojených pred hlavným vypínačom výťahu tak, že nie sú jeho súčasťou. Ovládanie takýchto kondenzátorov je potrebné realizovať na základe veľkosti odoberaného prúdu, tak aby kompenzácia bola v činnosti len počas chodu pohonu a nevytvárala nežiadúcu dodávku jalového výkonu. **Efektívnosť použitia kompenzačných jednotiek** v porovnaní s aplikáciou VVVF meniča je však nanajvyšš sporná.

Za samostatnú entitu možno považovať aplikáciu takzvaných frekvenčných meničov, správne meničov napätia a frekvencie (VVVF), ktoré sú dnes vo veľkej miere nasadzované na pohony výťahov. Práca poskytuje usmernenie pre **použitie VVVF meničov v technickej praxi na výťahoch**, kde je nutné dbať na to aby meniče neboli "univerzálneho" typu, ale určené pre použitie na výťahoch kde sa vyskytujú špecifické prevádzkové stavy. Napríklad zapojenie stýkačov medzi výstup meniča a motor pohonu je bezpečnostná nevyhnutnosť a však prerušenie prúdového obvodu počas činnosti meniča môže spôsobiť poškodenie IGBT modulov nevhodne zvoleného, alebo nevhodne ovládaného VVVF meniča.

Vhodne zvolený VVVF menič z hľadiska typovej veľkosti, príslušenstva (káble, filtre, odporníky, snímače otáčok, ..) a inštalácie, sám o sebe ešte nie je zárukou úspechu. Každá pohonná sústava výťahu je jedinečná vzhľadom na svoje mechanické prevedenie (tolerancie, vôle, mazanie, skutočnú hmotnosť kabíny a závažia protiváhy) a preto vyžaduje individuálny prístup. Práca poukazuje aj na nevyhnutnosť nie len pre **prvotné nastavenie konfigurovateľných parametrov meniča**, ale aj na takzvané **odladenie parametrov**, najmä S-kriviek, ktoré je potrebné vykonať individuálne na každom pohone, k čomu dáva praktický návod. Z fyziologického hľadiska vhodnosti je jediná akceptovateľná možnosť doladiť nastavenia fyzickou prítomnosťou v kabíne počas činnosti pohonu.

Taktiež **správna voľba a výber komponentov** pri aplikácii VVVF meniča je nevyhnutná, rovnako ako dôsledné dodržanie pracovných postupov pri montáži a uvedení do prevádzky. Nevhodný postup návrhu, alebo realizácie môže rezultovať k následným nežiadúcim spätným vplyvom elektronických meničov na napájaciu sieť a okolie. Práca sa potýka aj s týmto problémom a zdôrazňuje praktické nevyhnutnosti tohoto aspektu v podobe odporúčania správneho prevedenia spojovacích vedení za použitia príslušných káblov, správneho prevedenia brzdoých odporníkov ako aj ďalších súčastí elektrickej inštalácie modernizovaného pohonu výťahu.

V neposlednom rade je tu **praktické meranie okamžitých energetických parametrov** na výťahoch ako aj **strednodobé meranie** počas vhodne zvoleného intervalu, ktorý je najmenej celistvým násobkom obvykle opakujúceho sa vzoru v správaní sa užívateľov. Práca nabáda na korektné získanie a spracovanie údajov, ich vyhodnotenie a názornú interpretáciu. Takto získané údaje je možné porovnávať po prepočte na relatívne hodnoty vzťahujúce sa na počet jazd respektíve časové obdobie (deň, mesiac, ..), čo vedie k **ekonomickej analýze**, ktorá je významným prvkom práce. Na podklade uvedených postupov bolo vypracovaných niekoľko analýz odberu elektrickej energie pohonov výťahov, ktoré boli úspešne použité v komerčnej oblasti.

## Záver

Táto dizertačná práca reaguje na požiadavky praxe a predstavuje ucelený pohľad na problematiku energetiky pohonov trakčných lanových výťahov s asynchrónnym motorom. V domácej, ako aj v zahraničnej odbornej literatúre nie je zatiaľ venovaná zvláštna pozornosť takýmto pohonom napriek tomu, že predstavujú nezanedbateľnú časť inštalovaného výkonu pohonov s asynchrónnym motorom v elektrizačnej sústave. Prvé dve kapitoly práce sa venujú prehľadu súvisiacej odbornej literatúry a stavu poznatkov vedy a techniky vo svete, vrátane podrobného popisu predmetových noriem. Práve aproximácia práva a ďalšia integrácia v rámci Európskeho spoločenstva má za následok pomerne rýchly vývoj v oblasti relevantných noriem a právnych predpisov. Tretia a štvrtá kapitola sú dedikované podrobnému popisu a matematickému modelu asynchrónneho motora a meniča napätia a frekvencie (VVVF), nakoľko toto sú hlavné súčasti skúmanej pohonnej sústavy. V piatej a šiestej kapitole je prevedená počítačová simulácia a optimalizácia. Siedma a ôsma kapitola je venovaná ako laboratórnym tak aj praktickým meraniam na reálnych pohonoch, ktorých analýza ekonomiky prevádzky je uvedená v deviatej kapitole.

Z výsledkov merania na asynchrónnom motore pohonu výťahu, ktorý je priamo pripojený na sieť možno usudzovať, že v súlade s teóriou a počítačovou simuláciou je odber jalového výkonu len málo závislý od zaťaženia stroja. Prevádzka takéhoto motora v prostredí premenlivého zaťaženia výťahu, kde len minimum jazd kabíny prebieha pri plnom obsadení, bez ďalších opatrení na elimináciu jalového odberu, javí sa ako značne neefektívna. V prípade nasadenia smart meteringu so štvor-kvadrantovým elektromerom sa stane prevádzka takéhoto výťahu aj značne neekonomická, pretože účinník nekompensovaného motora takéhoto pohonu nikdy nedosiahne požiadavku dodávateľa elektrickej energie na účinník  $\cos \phi$  lepší ako 0,95. Nedodržanie hodnoty dohodnutého účinníka má za následok pokutovanie odberateľa, ktoré ako bolo ukázané ľahko môže nadobudnúť prirážku až vo výške 250 % z ceny za odobratú činnú prácu. V zmysle platnej legislatívy Slovenskej republiky by u všetkých prevádzkovateľov distribučnej sústavy mali byť do roku 2020 inštalované inteligentné meracie systémy (smartmetre) v podobe 4-kvadrantných elektromerov na napäťovej hladine NN. Problém s ekonomickosťou prevádzky pôvodných pohonov výťahov je tak mimoriadne aktuálny.

Ako najvhodnejšiu alternatívu modernizácie asynchrónneho pohonu výťahu je možné s istotou označiť repasáciu pôvodného výťahového stroja (motor, spojka, prevodovka, kladka) a výmenu výťahového rozvádzača s reguláciou pomocou VVVF meniča. Meniče napätia a frekvencie s jednosmerným napäťovým medziobvodom, ktoré sú dnes najčastejšie používané pri modernizáciách pohonov výťahov, sú vybavené obvody optimalizácie účinníka (PFC - Power Factor Correction), ktoré v spojení s kapacitným charakterom napäťového medziobvodu meniča zaručujú, že v celom regulačnom rozsahu pohonu aj v prípade variujúceho zaťaženia bude účinník takejto sústavy blízky 1. Praktické merania, popísané v kapitole sedem a osem, tento predpoklad rovnako potvrdzujú. V prípade, že nie je možné vykonať modernizáciu výťahu v rozsahu, ktorého súčasťou je aj aplikácia VVVF meniča, je potrebné inštalovať aspoň statickú kompenzáciu. Takáto kompenzácia však musí byť vyhotovená v súlade s platnými normami a preto nesmie zasahovať do strojného zariadenia výťahu. Kompenzačná jednotka musí byť pripojená pred hlavným vypínačom. Jej ovládanie je nutné zabezpečiť sledovaním veľkosti, alebo charakteru odoberaného prúdu tak, aby bol kompenzačný kondenzátor pripojený len v čase, kedy je potrebný reaktívny výkon počas chodu motora pohonu. Dimenzovanie veľkosti kapacity musí sa riadiť veľkosťou skutočného napätia v mieste inštalácie a nikdy nesmie byť kapacitancia kondenzátora a indukancia motora v úplnej rovnosti, ktorá by predstavovala rezonančný obvod a teda nebezpečenstvo poškodenia prepätím pri rozkmitaní obvodu.

Praktické meranie tiež preukázalo, že aplikáciou VVVF meniča na pôvodný pohon je možné dosiahnuť aj nezanedbateľnú úsporu spotreby elektrickej energie v oblasti činnej odobratej práce, ktorá v závislosti od výkonu pohonu dosahuje hodnoty od 5 až do 20 %. Samozrejme je zásadné zlepšenie charakteru odberu pohonu výťahu, kde došlo k eliminácii celej reaktívnej zložky výkonu. Použitie VVVF meniča na pohone výťahu, okrem ekonomických úspor predstavuje aj zvýšenie komfortu jazdy (plynulý rozjazd a dojazd) a zvýšenie životnosti mechanických prvkov pohonnej sústavy (opotrebovanie spojky, brzdy, lán, kladky). Modernizácia asynchrónnych pohonov dnes všeobecne predstavuje signifikantnú možnosť zvýšiť efektívnosť prevádzky existujúcich pohonov, čo má nepochybne aj významný environmentálny prínos.

## Použitá literatúra

- [1] STN EN 81-1:1998+A3:2009 “Bezpečnostné pravidlá na konštrukciu a montáž výťahov. Časť 1: Elektrické výťahy”
- [2] STN EN 81-2:1998+A3:2009 “Bezpečnostné pravidlá na konštrukciu a montáž výťahov. Časť 2: Hydraulické výťahy”
- [3] STN EN 12016+A1:2012 “Elektromagnetická kompatibilita. Skupina noriem na výroby pre výťahy, pohyblivé schody a pohyblivé chodníky. Odolnosť”
- [4] STN EN 12015:2012 “Elektromagnetická kompatibilita. Súbor noriem na výroby pre výťahy, pohyblivé schody a pohyblivé chodníky. Vyžarovanie”
- [5] STN EN 81-20:2015 “Bezpečnostné pravidlá na konštrukciu a montáž výťahov. Výťahy na prepravu osôb a nákladov. Časť 20: Osobné výťahy a nákladné výťahy s prístupom osôb”
- [6] VDI 4707 Guideline, “Lifts Energy Efficiency,” 2008.
- [7] VDI 4707/2 “Lifts; Energy efficiency; Components”
- [8] E.D. Mitronikas, D.V. Spyropoulos, N.P. Papanikolaou, E.C. Tatakis, N. Spyropoulos, “Energy Saving during modern Lift operation”
- [9] J. Nipkow, “Electricity Consumption and Efficiency Potentials of Lifts,” Report of Swiss Agency for Efficient Energy Use (SAFE), HTW University of Applied Sciences, Zurich, 2005.
- [10] Jinping He, Chengxiong Mao, Jiming Lu, and Jiawei Yang, “Design and Implementation of an Energy Feedback Digital Device Used in Elevator”, IEEE vol. 58, 4636 – 4642
- [11] Boonyang Plangklang, Sittichai Kantawong, Sirichai Dangeam, Yuttana Kumsuwan, “Elevator Energy Regenerative Unit (EERU) for Energy Saving in a Permanent Magnet Motor Elevator System”, 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China
- [12] HRUŠKOVIČ, L. (2004). Elektrické stroje. Bratislava: Vydavateľstvo STU.
- [13] BAŠTA, J. a kol.: Měření na elektrických strojích, I. Všeobecná část, Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 1959
- [14] BAŠTA, J. a kol.: Měření na elektrických strojích, IV. Měření na indukčních strojích, Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 1962
- [15] Hüttner, .; Klug, L. (2011). Elektrické stroje. Bratislava: Vydavateľstvo STU.
- [16] Chvojka, M., Švimberský, J., Klimpl, B.: *Opravy výťahov*. TEPS, 1991, ISBN 80-7065-086-9
- [17] pracovníci VÚTZ Praha: Učební text pro montéry výtahů, š.p. TRANZA, 1990, Břeclav
- [18] BORBA, L.: Elektrické pohony a výkonová elektronika, Bratislava, STU 2012
- [19] Trětina M., Maksa, V.: Elektronika na výtazích, TEPS, 1990, ISBN 80-7065-067-2
- [20] L. Asvestopoulos and N. Spyropoulos , “Lifts Energy Consumption Study”, 18th ELEVCON, Luzern, Switzerland 2-4, June 2010.

- [21] V. Zarikas, N. Papanikolaou, M. Loupis, N. Spyropoulos, "Intelligent Decisions Modelling for energy Saving in Lifts: An Application for Kleeman Hellas elevators", *Energy and Power Engineering*, Vol. 5, No. 3, May 2013, pp. 236-244
- [22] S. Tominaga, I. Suga, I. Araki, H. Ikejima, M. Kusuma, and K. Kobayashi, "Development of energy-saving elevator using regenerated power storage system," *Jpn. Soc. Power Electron.*, vol. 27, no. 1, pp. 890–895, 2001, JSPE-27-5
- [23] Thanit Punprayoong and Boonyong Plangklang, "Energy saving elevators in the Building a case study: RMUTT", *Conference on Energy Network of Thailand 8. 2-4 May 2015*
- [24] Ashok B.Kulkarni, Hien Hguyen and E.W.Gaudet, "A Comparative Evaluation of line Regenerative and Non- Regenerative Vector Controlled Drives for AC Gearless Elevator" , *IEEE* 1431 – 1437
- [25] Masaki Nomura, Hiroyu Ikejima, Shigetaka Morita and Eiki Watanabe, "Regenerative Power Control For VVVF Motor Drive (Critical Braking Method Applied To The Elevator)", *IEEE* 97 – 105
- [26] STN EN 81-50:2015 *"Bezpečnostné pravidlá na konštrukciu a montáž výťahov. Kontroly a skúšky. Časť 50: Pravidlá na konštrukciu, výpočty, kontroly a skúšky súčastí výťahu"*
- [27] DEMERDASH, N.A. – BALDASSARI, P.: A Combined Finite Element-State Space Modeling Enviroment for Induction Motors in the ABC Frame of Reference: The Blocked-Rotor and Sinusoidally Energized Load Conditions, *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, Vol. 7, No. 4, December 1992.
- [28] PETROV, G. N. *Elektrické stroje 2 : Asynchronní stroje - synchronní stroje*. 1. vydání. Praha : Academia, 1982, 732 s.
- [29] HRABOVCOVÁ, V. – RAFAJDUS, P. – FRANKO, M. – HUDÁK, P.: *Meranie a modelovanie elektrických strojov*, EDIS-vydavateľstvo ŽU, Žilina 2004
- [30] VITTEK, J.: *Matlab pre elektrické pohony*, Žilina: Skriptá, KETE – EF Marec 1997
- [31] BAŠTA, Jan a Vitalij Michajlovič KUCEVALOV. *Elektrické stroje s plnými rotory: teorie a výpočet*. 1. vyd. Praha: Academia, 1980, 135 s.
- [32] JANÍČEK, F. - DARUĽA, I. - GADUŠ, J. - REGULA, E. - SMITKOVÁ, M. - POLONEC, Ľ. - LUDVÍK, J. - KUBICA, J. *Obnoviteľné zdroje energie 1 : Technológie pre udržateľnú budúcnosť*. Bratislava: Renesans, s.r.o., 2007. 171 s. ISBN 978-80-969777-0-3.
- [33] Leonhart, W. *Control of Electrical drives*, New York, 2001, ISBN 978-3-642-56649-3

## **Publikácie autora príbuzné k téme dizertačnej práce**

### **1. Comparison of concentrated and distributed winding in therm of the magnetic fields**

Chudiváni, Ján -- Kujan, Vladimír -- Uhrík, Milan -- Hüttner, Ľudovít

Comparison of concentrated and distributed winding in therm of the magnetic fields.

*Buletinul Institutului Politehnic din Iași: Sectia Electrotehnica, energetica, electronica*, s. 59--69.

### **2. Dynamic behavior of self-excited induction generator in Off-grid operation under resistive load**

Zuščak, Jozef -- Janiček, František -- Kujan, Vladimír -- Váry, Michal

Dynamic behavior of self-excited induction generator in Off-grid operation under resistive

load. In BELÁŇ, A. -- ELESCHOVÁ, Ž. *Power engineering 2018. Control of Power Systems 2018*. Bratislava: Slovak University of Technology, 2018, s. 89--94. ISBN 978-80-89983-00-1.

### **3. Energy saving possibilities of modern elevator drives**

Kujan, Vladimír -- Janiček, František -- Perný, Milan -- Packa, Juraj -- Valach, Marek

Energy saving possibilities of modern elevator drives. In CIRÁK, J. -- PERNÝ, M. --

FARKAS SMITKOVÁ, M. *Power engineering 2016. Renewable Energy Sources 2016*. Bratislava: Slovak University of Technology, 2016, s. 90--94. ISBN 978-80-89402-82-3.

### **4. História a spoločenský význam výkonovej elektroniky**

Kujan, Vladimír -- Perný, Milan

História a spoločenský význam výkonovej elektroniky. In PERNÝ, M. -- VAJDA, J.

*História, súčasnosť a budúcnosť elektrotechniky na Slovensku*. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2017, s. 121--132. ISBN 978-80-227-4730-1.

### **5. História a spoločenský význam výkonovej elektroniky**

Kujan, Vladimír -- Perný, Milan

História a spoločenský význam výkonovej elektroniky. In PERNÝ, M. -- SZABOVÁ, M.

*Elektroenergetika - Budúcnosť 21. storočia*. Bratislava: Vydavateľstvo Spektrum STU, 2018, s. 35--46. ISBN 978-80-227-4836-0.

### **6. História, súčasnosť a budúcnosť výkonovej elektroniky**

Kujan, Vladimír -- Perný, Milan

História, súčasnosť a budúcnosť výkonovej elektroniky. *ATP Journal*, 24. s. 49--53.

### **7. Issues of electromagnetic design of synchronous brushless motor with concentrated winding**

Chudiváni, Ján -- Kujan, Vladimír -- Perný, Milan -- Hüttner, Ľudovít -- Fric, Róbert -- Šály, Vladimír

Issues of electromagnetic design of synchronous brushless motor with concentrated winding.

*Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 62. s. 24--29. ISSN 1582-5175.

## **8. Meniče napätia a frekvencie pre napájanie synchrónnych motorov s permanentnými magnetmi**

Chudiváni, Ján -- Kujan, Vladimír -- Hüttner, Ludovít -- Cerman, Anton

Meniče napätia a frekvencie pre napájanie synchrónnych motorov s permanentnými magnetmi. *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie: Zborník ku konferencii s medzinárodnou účasťou Elektrotechnika, Informatika a Telekomunikácie ELOSYS 2014 elektronický zdroj*, 170. s. 170--173.

## **9. Možnosti energetických úspor dosiahnutých modernizáciou zdvíhacích zariadení a vplyv na elektrickú sieť**

Kujan, Vladimír -- Janíček, František -- Perný, Milan -- Šály, Vladimír

Možnosti energetických úspor dosiahnutých modernizáciou zdvíhacích zariadení a vplyv na elektrickú sieť. *Magazín stroje a mechanizácia*, 11. s. 32--33.

## **10. Možnosti zlepšenia energetických vlastností výťahov**

Kujan, Vladimír -- Janíček, František -- Perný, Milan -- Šály, Vladimír

Možnosti zlepšenia energetických vlastností výťahov. *Energetika* :, 66. s. 412--415.

## **11. Možnosti zlepšenia účinníka odľahčeného asynchrónneho motora**

Borba, Ladislav -- Kujan, Vladimír

Možnosti zlepšenia účinníka odľahčeného asynchrónneho motora. In *SYMEP 2006. 21. mezinárodní symposium učitelů elektrických pohonů: Plzeň, ČR, 13.-15.6.2006*. Plzeň,: 2006.

## **12. Radio frequency interference issues of modernized elevator induction motor drives**

Kujan, Vladimír -- Janíček, František

Radio frequency interference issues of modernized elevator induction motor drives. In CIRÁK, J. -- PERNÝ, M. -- FARKAS SMITKOVÁ, M. *Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014: Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 101--103. ISBN 978-80-89402-73-1.

## **13. Simulations and measurements on a self-excited induction generator**

Zuščak, Jozef -- Kujan, Vladimír -- Janíček, František

Simulations and measurements on a self-excited induction generator. *Journal of Electrical Engineering*, 69. s. 359--365.

## **14. Use of induction generators at wind power plants**

Chudiváni, Ján -- Kujan, Vladimír -- Hüttner, Ludovít -- Janíček, František

Use of induction generators at wind power plants. In CIRÁK, J. -- PERNÝ, M. -- FARKAS SMITKOVÁ, M. *Power Engineering 2014. Renewable Energy Sources 2014: Proceedings of 5th International scientific conference OZE 2014. Tatranské Matliare, Slovakia, May 20-22, 2014*. 1. vyd. Bratislava : Slovak University of Technology in Bratislava, 2014, s. 231--236. ISBN 978-80-89402-73-1.

## **15. Zlepšenie účinníka naprázdno pracujúceho asynchrónneho motora**

Hüttner, Ludovít -- Kujan, Vladimír

Zlepšenie účinníka naprázdno pracujúceho asynchrónneho motora. *EE časopis pre elektrotechniku, elektroenergetiku, informačné a komunikačné technológie*, 19. s. 36--38.