

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Speciální klece asynchronních motorů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vojtěch JOHN**  
Osobní číslo: **E11B0029P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Speciální klece asynchronních motorů**  
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 :

Předmětem bakalářské práce je porovnání jednotlivých konstrukcí rotoru asynchronního motoru s klecí nakrátko. Nejprve budou obecně popsány jednotlivé druhy klecí nakrátko (vírová, dvojité, odporová, atd.) včetně náhradních schémat, jejich momentových charakteristik a konstrukce.

1. Uveďte vlastnosti a charakteristiky typické pro asynchronní stroje s klecí nakrátko.
2. Uveďte výhody a nevýhody těchto strojů a oblast jejich vhodného použití.
3. Vyhledejte nejčastěji používané provedení klecí nakrátko, popište konstrukční uspořádání rotorů, použité materiály a příslušné charakteristiky strojů.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran  
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:

1. Bašta, J., Chládek, J., Mayer, I.: Teorie elektrických strojů, 1968.
2. Kopylov, I. P.: Stavba elektrický strojů, 1988.
3. Veřejně dostupné informační zdroje, databáze [www.ieee.org](http://www.ieee.org)

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá rozdíly mezi různými druhy klecí asynchronních strojů s kotvou nakrátko. Nejprve je zde probrán základní princip asynchronního stroje. Dále princip, konstrukce, náhradní schémata zapojení a charakteristiky speciálních klecí nakrátko. A nakonec byly vytvořeny charakteristiky pro porovnání různých tvarů drážek a také různých hloubek drážek těchto klecí asynchronního stroje nakrátko.

## **Klíčová slova**

Asynchronní motor, kotva nakrátko, konstrukce, princip, náhradní schéma, momentová charakteristika, maximální moment, záběrný moment

**Abstract**

This bachelor thesis describes the differences between different types of cages of induction machines with a squirrel cage. The basic principle of induction machines are explained at first. Secondly, there is a detailed explanation of the principle, construction, spare wiring diagrams and characteristics of special squirrel cages. And finally, the characteristics comparing different shapes of grooves and depths of these cages of induction machines with squirrel cage have been created.

**Key words**

Induction motor, squirrel cage, construction, principle, spare wiring diagram, torque characteristics, maximum torque, breakaway torque

## **Prohlášení**

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 12.6.2015

Vojtěch John

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu práce, panu doktoru Vladimíru Kindlovi, za cenné rady a čas, který mi věnoval při konzultacích. Děkuji

# Obsah

<b>OBSAH .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>9</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>11</b>
<b>1 ASYNCHRONNÍ STROJE.....</b>	<b>12</b>
1.1 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ ASYNCHRONNÍCH STROJŮ .....	12
1.1.1 Statory asynchronních strojů .....	12
1.1.2 Rotory asynchronních strojů.....	12
1.2 PRINCIP FUNKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU S KOTVOU NAKRÁTKO.....	13
1.3 NÁHRADNÍ SCHÉMA ASYNCHRONNÍHO MOTORU S KOTVOU NAKRÁTKO .....	14
1.4 CHARAKTERISTIKY ASYNCHRONNÍHO STROJE S KOTVOU NAKRÁTKO.....	16
<b>2 SPECIÁLNÍ KLECE ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....</b>	<b>19</b>
2.1 OBECNĚ O SPECIÁLNÍCH KLECÍCH ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ .....	19
2.2 VÍROVÁ KLEC .....	19
2.2.1 Konstrukce .....	19
2.2.2 Princip .....	20
2.2.3 Náhradní schéma .....	21
2.2.4 Charakteristiky.....	22
2.3 DVOJITÁ KLEC .....	24
2.3.1 Konstrukce .....	24
2.3.2 Princip .....	25
2.3.3 Náhradní schéma .....	26
2.3.4 Charakteristiky.....	27
<b>3 CHARAKTERISTIKY PRO POROVNÁNÍ.....</b>	<b>31</b>
3.1 VÍROVÁ KLEC .....	31
3.1.1 Porovnávání tvarů drážek.....	31
3.1.2 Porovnávání hloubek drážek.....	33
3.2 DVOJITÁ KLEC .....	35
3.2.1 Porovnávání tvarů drážek.....	35
<b>4 ZÁVĚR .....</b>	<b>38</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratk

$M$ .....	Elektromagnetický točivý moment [Nm]
$M_{\max...n}$ .....	Maximální elektromagnetický točivý moment normální kotvy [Nm]
$M_{\max...v}$ .....	Maximální elektromagnetický točivý moment vírové kotvy [Nm]
$M_{\max...d}$ .....	Maximální elektromagnetický točivý moment dvojitě kotvy [Nm]
$M_{záb...n}$ .....	Záběrný elektromagnetický točivý moment normální kotvy [Nm]
$M_{záb...v}$ .....	Záběrný elektromagnetický točivý moment vírové kotvy [Nm]
$M_{záb...d}$ .....	Záběrný elektromagnetický točivý moment dvojitě kotvy [Nm]
$\Phi$ .....	Magnetický indukční tok [Wb]
$\Phi_h$ .....	Hlavní magnetický indukční tok [Wb]
$\Phi_r$ .....	Magnetický indukční tok rozběhové tyče [Wb]
$\Phi_b$ .....	Magnetický indukční tok běhové tyče [Wb]
$\Phi_{rb}$ .....	Společný magnetický indukční tok rozběhové a běhové tyče [Wb]
$J$ .....	Proudová hustota [ $A/m^2$ ]
$d$ .....	Hloubka drážky [mm]
$\cos \varphi_2$ .....	Fázový úhel mezi $\bar{U}_2$ a $\bar{I}_2$ [-]
$\sin \beta$ .....	Prostorový úhel mezi $\Phi$ a $\bar{I}_2$ [-]
$n$ .....	Okamžité otáčky asynchronního stroje [ $min^{-1}$ ]
$n_s$ .....	Synchronních otáčky asynchronního stroje [ $min^{-1}$ ]
$n_n$ .....	Jmenovité otáčky asynchronního stroje [ $min^{-1}$ ]
$f_1, f_2$ .....	Frekvence statoru a kotvy [Hz],
$p$ .....	Počet pólů stroje [-]
$s$ .....	Skluz [%],
$\bar{U}_1, \bar{U}_2$ .....	Napětí statoru a kotvy [V]
$\bar{I}_0, \bar{I}_1, \bar{I}_2$ .....	Proud naprázdno, proud statoru a proud kotvy přepočítaný na stator [A]
$\bar{Z}_0, \bar{Z}_1, \bar{Z}'_2$ .....	Impedance příčné větve, impedance statoru a impedance stojící kotvy přepočítaná na stator [ $\Omega$ ]
$R'_2$ .....	Odpor vinutí kotvy přepočítaný na stator [ $\Omega$ ]

$jX'_{2\sigma}$ .....	Rozptylová reaktance vinutí kotvy přepočítaná na stator [ $\Omega$ ]
$R'_{2k}$ .....	Odpor kruhů nakrátko a vinutí kotvy vně drážek [ $\Omega$ ]
$jX'_{2\sigma k}$ .....	Rozptylová reaktance kruhů nakrátko a vinutí kotvy vně drážek [ $\Omega$ ]
$R'_{2i}(s)$ .....	Odpor vinutí kotvy uvnitř drážek závislý na skluzu [ $\Omega$ ]
$jX'_{2\sigma}(s)$ .....	Rozptylová reaktance vinutí kotvy uvnitř drážek závislá na skluzu [ $\Omega$ ]
$R'_{2r}$ .....	Odpor rozběhové tyče kotvy [ $\Omega$ ]
$jX'_{2\sigma r}$ .....	Rozptylová reaktance rozběhové tyče kotvy [ $\Omega$ ]
$R'_{2b}$ .....	Odpor běhové tyče kotvy [ $\Omega$ ]
$jX'_{2\sigma b}$ .....	Rozptylová reaktance běhové tyče kotvy [ $\Omega$ ]
$jX'_{2\sigma b}$ .....	Společná rozptylová reaktance rozběhové a běhové tyče kotvy [ $\Omega$ ]

## Úvod

Asynchronní stroje jsou nejstarší elektrické střídavé točivé stroje, vynalezené před více než 125 lety. Díky jejich jednoduché konstrukci jsou levné a nevyžadují složitou údržbu. Proto jsou také velice oblíbené a hodně rozšířené. Dají se používat ve dvou základních režimech a to jako motor nebo generátor.

U asynchronních strojů nás velice zajímá momentová, výkonová a také proudová charakteristika. Z momentové charakteristiky dokážeme zjistit hned několik důležitých informací. Asi nejdůležitější z nich je záběrný moment, ten nám určuje, jak nejvíce lze stroj zatížit při rozběhu, aby se nám roztočil. Další zajímavý bod na momentové charakteristice je maximální moment. Jak už název napovídá, určuje, nakolik můžeme maximálně zatížit stroj při normálním běhu.

Pokud bychom chtěli měnit tvar momentové charakteristiky, tak to lze udělat několika způsoby. První možnost je, že stroj budeme rozebíhat pomocí externího zařízení. Což není vždy úplně jednoduché a celá tato skupina zařízení by se pak mohla stát daleko poruchovější, než je tomu u samotného stroje, který je díky své jednoduché konstrukci velice spolehlivý.

Druhý způsob je takový, že momentová charakteristika stroje může být upravena, tak aby nám co nejlépe vyhovovala a to přímo při samotné výrobě. Dělá se to tak, že se upravuje tvar drážek rotoru asynchronního stroje. Máme dvě základní dělení těchto drážek a to na vírové a dvojité drážky.

Tyto drážky nám napomáhají zvětšit záběrný moment a zároveň snížit záběrný proud, tak abychom nepotřebovali žádné externí zařízení. Základ je u obou typů drážek v podstatě stejný, fungují na principu skin efektu, tedy vytlačování proudu k povrchu drážky a tím uměle zvyšují odpor kotvy. A tímto se v této bakalářské práci budeme zabývat.

# 1 Asynchronní stroje

## 1.1 Konstrukční provedení asynchronních strojů

Skládají se ze dvou základních částí. Statoru, který je nepohyblivý a je v něm navinuto statorové vinutí, většinou třífázové. A z pohyblivého rotoru neboli, jak se u asynchronních strojů častěji používá, kotvy.

Rotor je uložený uvnitř statoru a uchycený za hřídel pomocí ložiskových štítů vně stroje. Ložiskové štíty jsou na pevně spojeny s konstrukcí okolo statoru. Jelikož asynchronní stroje nemají vyniklé póly, tak mají hladké rotory a díky tomu také velmi malou vzduchovou mezeru mezi státorem a rotorem.

### 1.1.1 Statory asynchronních strojů

Statory jsou u většiny typů asynchronních strojů konstrukčně podobné nebo dokonce stejné. Jsou poskládány z izolovaných plechů, tyto plechy bývají nalisované v hlavní konstrukci, která je většinou z litiny. Na vnitřním průměru statoru je v drážkách navinuté statorové vinutí, které je vyvedeno na svorkovnici. Toto vinutí je nejčastěji navinuto tak, že jsou fáze od sebe prostorově posunuty o  $120^\circ$ , pokud by se jednalo o stroj více pólový, pak se úhel dělí počtem pólů. [1; 3;4]

### 1.1.2 Rotory asynchronních strojů

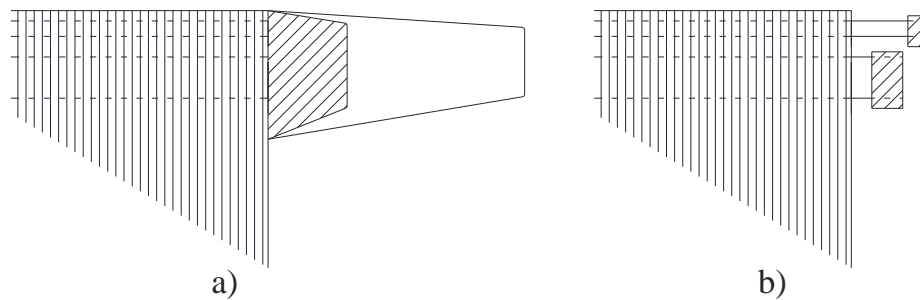
Rozlišujeme dva základní druhy asynchronních strojů. První jsou stroje tzv. kroužkové, stroje s vinutým rotorem. Jejichž rotorové vinutí, které je navinuto v drážkách, je vyvedeno na kroužky a přes kartáče, které na tyto kroužky dosedají, je vyvedeno až ven z motoru. Toho se využívá obzvláště při rozběhu, kdy se na kroužky dají připojit rozběhové tlumivky nebo odpory. [1, s. 376]

Druhé jsou stroje s kotvou nakrátko. Tyto stroje nemají vinuté rotory, ale mají je většinou odlévané anebo sestavené z tyčí a svařené nebo spájené. Další odlišností tohoto typu vinutí je to, že nebývá izolované. Tento typ rotoru je velmi jednoduché vyrobit a je nejméně náročný na údržbu. Jeho kotvy sestává z plechů, které je možné dnes vyrobit několika technologiemi, např.: lisováním, vyřezáváním vodním paprskem a další. Plechy se pečlivě poskládají na sebe a poté se do nich buďto odlijí anebo zastrčí tyče, které pak tvoří tzv. „klec“. [3, s. 57]

Pokud se kotva odlévá, odlévají se zároveň i kruhy nakrátko (obr. 1.1 a)), které přiléhají k plechům v čelech kotvy. Kruhy nakrátko plní hned několik funkcí, jejich hlavní funkcí je

spojovat tyče do zkratu. Dále drží rotorový svazek pohromadě a díky lopatkám, které se při odlévání také dají vytvořit, při otáčení nutí proudit vzduch a ten ochlazuje kotvu. [3, s. 58]

Pokud máme kotvu, která není odlévána ale je poskládaná z tyčí, tak se do připravených plechů vsunou tyče, na ně se přiloží zkratovací kruhy, které se k nim následně připájí nebo přivaří. Tyto kruhy většinou nedoléhají přímo na kotvu (obr. 1.1 b)). [3, s. 58]



**Obr. 1.1 – Kruhy nakrátko a) odlévané a b) pájené kotvy [3, s. 58]**

## 1.2 Princip funkce asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Statorové vinutí je připojeno k síti a díky střídavému proudu, který jím protéká, se uvnitř statoru vytváří magnetické točivé pole. Jelikož kotva zatím stojí, tak se v ní indukují napětí s frekvencí sítě (většinou 50Hz). [1, s. 377-380]

Díky tomu, že máme kotvu nakrátko, indukované napětí začne vytvářet proud. Pole statoru a proud kotvy na sebe působí, tzn., vznikne točivý moment. Tento moment vznikne poskládáním pulzujících momentů, které vytváří každá fáze a má stejný směr točení jako točivé magnetické pole statoru. [1, s. 380]

Elektromagnetický moment je úměrný několika proměnným:

$$M \approx \Phi \bar{I}_2 \cos \varphi_2 \sin \beta, \quad (1.1)$$

kde

$M$  elektromagnetický točivý moment [Nm],

$\Phi$  magnetický indukční tok [Wb],

$\bar{I}_2$  proud kotvy [A],

$\cos \varphi_2$  fázový úhel mezi  $\bar{U}_2$  a  $\bar{I}_2$  [-],

$\sin \beta$  prostorový úhel mezi  $\Phi$  a  $\bar{I}_2$  [-].

Tím, že se kotva začne pohybovat, se sníží rychlost pole statoru vůči rychlosti kotvy. Tím se zmenší frekvence indukovaného napětí. Teoreticky by to tak mohlo pokračovat až do synchronních otáček stroje  $n_s$ . [1, s. 380;4]

Vztah pro výpočet synchronní rychlosti:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (1.2)$$

kde

$n_s$  synchronních otáčky asynchronního stroje [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $f_1$  frekvence statorového napájecího napětí [Hz],  
 $p$  počet pólů stroje [-].

Při synchronních otáčkách by se ale přestaly v kotvě indukovat napětí a zanikly by proudy kotvy a točivý moment. Kvůli tření a dalším ztrátám se musí kotva točit pomaleji než pole statoru, aby se tyto ztráty pokryly. Tento stav se nazývá chod na prázdno. Pokud by byl stroj nějakým způsobem zatížen tak se jeho rychlost sníží na jmenovité otáčky  $n_n$ . Rozdíl rychlosti kotvy a rychlosti pole statoru nejlépe vystihuje skluz  $s$ . Je to podíl rozdílu synchronních otáček  $n_s$  s okamžitými otáčkami rotoru  $n$  a synchronních otáček  $n_s$ .

[1, s. 380;4]

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100, \quad (1.3)$$

kde

$s$  skluz [%],  
 $n_s$  synchronních otáčky asynchronního stroje [ $\text{min}^{-1}$ ],  
 $n$  okamžité otáčky kotvy asynchronního stroje [ $\text{min}^{-1}$ ].

Jelikož má ale klec kotvy malý odpor, není možnost jak omezit rozběhové proudy a zvětšit záběrný moment motoru, jako je to možné u kotvy kroužkové přidáním odporových kaskád. Pro změnu kdybychom měli kotvu s velkým odporem, tak bychom měli sice lepší podmínky pro rozběh stroje, ale ne pak při normálním běhu, kde by nám tento odpor zvětšoval ztráty a skluz. Tento problém řeší speciální klece nakrátko.

### 1.3 Náhradní schéma asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Pro popis asynchronního stroje je důležité také jeho náhradní schéma. Když vyjdeme z rovnic pro asynchronní stroj (1.4), (1.5), (1.6) pak má náhradní schéma následující tvar, viz obr. 1.2. [2, s. 181]

$$\bar{U}_1 = \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 + \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_0, \quad (1.4)$$

$$\bar{U}_2 = 0 = \bar{Z}'_2 \cdot \bar{I}'_2 + \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_0, \quad (1.5)$$

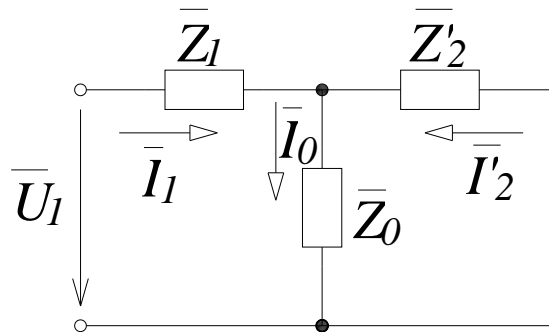
$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 + \bar{I}'_2, \quad (1.6)$$

kde

$\bar{U}_1, \bar{U}_2$  napětí statoru a kotvy [V],

$\bar{Z}_0, \bar{Z}_1, \bar{Z}'_2$  impedance příčné větve, impedance statoru a impedance stojící kotvy přepočítaná na stator [ $\Omega$ ],

$\bar{I}_0, \bar{I}_1, \bar{I}'_2$  proud naprázdno, proud statoru a proud kotvy přepočítaný na stator [A].



**Obr. 1.2 – Náhradní schéma AM [2, s. 181]**

Impedance  $\bar{Z}_0, \bar{Z}_1, \bar{Z}'_2$  se dají rozložit na odpor a reaktanci, jako příklad si rozložíme  $\bar{Z}'_2$ :

$$\bar{Z}'_2 = \frac{R'_2}{s} + jX'_{2\sigma} = R'_2 + jX'_{2\sigma} + R'_2 \frac{1-s}{s}, \quad (1.7)$$

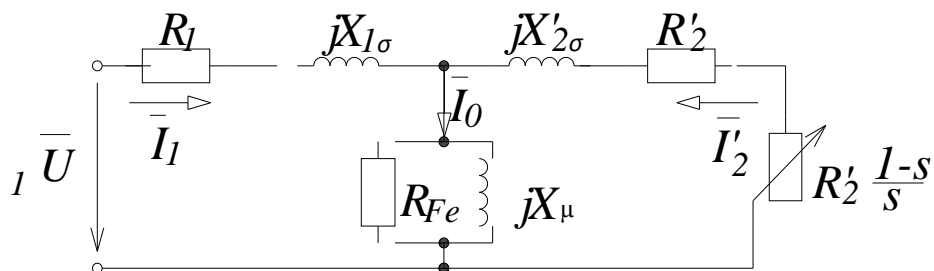
kde

$R'_2$  odpor vinutí kotvy přepočítaný na stator [ $\Omega$ ],

$jX'_{2\sigma}$  rozptylová reaktance vinutí kotvy přepočítaná na stator [ $\Omega$ ],

$R'_2 \frac{1-s}{s}$  proměnný odpor reprezentující mechanický výkon kotvy [ $\Omega$ ].

Pak se nám náhradní schéma změní následovně, viz obr. 1.3.

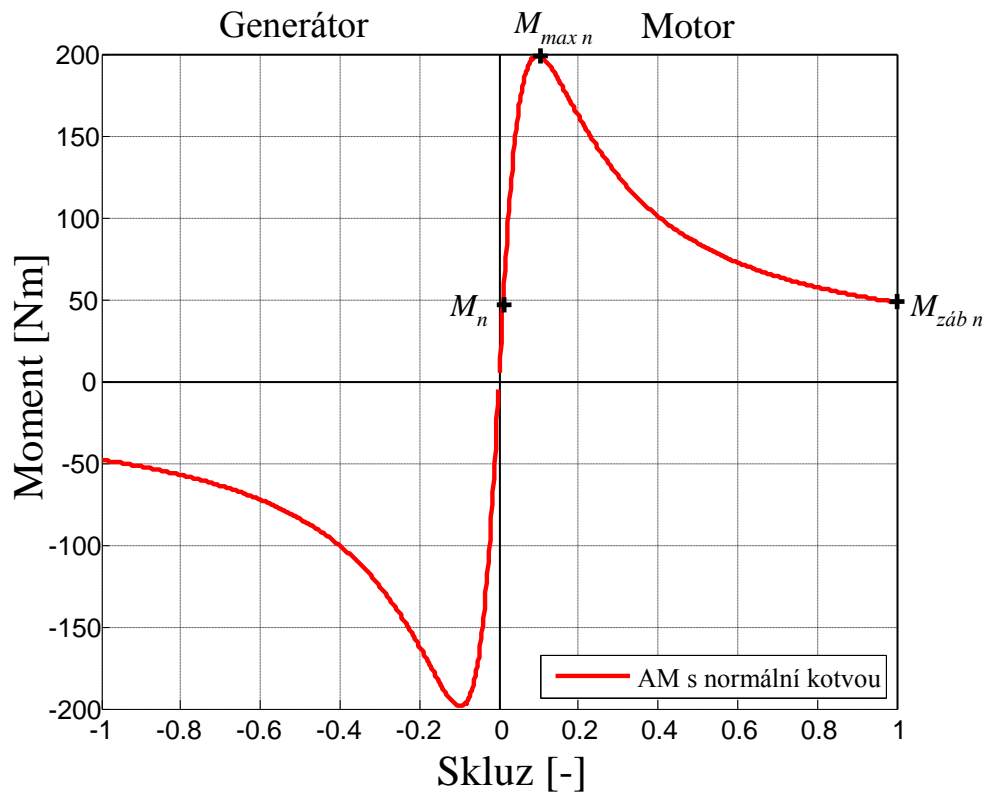


**Obr. 1.3 – Náhradní schéma AM s rozloženými impedancemi [2, s. 182]**

Toto je výchozí náhradní schéma ve tvaru T-článku asynchronního stroje, v dalším textu bude vidět, jak se mění v závislosti na tom, jakou klec nakrátko použijeme.

#### 1.4 Charakteristiky asynchronního stroje s kotvou nakrátko

Momentová charakteristika asynchronního stroje udává závislost momentu na skluzu nebo závislost momentu na otáčkách. Závislost momentu na skluzu vidíme na obr. 1.4.



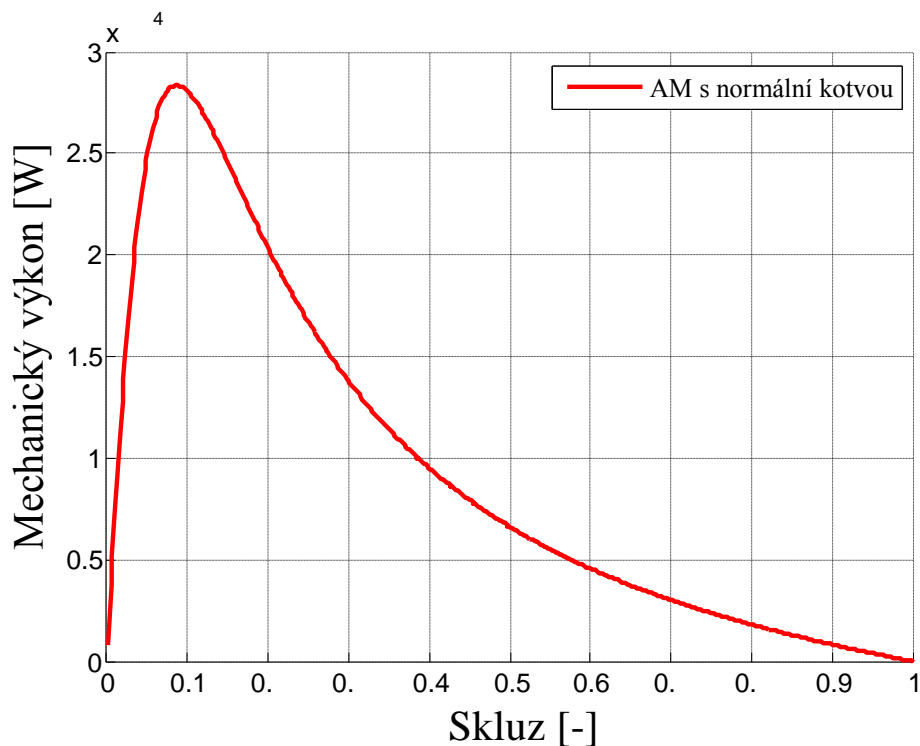
Obr. 1.4 - Momentová charakteristika asynchronního stroje s kotvou nakrátko

Asynchronní stroj v režimu motor obvykle pracuje v okolí jmenovitého momentu  $M_n$ , ale je možné ho zatížit až k maximálnímu momentu  $M_{max}$ . Kdybychom tento moment překročili, tak by se nám stroj zastavil. Naopak, pokud bychom stroj roztočili na otáčky větší než synchronní neboli až za skluz 0, stal by se z motoru generátor a dodával by činný výkon do zdroje. Jalový výkon dodávat nedokáže, protože se musí stále magnetovat.

Problém, který vidíme na momentové charakteristice obr. 1.4 je ten, že máme malý záběrný moment  $M_{záb n}$ . Kdybychom chtěli motor rozbíhat už zatížený, tak by zátěžný moment nesměl překročit  $M_{záb n}$ , jinak by se nám stroj nerozeběhl. Tento problém se podařilo vyřešit s kotvou kroužkovou přidáním rozběhových tlumivek anebo u stroje s kotvou nakrátko speciálními klecemi nakrátko.

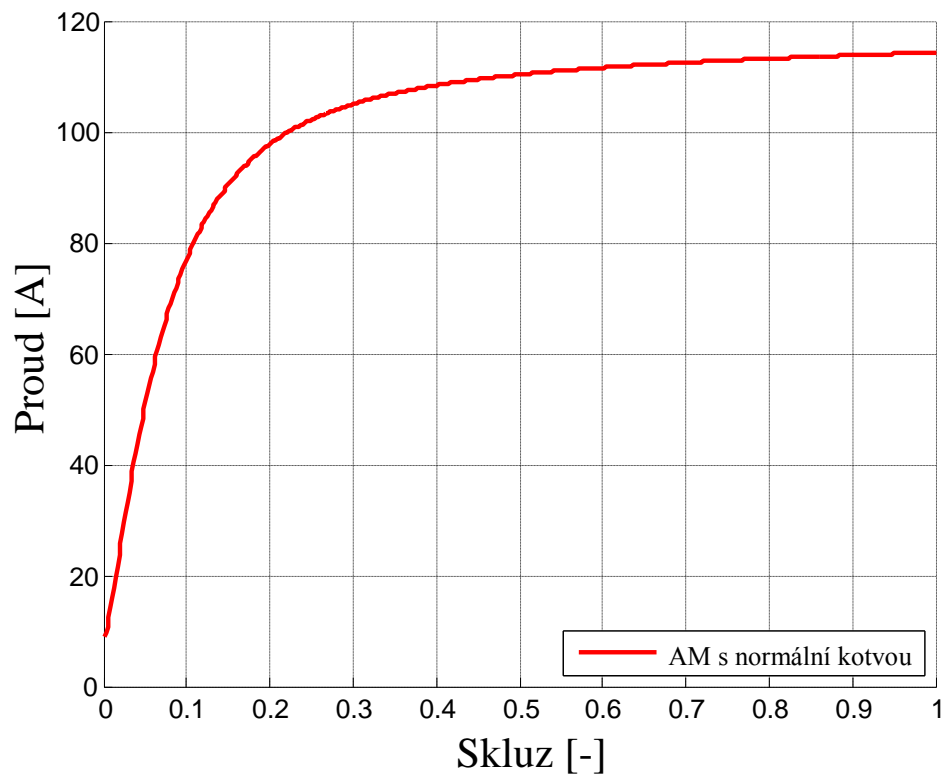


Na další charakteristice obr. 1.5 vidíme, jak se nám mění mechanický výkon  $P_2$  v závislosti na skluzu. Též vidíme, že při  $s = 1$  je výkon nulový a stejně tak při  $s = 0$ . Při  $s = 1$  je to způsobeno tím, že motor se neotáčí a tudíž musí mít nulový výkon. Jak se začne motor roztáčet tak ze začátku nám výkon pouze pomalu roste, při  $s = 0,5$  tedy při polovičních otáčkách není výkon ještě ani ve čtvrtině svého maxima. Dále se pak výkon začne zvyšovat rychleji až do svého maxima, které je při stejném skluzu jako  $M_{max}$ . V další oblasti to sice může vypadat, že nám výkon rychle klesá, ale v této oblasti motor používáme, protože při zatížení se motor sice zpomalí, ale rychle naroste výkon.



Obr. 1.5 – Výkonová charakteristika asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Na poslední charakteristice obr. 1.6 vidíme závislost proudu  $I_l$  na skluzu. Je zde vidět, že při vysokých skluzech je proud hodně veliký, může dosahovat 9 násobku jmenovitého proudu. Proto by bylo používání motoru při těchto skluzech velice neekonomické, ale hlavně by se nám motor začal velice rychle přehřívat a mohlo by dojít až k havárii.



Obr. 1.6 – Proudová charakteristika asynchronního stroje s kotvou nakrátko

## 2 Speciální klece asynchronních motorů

### 2.1 Obecně o speciálních klecích asynchronních motorů

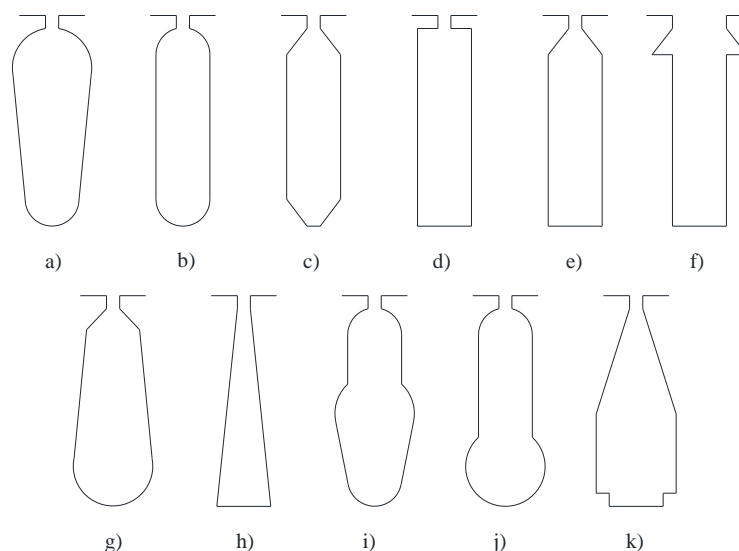
Jak už jsem uvedl výše, při rozběhu asynchronních motorů máme problém s malým odporem klece kotvy a omezením záběrného proudu. Zároveň máme malý záběrný moment. Tento problém se povedlo vyřešit speciálními klecemi asynchronních motorů. V zásadě fungují všechny na principu skinefektu, kdy se proud kotvy vytlačuje k povrchu vodiče. Čímž se uměle zvýší odpor kotvy, sníží záběrný proud a zvětší záběrný moment. [1, s. 410]

Speciální klece mají různé tvary tyčí jak je vidět na obr. 2.1 a obr. 2.8. Tyto tvary závisí na výkonu motoru a na tom jaké chceme mít momentové charakteristiky. [3, s. 58]

### 2.2 Vírová klec

#### 2.2.1 Konstrukce

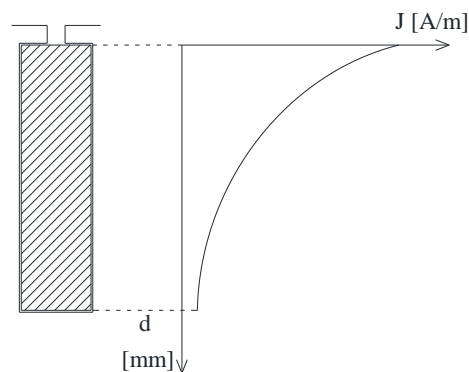
Vírová klec má úzké a hluboké drážky, ale i přesto existuje spousta různých tvarů těchto drážek, jak je vidět na obr. 2.1. Drážky typu V obr. 2.1 a) jsou pro menší výkony přibližně kolem 60kW a vyrábí se metodou odlévání. Drážky, které jsou na obrázcích obr. 2.1 b), c), d), e), jsou drážky s rovnoběžnými stěnami a ty se vyrábějí jak metodou odlévání, tak metodou pájení. Pokud se vyrábí metodou pájení, musí se tyče vyrobit z pásů, které mají tvar drážky. Drážky jako jsou na obr. 2.1 f) se používají pro vícepólové motory. Pokud chceme vyšší výkony, tak potřebujeme drážky zvláštního tvaru obr. 2.1 g), h), i), j), k), které jsou schopny vytvořit potřebný záběrný moment. [3, s. 58-59]



**Obr. 2.1 - Různé tvary drážek vírové klece [3, s. 59]**

### 2.2.2 Princip

Při rozběhu asynchronního motoru se frekvence  $f_2$  v kotvě rovná přibližně frekvenci  $f_1$ , která je do statoru přivedena ze sítě (většinou 50Hz). Tato frekvence je dost velká, aby v tyčích rotoru, které jsou dobře elektricky vodivé, vytvořila vířivé proudy. Tyto proudy ale naruší rozložení proudové hustoty v tyčích, viz obr. 2.2. Proud je vytlačován k povrchu rotoru, tedy k vzduchové mezeře. Tento jev se nazývá skin efekt. Jelikož největší část proudu protéká jen částí tyče, tak se odpor tyče zvětšuje. Zatímco vliv nerovnoměrného rozložení proudové hustoty na reaktanci je opačný, ta se zmenší. [1, s. 414; 2, s. 233-234]



**Obr. 2.2 – Rozložení proudové hustoty obdélníkové tyče při rozběhu [2, s. 234]**

Tímto se zvyšuje odpor kotvy, bez toho abychom potřebovali kotvu kroužkovou, na kterou bychom mohli připojit rozběhové odporové kaskády. Také se nám podařilo zvětšit záběrný moment a zmenšit rozběhové proudy. Díky tomu, že se rotor začne roztáčet, tak se rychlost pole statoru vůči rychlosti rotoru zmenšuje a tím se snižuje i rotorová frekvence  $f_2$ .

[2, s. 234]

A to podle této závislosti:

$$f_2 = s \cdot f_1, \quad (2.1)$$

Sníží se vířivé proudy a rozložení proudové hustoty se také zlepšuje, až je nakonec při jmenovitých otáčkách, kdy je skluz malý, téměř rovnoměrné. Čímž se nám zmenší i odpor tyčí. Mohlo by se zdát, že se díky zmenšení odporu opět zvýší proud, ale díky tomu, že se stroj točí naprázdno nebo otáčkami, které jsou jmenovité, tak se nám zmenší indukované napětí a tím i proudy v kotvě. Sice se sníží i frekvence kotvy  $f_2$ , ale i přesto se zvýší rozptylová reaktance a proud při běhu naprázdno má téměř induktivní charakter.

### 2.2.3 Náhradní schéma

Jelikož se nám vířivé proudy uzavírají hlavně v těch částech tyčí, které jsou uvnitř drážek, tak to musíme brát v úvahu při vytváření náhradního schéma. Odpory těch částí tyčí, které jsou v drážkách, se mohou při rozběhu zvětšit 3-4krát. Reaktance těchto částí tyčí může pro změnu o 30-40% klesnout. Zatímco odpor a reaktance kruhů nakrátko a částí tyčí, které jsou vně drážek, se v závislosti na skluzu téměř nemění. Takže se tato změna dá zanedbat.

[2, s. 234-235]

Proto pro přesnější výpočty potřebujeme pro stroj s vírovou klecí 2 náhradní schémata. Jedno pro rozběh stroje a druhé pro běh v okolí jmenovitých otáček. Pro běh v okolí jmenovitých otáček stačí výchozí náhradní schéma, viz obr. 1.3. Ale pro rozběh musíme rozdělit odpor vinutí kotvy  $R'_2$  a rozptylovou reaktanci vinutí kotvy  $jX'_{2\sigma}$  na části, které nejsou v drážkách a na části, které jsou v drážkách a tvoří se v nich vířivé proudy a ty jsou tudíž závislé na skluzu.

[1, s. 414-415]

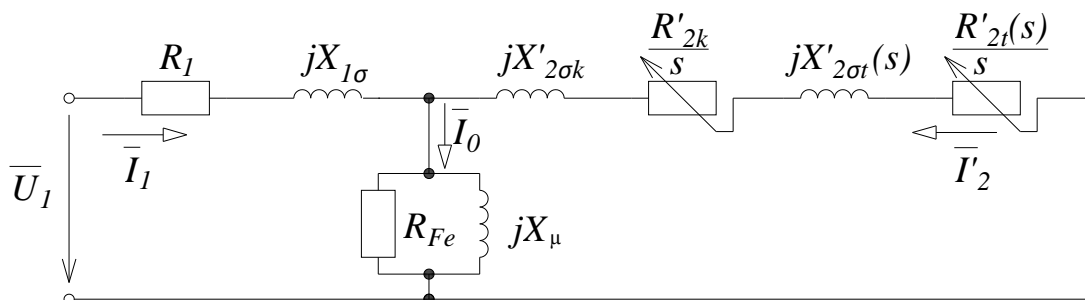
Rovnice (1.7) se nám pak změni následovně:

$$\bar{Z}'_2 = \frac{R'_2(s)}{s} + jX'_{2\sigma}(s) = \frac{R'_{2k}}{s} + jX'_{2\sigma k} + \frac{R'_{2t}(s)}{s} + jX'_{2\sigma t}(s), \quad (2.2)$$

kde

$R'_{2k}$	odpor kruhů nakrátko a vinutí kotvy vně drážek [ $\Omega$ ],
$jX'_{2\sigma k}$	rozptylová reaktance kruhů nakrátko a vinutí kotvy vně drážek [ $\Omega$ ],
$R'_{2t}(s)$	odpor vinutí kotvy uvnitř drážek závislý na skluzu [ $\Omega$ ],
$jX'_{2\sigma t}(s)$	rozptylová reaktance vinutí kotvy uvnitř drážek závislá na skluzu [ $\Omega$ ].

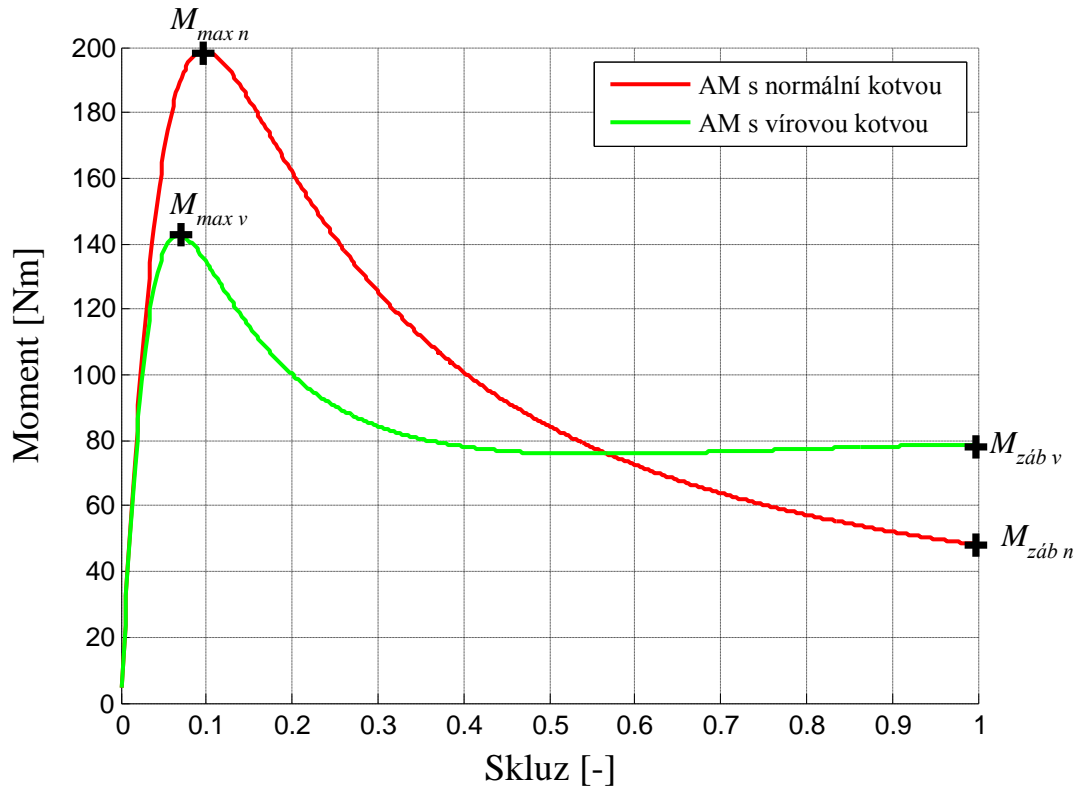
A náhradní schéma se z výchozího, viz obr. 1.3, změni následovně:



Obr. 2.3 – Náhradní schéma AM s vírovou klecí – pro rozběh [1, s. 415-416]

## 2.2.4 Charakteristiky

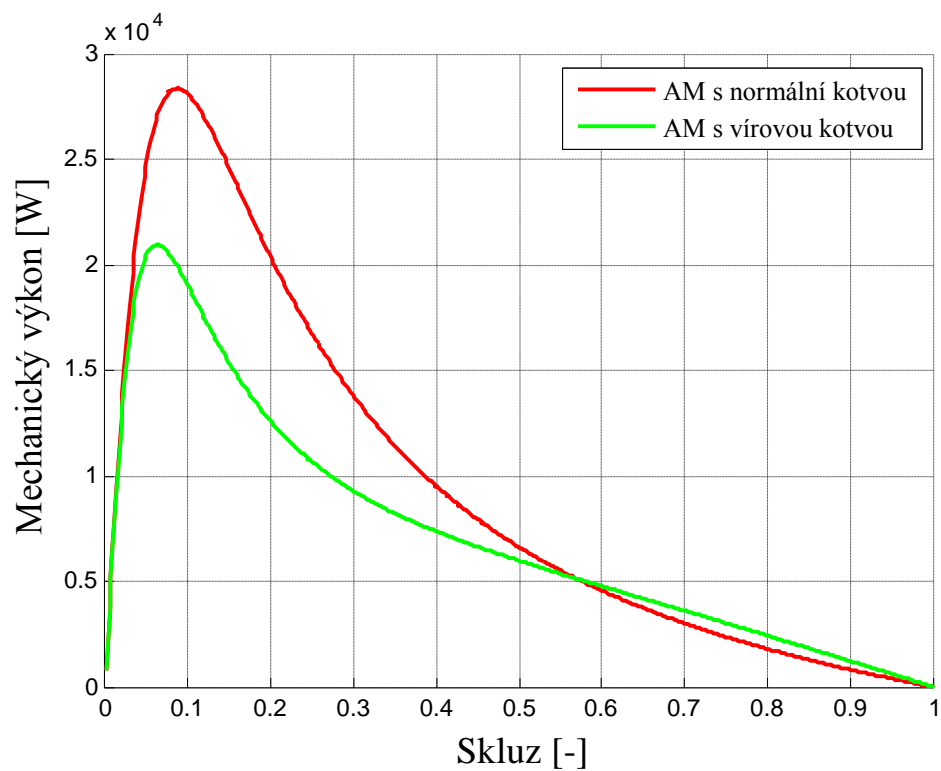
Jak je vidět z momentové charakteristiky obr. 2.4, tak se nám téměř nezměnila přímková část momentu. Za cenu snížení maximálního momentu  $M_{max\ n}$  na  $M_{max\ v}$  jsme ale získali zvýšení záběrného momentu na hodnotu  $M_{záb\ v}$  z původní hodnoty  $M_{záb\ n}$ .



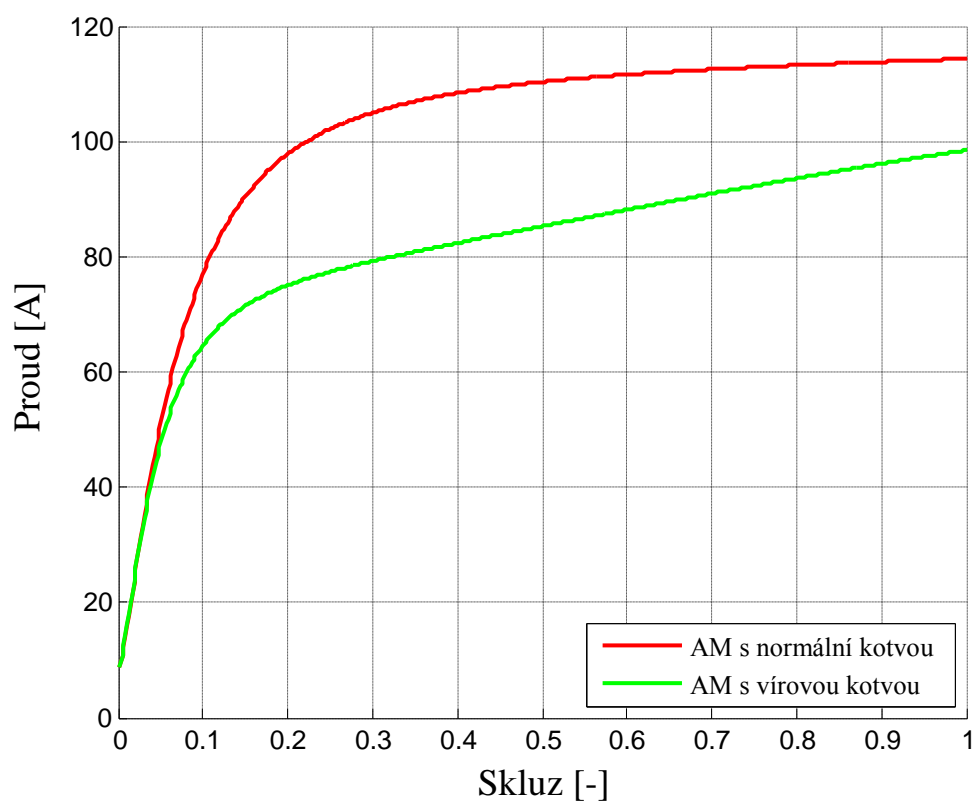
**Obr. 2.4 – Momentová charakteristika AM pro porovnání vírové a normální kotvy**

Charakteristika na obr. 2.5 dovoluje porovnat mechanické výkony  $P_2$  u AM s vírovou kotvou a u AM s normální kotvou. Stejně jako u momentu i zde nám klesnul maximální výkon, ale získali jsme navýšení v oblasti vysokých skluzů a tím jsme napomohli k snazšímu rozběhu motoru.

Na obr. 2.6, což je charakteristika statorových proudů  $I_1$  u AM s vírovou kotvou a u AM s normální kotvou, vidíme, že se snížil proud v té části charakteristiky, kde se stroj rozbíhá. Přesně toho jsme chtěli dosáhnout, snížit záběrný proud a vyhnout se přílišnému přehřívání, při rozbězích.

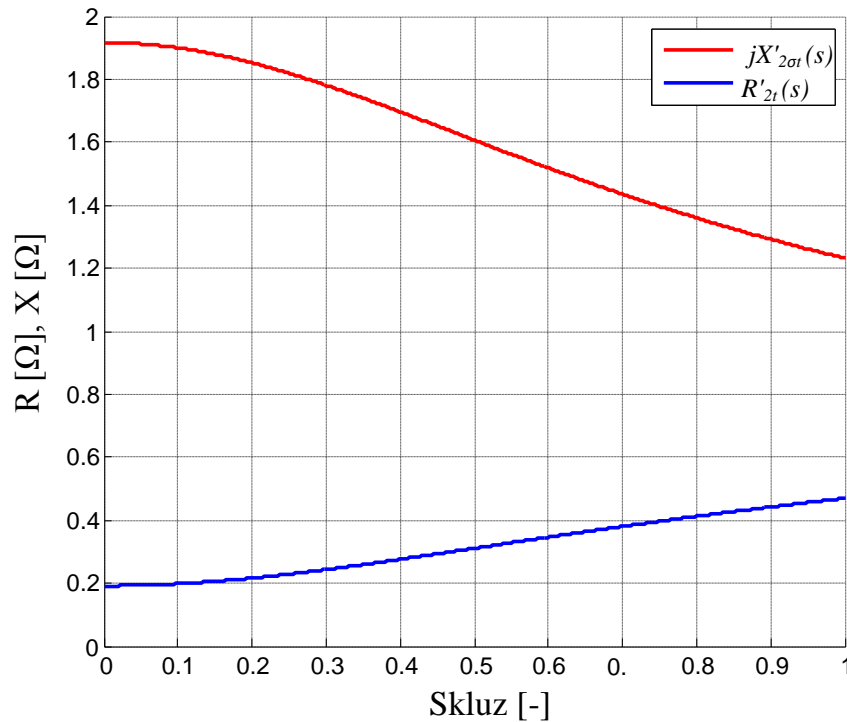


Obr. 2.5 – Výkonová charakteristika AM pro porovnání normální kotvy a vírové kotvy



Obr. 2.6 – Proudová charakteristika AM pro porovnání normální kotvy a vírové kotvy

Na charakteristice obr. 2.7 vidíme, jak se mění  $R'_{2t}(s)$  a  $jX'_{2\sigma}(s)$  v závislosti na skluzu. Je vidět, že na začátku rozběhu při  $s = 1$  je odpor velký a rozptylová reaktance malá a směrem k synchronním otáčkám se odpor snižuje a rozptylová reaktance roste.



Obr. 2.7 – Charakteristika závislosti  $R'_{2t}(s)$  a  $jX'_{2\sigma}(s)$  na skluzu [2, s. 236]

## 2.3 Dvojitá klec

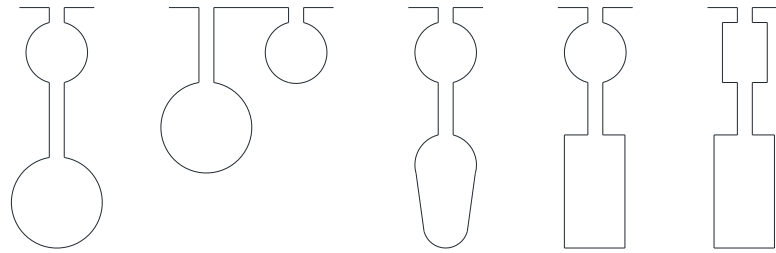
Která se také nazývá Boucherotova klec, podle francouzského vynálezce Paula Boucherota, který se podílel na jejím vzniku. [1, s. 410]

### 2.3.1 Konstrukce

Máme zde dvě klece a to vnější a vnitřní klec. Tyto klece mají podle potřeby, na každé straně, buďto jeden kruh nakrátko, který spojuje všechny tyče obou klecí dohromady anebo má dva kruhy a to každý pro jednu z klecí. Většinou se používá varianta dvou kruhů na každé straně. To proto, že každá klec se většinou vyrábí z jiného materiálu a nebylo by snadné tyto materiály spojovat. Nejčastěji se tedy tyto klece vyrábí metodou pájení. [3, s. 59]

Sice v menší míře, ale také se dělá druhá varianta, kdy se klece odlévají. Při odlévání jsou většinou obě klece ze stejného materiálu a to nejčastěji z hliníku, ale už je v dnešní době možné si nechat odlít klec i z mědi. Pokud se použije tato metoda, tak pak se neodlejí pouze kruhy nakrátko, které bývají v tomto případě společné pro obě klece, ale také úzká mezera mezi drážkami. [2, s. 237]





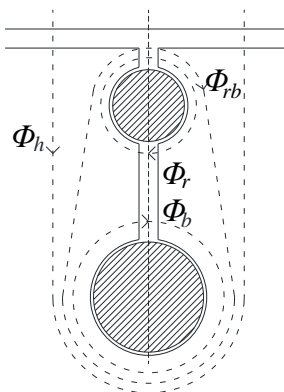
**Obr. 2.8 – Různé tvary drážek dvojité klece [3, s. 59]**

Vnější klec tzv. rozběhová má většinou menší průřez tyčí než klec vnitřní. Vyrábí se z materiálů, které mají větší měrný odpor např.: mosaz, bronz. [3, s. 59]

Klec vnitřní tzv. běhová to má právě naopak. Ke snížení odporu této klece se používá jak materiálů s lepší měrnou vodivostí např.: měď nebo hliník, tak se tyto tyče dělají většího průřezu, čímž se docílí dalšího snížení odporu. [3, s. 59]

### 2.3.2 Princip

Jak vidíme na obr. 2.9 tak se hlavní magnetický tok  $\Phi_h$  uzavírá kolem obou dvou tyčí dvojité klece. Tento tok nám vyvolává proudy v obou tyčích. Ve vnější tyči nám tento proud vyvolá malý rozptylový tok  $\Phi_r$ , protože má nad sebou pouze úzkou štěrbinu a ta je pro velikost rozptylového toku rozhodující. Zatímco proud ve vnitřní tyči nám vyvolá velký rozptylový tok  $\Phi_b$ , díky delší mezeře mezi oběma klecemi. Oba dva proudy dohromady nám vytváří společný rozptylový tok  $\Phi_{rb}$ . [1, s. 411]



**Obr. 2.9 – Zobrazení magnetických indukčních toků ve dvojité kotvě**

Dalo by se předpokládat, že se proudy rozdělí podle odporů tyčí, že vnitřní tyčí poteče větší proud a vnější tyčí malý proud. Ale díky rotorové frekvenci  $f_2$ , která je při rozběhu velká, musíme uvažovat celkové impedance tyčí. Takže se nám proudy rozdělí přesně obráceně, protože impedance vnější tyče je vzhledem k rozptylové reaktanci, tyče vnitřní,

malá. Ale díky tomu, že má vnější tyč zvýšený odpor, díky materiálu, z kterého byla vyrobena, tak nám omezuje rozběhový proud a zvyšuje záběrný moment. [1, s. 411]

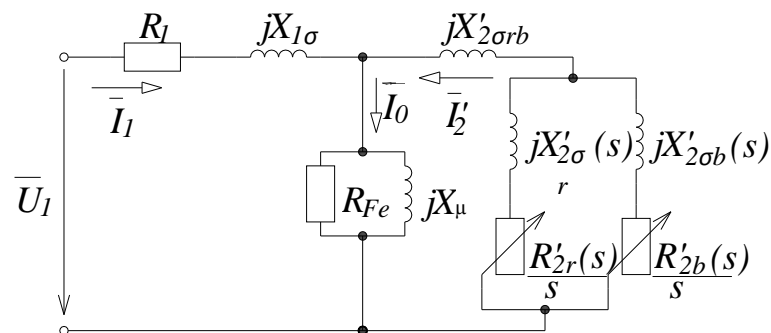
Během rozběhu se nám rozptylová reaktance vnitřní klece opět sníží a proudy nám poté potečou podle prvního předpokladu, teda že, vnitřní klecí s malým odporem poteče větší proud a vnější klecí s větším odporem poteče proud menší. Pokud máme společný kruh nakrátko, tak nám spojuje klece k sobě jako paralelní odpory a odpor klece je nakonec ještě menší. Takže při jmenovitých otáčkách  $n_n$  máme malé ztráty ve vinutí. [1, s. 411]

### 2.3.3 Náhradní schéma

Z konstrukce a principu asynchronního stroje s dvojitou kotvou nám vyplývá, že musíme při tvoření náhradní schéma, rozdělit impedanci  $\bar{Z}'_2$  na dvě paralelní větve a část, kterou mají obě dvě klece společnou. Tuto společnou část nám v náhradním schéma zobrazuje  $jX'_{2\sigma b}$ , který nám nahrazuje působení společného rozptylového toku  $\Phi_{rb}$ . Musí být v té části, kterou protéká celkový proud  $\bar{I}'_2$ , protože ho tento celkový proud vyvolává. [1, s. 412]

Dále se podíváme na paralelní větve, viz obr. 2.10. V jedné větvi je rozptylová reaktance a odpor s indexem  $r$ , to je pro rozběhovou vnější klec a ve druhé mají indexy  $b$ , což značí běhovou vnitřní klec. Všechny tyto čtyři části náhradního schématu jsou závislé na skluzu.

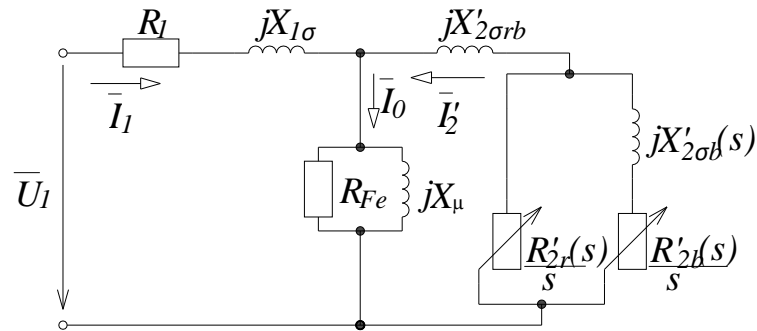
[1, s. 412]



**Obr. 2.10 - Náhradní schéma AM s dvojitou kotvou [2, s. 239]**

Občas se můžeme se schématem asynchronního stroje s dvojitou kotvou setkat v jiném provedení a to bez rozptylové reaktance vnější klece  $jX'_{2\sigma}(s)$ . To proto, že odpor vnější klece je daleko větší a neuděláme velkou chybu, pokud tuto rozptylovou reaktanci zanedbáme.

[1, s. 412]



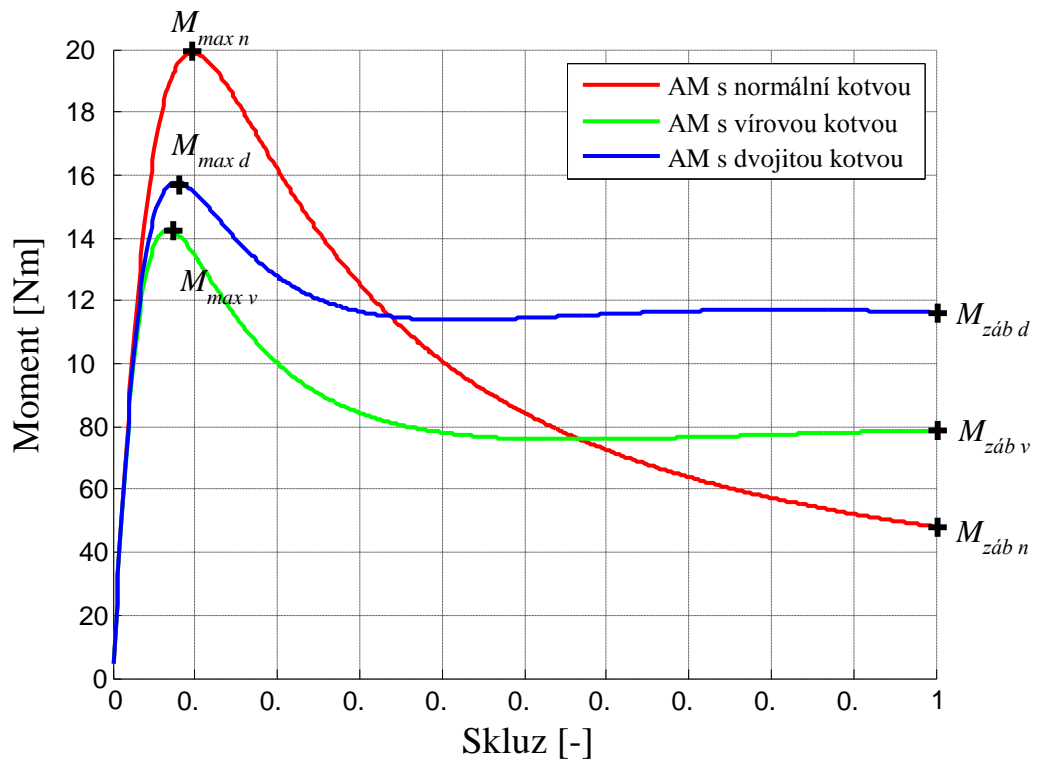
Obr. 2.11 – Náhradní schéma AM s dvojitou klecí bez  $jX'_{2\sigma}(s)$  [1, s. 412]

### 2.3.4 Charakteristiky

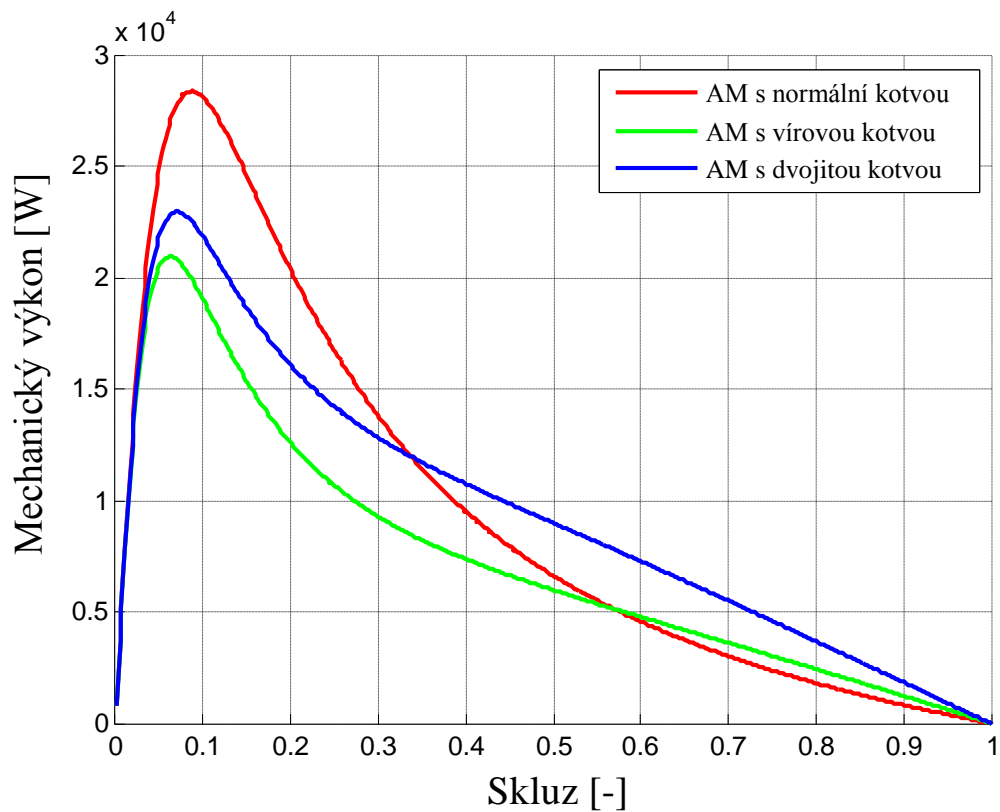
Nejdříve se podíváme na obr. 2.12, kde vidíme tři charakteristiky. Jsou zde znázorněny momentové charakteristiky dvojitě, vírové a normální klece. Opět můžeme vidět, že přímková část, kde je skluz malý, se téměř nezměnila ani použitím dvojitých tyčí. V této části charakteristiky se nejvíce uplatňuje vnitřní běhová klec. Podíváme-li se na maximální moment, tak uvidíme, že nám opět trochu narostl vůči vírové kleci. Teď se zaměříme na rozběhovou část charakteristiky a vidíme, že se nám v porovnání s normální klecí opět změnila. Je zde vidět i mírný nárůst momentu a pak opětovný pokles, to nám způsobuje vnější běhová klec.

Na obr. 2.13. jsou charakteristiky výkonů dvojitě, vírové a normální klece. Z charakteristiky opět vidíme, že maximální výkon se změnil, ale opět se nezměnil průběh při nízkých skluzech. Navíc jsme získali další navýšení výkonu v druhé části charakteristiky což je opět dobře pro rozběh motoru.

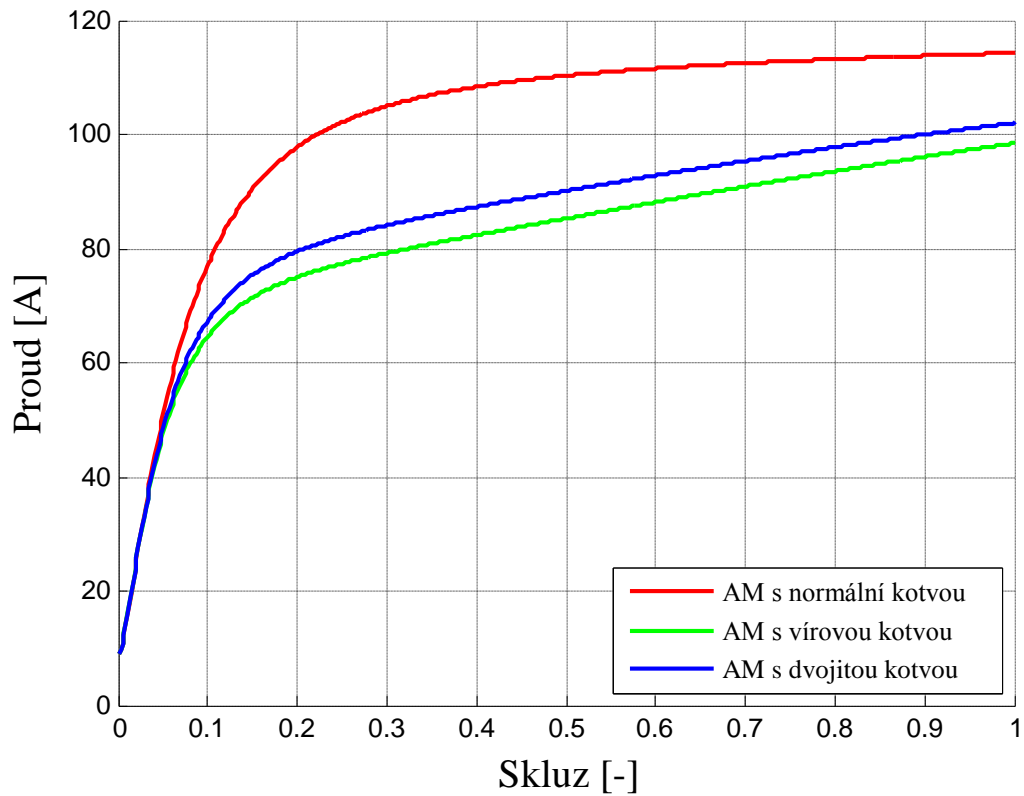
Další charakteristika obr. 2.14 je proudová závislost na skluzu pro dvojitou, vírovou a normální klec. Zde je dobře vidět, že průběh proudu  $I_1$  pro dvojitou klec je hodně podobný průběhu pro klec vírovou. Dále je z průběhu zřejmé, že v části kde se stroj rozbíhá, se nám proud mírně zvýšil, ale pořád je nižší než s normální klecí.





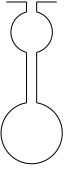
Obr. 2.12 – Momentová charakteristika AM pro porovnání dvojitě, vírové a normální kotvy



Obr. 2.13 – Výkonová charakteristika AM pro porovnání dvojitě, vírové a normální kotvy



**Obr. 2.14 – Proudová charakteristika AM pro porovnání dvojité, vírové a normální kotvy**

		
$S_n=100\text{mm}$	$S_v=75\text{mm}$	$S_d=91,6\text{mm}$

**Tab. 2.1 – Průřezy drážek normální, vírové a dvojité kotvy**

Dále se podíváme na odpory a rozptylové reaktance, které jsou závislé na skluzu. Jelikož nejsou tentokrát v náhradním schématu, viz obr. 2.10, zapojené sériově tak je nemůžeme jednoduše sečíst, ale musíme použít následující vztahy:

$$R'_2 = \frac{R'_{2r} \cdot R'_{2b} (R'_{2r} + R'_{2b}) + (R'_{2r} \cdot jX'_{2\sigma b} + R'_{2b} \cdot jX'_{2\sigma r}) \cdot s^2}{(R'_{2r} + R'_{2b})^2 + (jX'_{2\sigma r} + jX'_{2\sigma b})^2 \cdot s^2}, \quad (2.3)$$

$$jX'_{2\sigma} = \frac{R'_{2r} \cdot jX'_{2\sigma b} + R'_{2b} \cdot jX'_{2\sigma r} + jX'_{2\sigma r} \cdot jX'_{2\sigma b} \cdot (jX'_{2\sigma r} + jX'_{2\sigma b}) \cdot s^2}{(R'_{2r} + R'_{2b})^2 + (jX'_{2\sigma r} + jX'_{2\sigma b})^2 \cdot s^2} + jX'_{2\sigma b}, \quad (2.4)$$

kde

$R'_{2r}$  odpor rozběhové tyče kotvy[Ω],

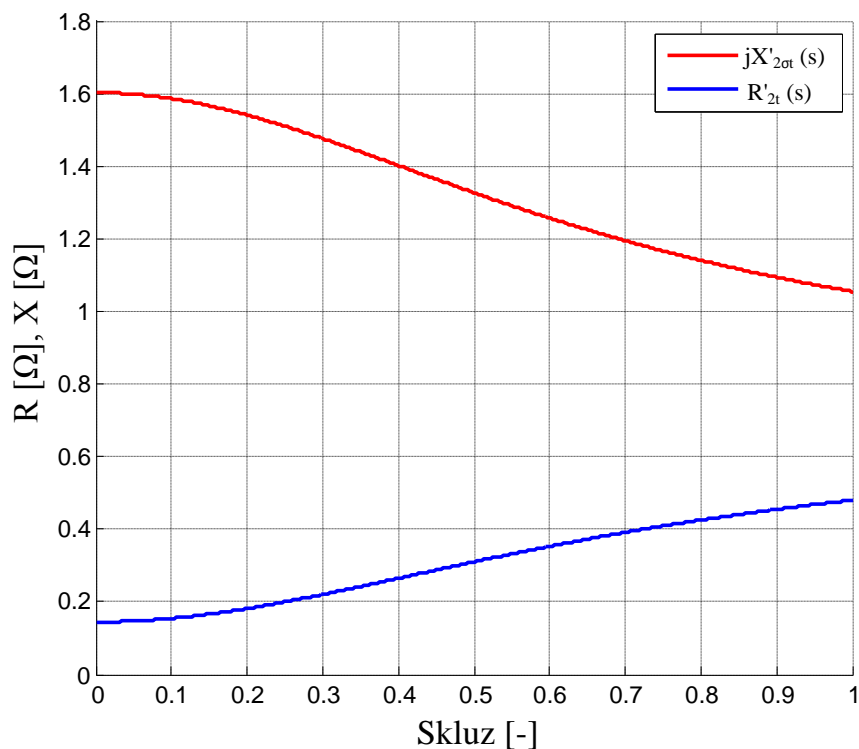
$jX'_{2\sigma r}$  rozptylová reaktance rozběhové tyče kotvy[Ω],

$R'_{2b}$  odpor běhové tyče kotvy[Ω],

$jX'_{2\sigma b}$  rozptylová reaktance běhové tyče kotvy[Ω],

$jX'_{2\sigma b}$  společná rozptylová reaktance rozběhové a běhové tyče kotvy[Ω].

Pro zjednodušení jsme neuváděli ( $s$ ), ale stále pracujeme s odpory a rozptylovými reaktancemi závislými na skluzu. Jejich závislost vidíme na další charakteristice obr. 2.15.



Obr. 2.15 - Charakteristika závislosti  $R'_2(s)$  a  $jX'_{2\sigma}(s)$  na skluzu [2, s. 241]

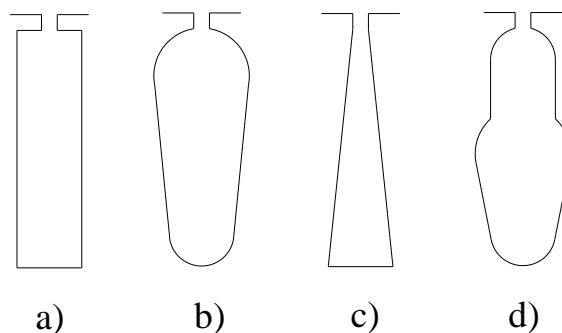
### 3 Charakteristiky pro porovnání

Zatím jsme viděli pouze charakteristiky pro základní tvary drážek, ale jak už jsem výše zmínil, tak tvarů vírových i dvojitých klecí je několik. Stejně tak hloubka drážek u vírových klecí není vždy stejná. A jak uvidíme dále tak se nám podle toho budou měnit i jejich charakteristiky

#### 3.1 Vírová klec

##### 3.1.1 Porovnávání tvarů drážek

Tvarů vírových klecí je opravdu mnoho viz obr. 2.1, zde si ukážeme charakteristiky pro několik z nich, obr. 3.1.

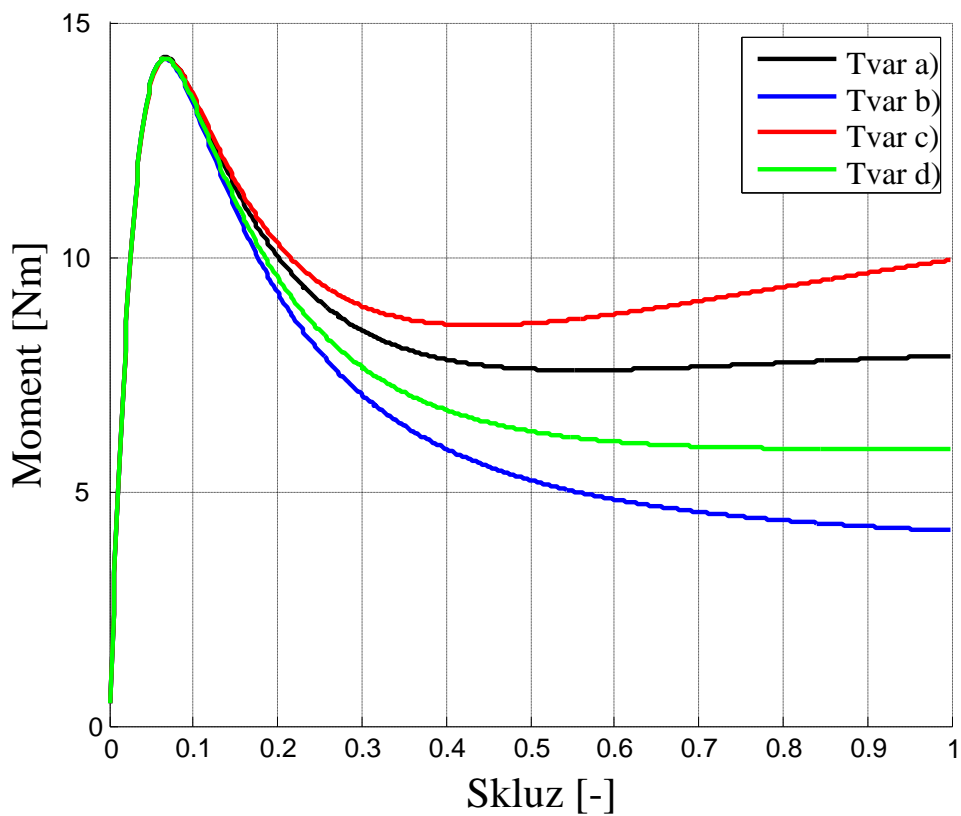


Obr. 3.1 – Vybrané drážky vírové klece

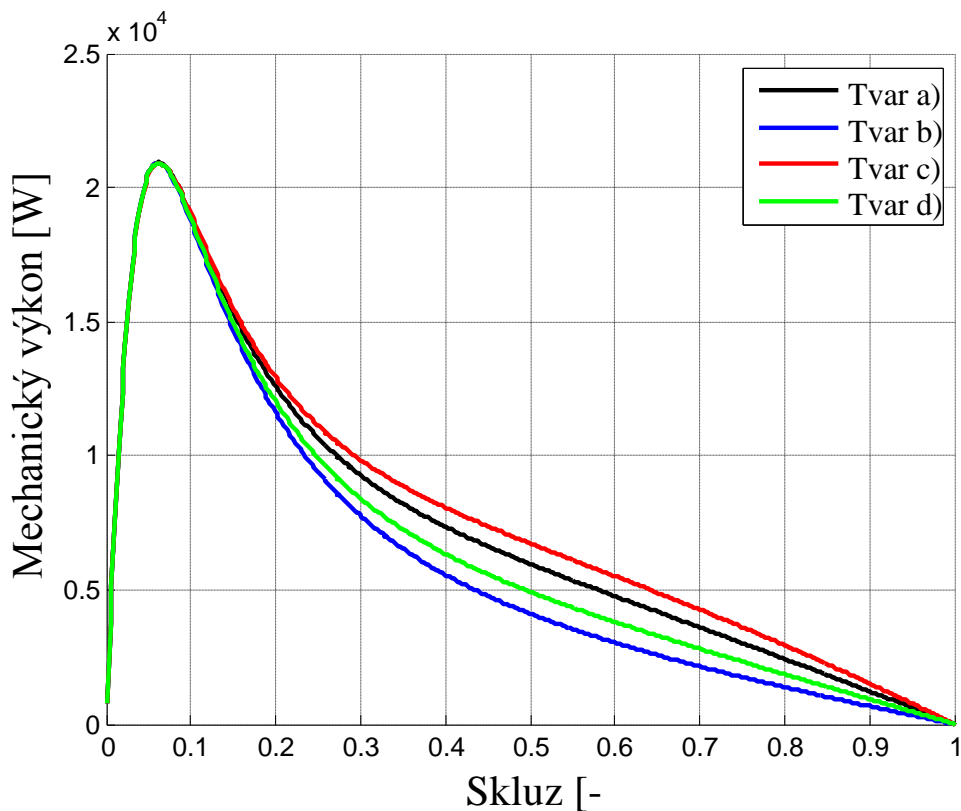
Z momentové charakteristiky je zřejmé, že největší záběrný moment má stroj s drážkou tvaru c), která je v blízkosti vzduchové mezery nejužší z posuzovaných drážek. Druhý největší záběrný moment má drážka tvaru a), třetí je tvar d) a poslední tvar b). Když se teď podíváme na tvary drážek tak si můžeme všimnout, že se seřadili podle šířky jejich částí, které jsou nejbližší ke vzduchové mezeře.

U výkonové charakteristiky na obr. 3.3 má opět v první části momentové charakteristiky, kde se stroj rozjíždí, největší mechanický výkon stroj s drážkou tvaru a), poté tvaru c), d) a b). Takže i u mechanického výkonu se projevuje zúžení drážek u vzduchové mezery.

Třetí charakteristika je proudová a zde se proudy v podstatě překrývají, takže můžeme říct, že na velikost proudů, má zúžení vrchní části drážky menší vliv než na moment a výkon.

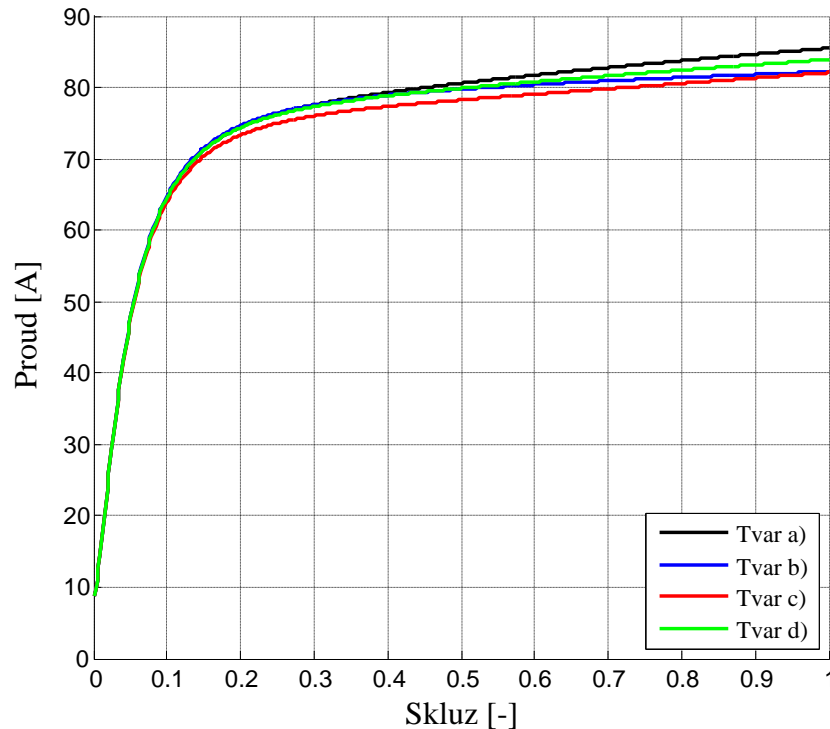


Obr. 3.2 – Momentová charakteristika vybraných drážek vírové klece



Obr. 3.3 – Výkonová charakteristika vybraných drážek vírové klece

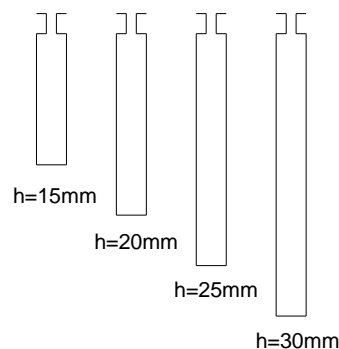




Obr. 3.4 – Proudová charakteristika vybraných drážek vírové klece

### 3.1.2 Porovnávání hloubek drážek

Nyní si porovnáme několik různě hlubokých drážek stejného tvaru, viz obr.3.5, abychom zjistili, jaký vliv bude změna hloubky mít na charakteristiky.

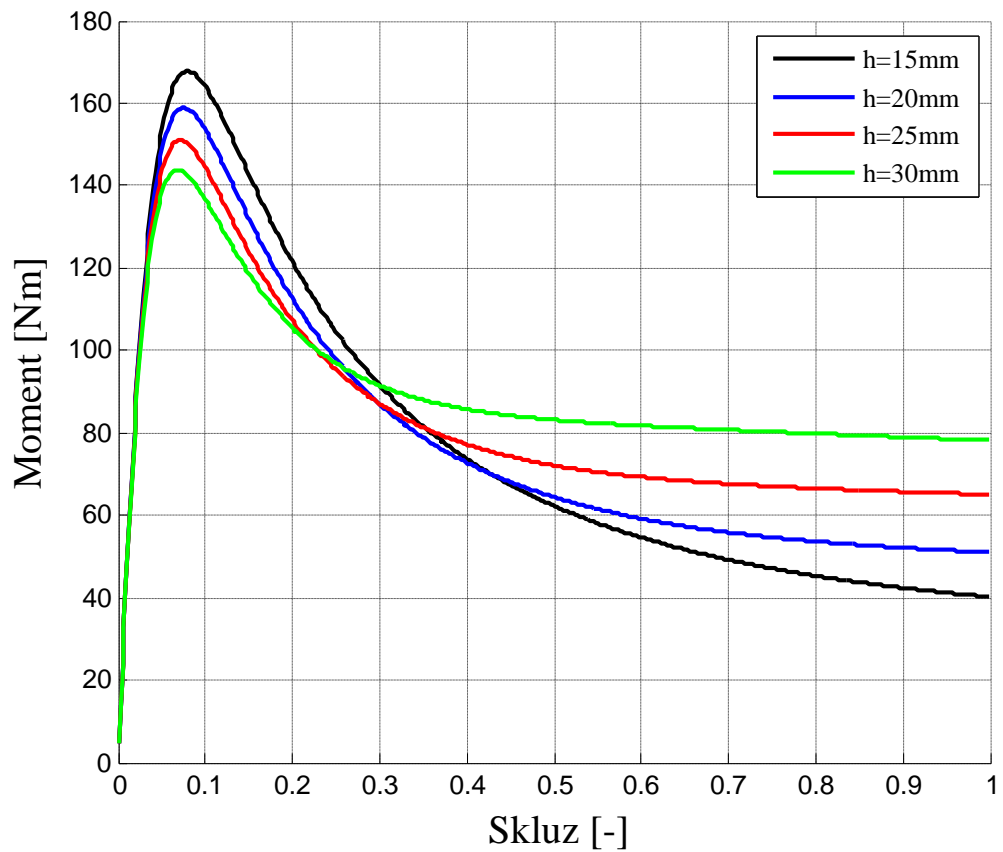


Obr. 3.5 – Různě hluboké drážky vírové klece

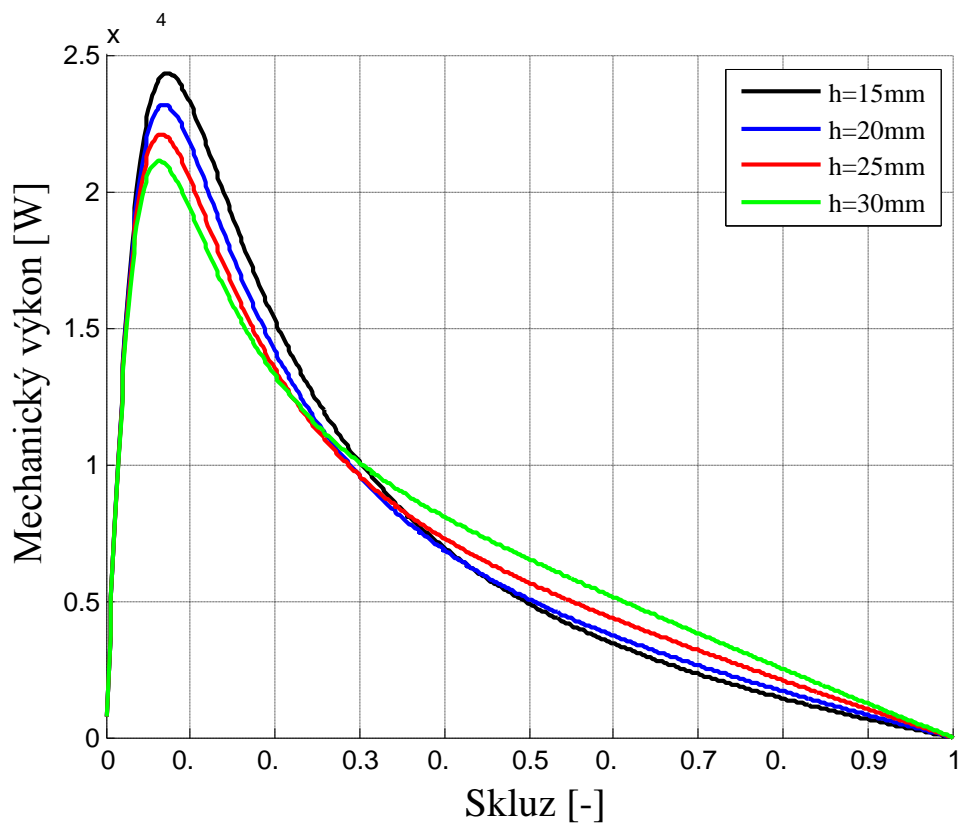
Z momentové charakteristiky vidíme, že čím je větší hloubka drážky tím se maximální moment snižuje, ale roste moment záběrný.

Stejně tak s růstem hloubky drážky klesá i maximální mechanický výkon. Ale zvyšuje se výkon při nízkých skluzech.

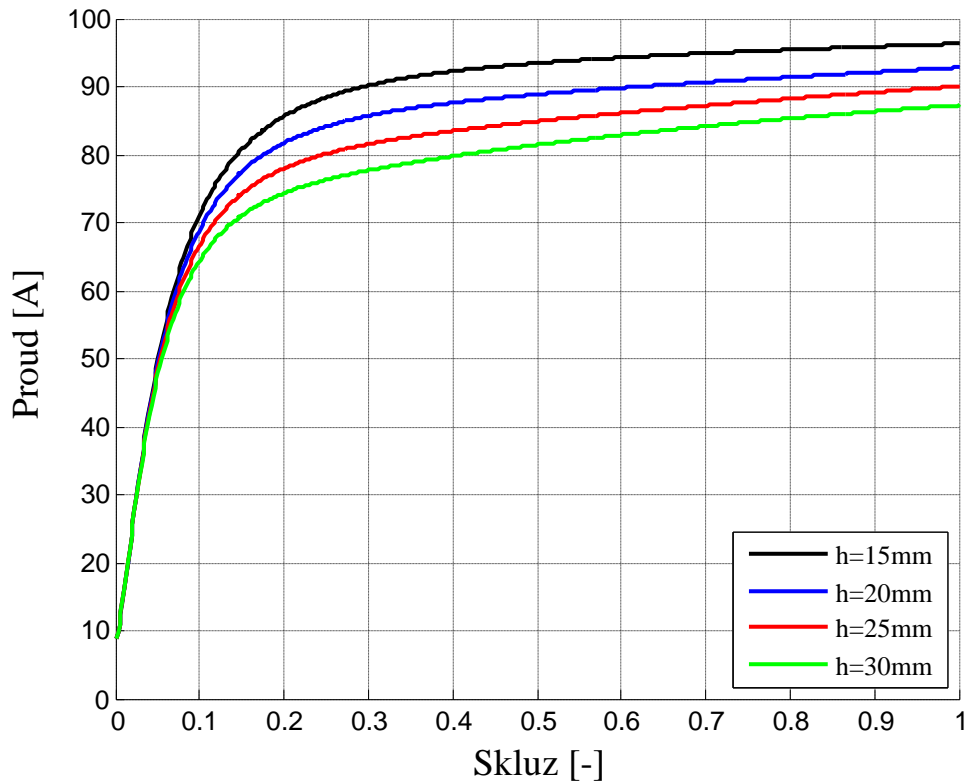
Proud v okolí vysokých skluzů s hloubkou drážky klesá, ale při nízkých skluzech se téměř nemění.



Obr. 3.6 – Momentová charakteristika různě hlubokých drážek vírové klece



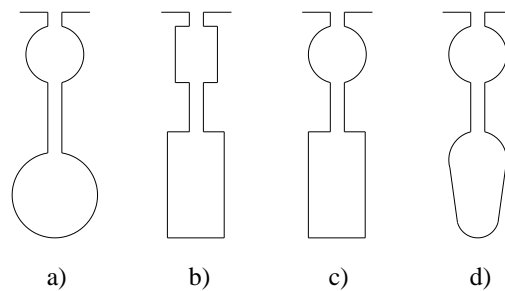
Obr. 3.7 – Výkonová charakteristika různě hlubokých drážek vírové klece



Obr. 3.8 – Proudová charakteristika různě hlubokých drážek vírové klece

## 3.2 Dvojitá klec

### 3.2.1 Porovnávání tvarů drážek

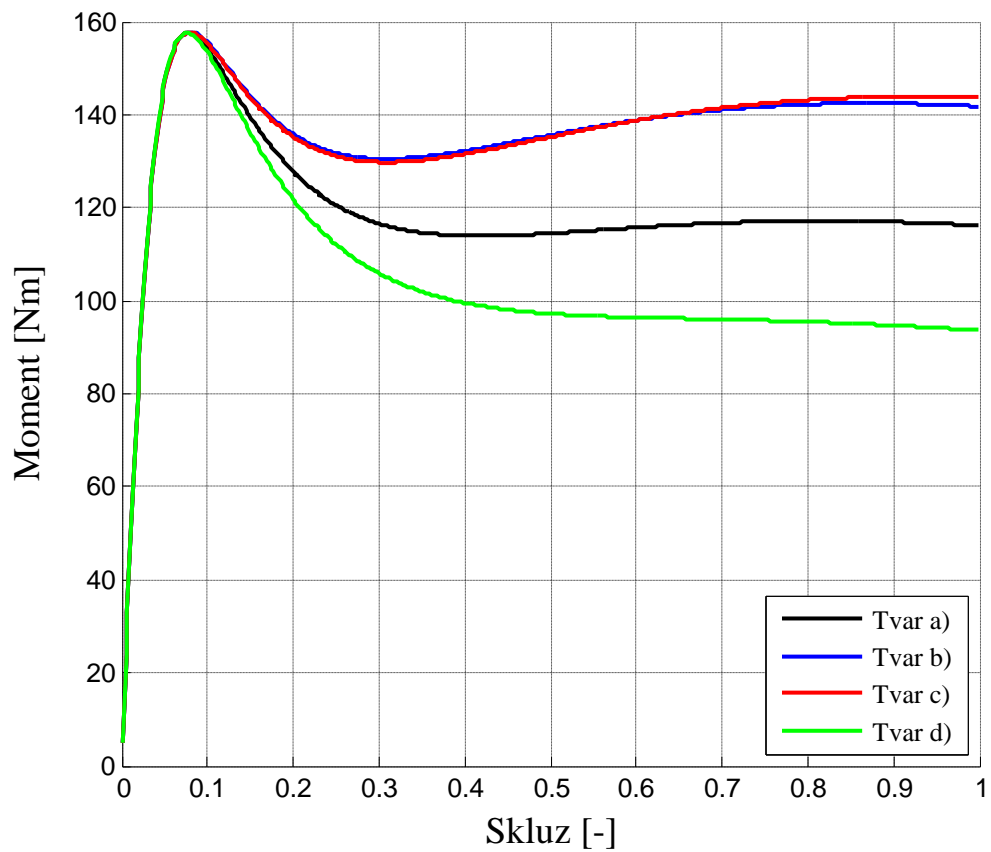


Obr. 3.9 – Vybrané drážky dvojité klece

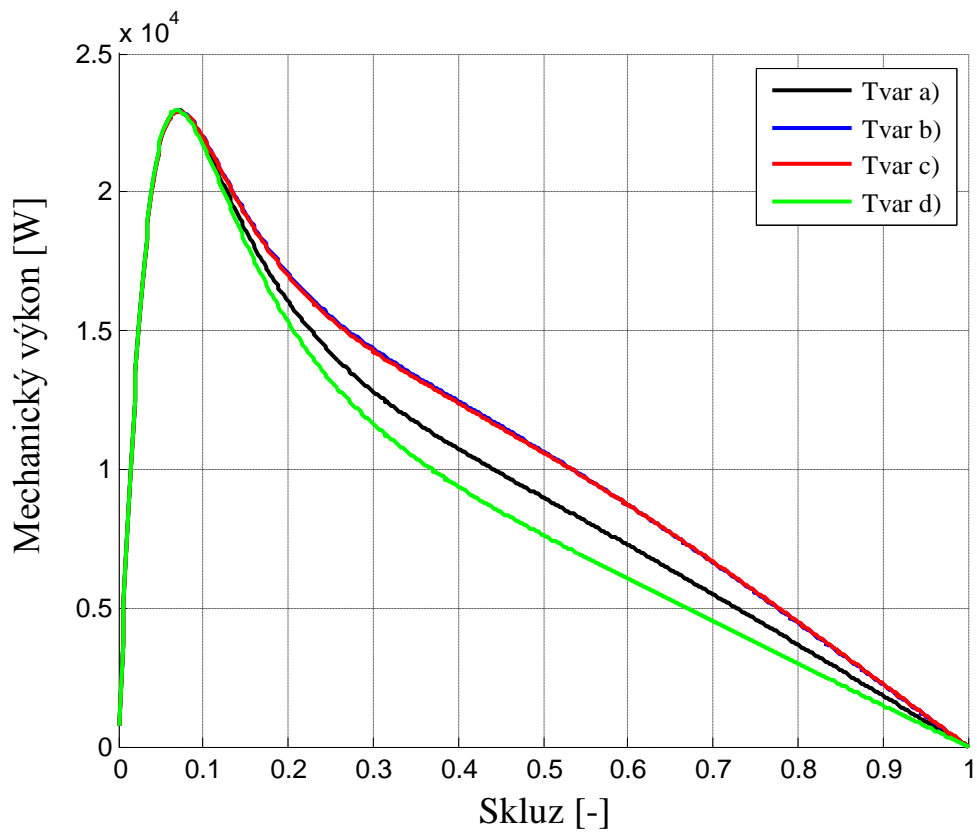
Z charakteristiky vidíme, že tvary drážky b) a c) mají téměř stejný tvar momentové charakteristiky, a mají největší záběrný moment. Druhý největší záběrný moment má drážka s tvarem a) a nejhůře je na tom drážka s tvarem d).

Podobné je to i u mechanického výkonu, tvar drážky b) a c) má opět téměř totožný průběh a mají celkem velký výkon v rozběhové části charakteristiky. Tvar a) je na tom opět o něco hůře a nejmenší mechanický výkon v rozběhové části charakteristiky má tvar d).

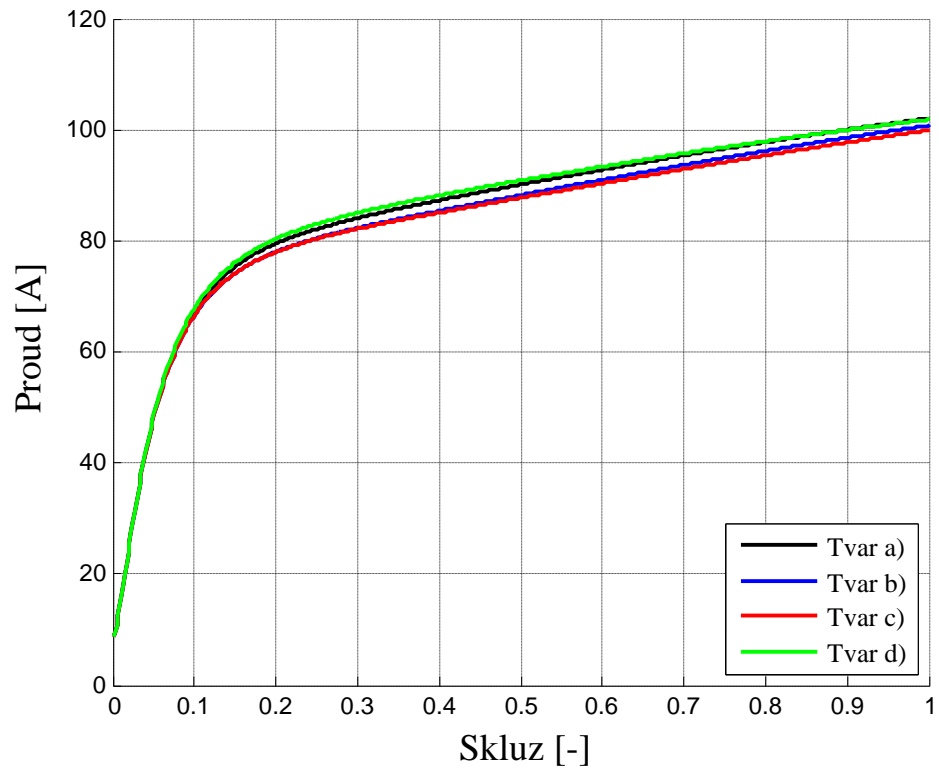
Proudové charakteristiky se téměř nemění, takže omezení proudu mají všechny tyto tvary drážek téměř totožný.



Obr. 3.10 – Momentová charakteristika vybraných drážek dvojité klece



Obr. 3.11 – Výkonová charakteristika vybraných drážek dvojité klece



Obr. 3.12 – Proudová charakteristika vybraných drážek dvojitě klece

## 4 Závěr

V této bakalářské práci jsem se věnoval problematice ohledně speciálních klecí nakrátko. V teoretickém úvodu jsem se nejdříve snažil přiblížit asynchronní stroje obecně a poté na to navázat speciálními kotvami nakrátko. Nakonec jsem zde uvedl charakteristiky pro porovnání různých klecí nakrátko.

Z charakteristik jsem se dozvěděl, že vírové kotvy mají vyšší záběrný moment než má kotva normální a také má nižší záběrný proud. Dvojité kotvy jsou na tom ještě lépe se záběrným momentem, který je ještě vyšší než u vírových klecí, ale záběrný proud mají o trochu vyšší. Takže při výběru kotvy se rozhodujeme mezi vírovou s lepším průběhem proudu nebo dvojitou s lepším průběhem momentové charakteristiky. Zároveň musíme brát v úvahu složitější konstrukci dvojité kotvy, a proto musíme počítat, že může být pořizovací cena vyšší.

Pokud například potřebujeme pro rozběh rovnoměrný moment, lze použít vírovou klec s velmi hlubokými drážkami. Nebo můžeme použít klec dvojitou a navíc získáme větší přetížitelnost, protože u dvojité klece nemýváme až tak hluboké drážky a proto neklesá tolik maximální moment, jak je vidět na charakteristikách pro vírovou klec.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] BAŠTA, Jan, CHLÁDEK, Jaroslav a MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968. 582 s.
- [2] PETROV, Georgij Nikolajevič. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje*. Vyd. 1. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [3] KOPYLOV, Igor Petrovič aj. *Stavba elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988. 685 s.
- [4] KOBRLE, Pavel. *Elektrické stroje* [online]. Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2013 [cit. 2015-03-12]. Dostupné z: <http://p.kobrlle.sweb.cz/stroje/ES.pdf>. Učební text. Fakulta výrobních technologií a managementu Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem.