

Motor pro hybridní čerpací systém

Motor for hybrid pumping system

Martin Mach, Čestmír Ondrušek

machm@feec.vutbr.cz, ondrusek@feec.vutbr.cz

Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology

DOI: -

Abstract: This contribution deals with possibilities of improvement of efficiency of a squirrel cage induction motor with non-typical construction. The motor is intended to drive a pump. An impeller of this pump is intended to be placed inside of the motor rotor. This arrangement influences construction of the motor. An axial length of the motor is small and also sizes of rotor teeth and yoke are small. Size of the whole pumping system is strongly influenced by size of the motor, especially by its diameter. Therefore, modifications to improve motor's efficiency should not increase its size. The following possibilities were considered: change of a material of magnetic circuit, increase of cross-section of bars and increase of cross-section of rings. a material of the squirrel cage was also under investigation (copper vs. aluminium). The copper is advantageous from the efficiency point of view because of its higher electrical conductivity. But a squirrel cage cast from aluminium is easier to produce.

Motor pro hybridní čerpací systém

Martin Mach, Čestmír Ondrůšek

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Email: machm@feec.vutbr.cz, ondrusek@feec.vutbr.cz

Abstrakt – Tento příspěvek se zabývá možnostmi zvýšení účinnosti asynchronního motoru s kotvou nakrátko netypické konstrukce. Motor je určen k přímému pohonu čerpadla, jehož oběžné kolo bude umístěno přímo uvnitř rotoru. Toto uspořádání vede k několika konstrukčním zvláštnostem. Motor má malou axiální délku a také malou výšku rotorových zubů a rotorového jha. Rozměry motoru, především vnější průměr statoru, významně ovlivňují velikost celého čerpadla. Pro zvýšení účinnosti motoru je tedy vhodné zvolit pouze ta opatření, která nepovedou ke zvýšení jeho rozměrů. Analyzovány byly tyto možnosti: změna materiálu magnetického obvodu, zvýšení průřezu tyčí a zvýšení průřezu kruhů. Uvažován byl také vliv materiálu klece – hliník a měď. Vyšší účinnosti lze dosáhnout s měděnou klecí, protože měď má vyšší elektrickou vodivost. Ovšem použití lité hliníkové klece zjednodušuje a zlevňuje výrobu.

1 Úvod

Článek se zabývá analýzou možností zvýšení účinnosti malého asynchronního motoru s kotvou nakrátko určeného k přímému pohonu čerpadla. Oběžné kolo čerpadla je umístěno přímo uvnitř rotoru, což není běžná konstrukce. Více takto provedených čerpadel je možné zapojit do kaskádního systému, který by měl usnadnit čerpání kapalin na velké vzdálenosti nebo z velkých hloubek [1]. Základní návrh motoru je proveden v [2]. Jedná se o čtyřpólový asynchronní motor s měděnou kotvou nakrátko se jmenovitým výkonem 2000 W při otáčkách 5000 min⁻¹. Předpokládá se napájení z měniče frekvence. Vzhledem k netypickému použití s oběžným kolem čerpadla uvnitř rotoru je axiální délka motoru vzhledem k vnějšímu průměru malá. To vede k nepříznivému poměru aktivních částí vinutí a čel. Umístění oběžného kola do rotoru má také za následek zmenšení rozměrů rotorového jha a rotorových zubů. Omezený prostor pro rotorové drážky má značný vliv na volbu jejich počtu a tvaru [2]. Podle návrhu z [2] byl postaven vzorek motoru, aby bylo možné celý systém otestovat. Aby bylo možné zvláště vyhodnotit účinnost motoru a čerpadla, bylo nutné nejprve změřit vlastnosti samotného motoru. K tomu bylo nutné motor upravit tak, aby mohl být spojen s dynamometrem. Po změření motoru bylo možné ověřit správnost modelu použitého při návrhu. S přesným modelem bylo možné přistoupit k analýze postupů, které by vedly ke zlepšení vlastností motoru, především pak jeho účinnosti.

Možností jak zvýšit účinnost asynchronního motoru s kotvou nakrátko je celá řada. Vyšší účinnosti lze dosáhnout pomocí zvětšení axiální délky svazku současně s úpravou počtu závitů statorového vinutí [3]. Tento postup by mohl být v případě analyzovaného stroje značně účinný, protože by se mohl výrazně

zlepšit poměr aktivních částí vinutí a čel. Došlo by však ke zvětšení stroje. Vzhledem k tomu, že rozměry motoru značně ovlivňují velikost celého čerpadla a snahou bylo, aby celek byl co nejmenší, nebyl tento ani další postupy, které vedou ke zvětšování rozměrů, uvažovány. Parametry asynchronního motoru lze, bez nutnosti změny vnějších rozměrů, ovlivnit úpravou (optimalizací) tvaru drážek pomocí vhodných optimalizačních algoritmů [4, 5]. Větší vliv na vlastnosti asynchronních strojů s kotvou nakrátko má obvykle tvar rotorových drážek, čehož se využívá např. u vírové klece [6]. Tvar rotorových drážek je však v tomto případě omezen malým prostorem, protože uvnitř rotoru je oběžné kolo čerpadla. Původní návrh uvažuje měděnou klec spojenou z tyčí s kruhovým průřezem [2]. Kruhový průřez tyčí je výhodný kvůli omezenému prostoru v rotoru i z hlediska výroby klece. Kruhový průřez byl tedy zachován a analyzován byl vliv průměru tyčí. Snížit rotorový odpor a tím zlepšit účinnost lze i zvětšením průřezu kruhů klece nakrátko [7]. Šířka kruhů (v radiálním směru) je omezena prostorem pro umístění oběžného kola, analyzován byl tedy vliv výšky kruhů (v axiálním směru). Účinnost lze také ovlivnit kvalitou materiálu magnetického obvodu [8].

Motor je navržen s měděnou klecí [2], což zlepšuje jeho účinnost, ale také komplikuje výrobu a zvyšuje jeho cenu. Při analýze vlivu rozměrů klece byl proto spolu s mědí uvažován i hliník. Hliník má nižší elektrickou vodivost, jeho použití tedy vede ke zvýšení rotorového odporu a tedy ke snížení účinnosti (ale také ke zvýšení záběrného momentu, což může být výhodné). Velkou výhodou hliníkové klece je snazší výroba [7].

2 Měření na dynamometru

Jak již bylo uvedeno výše, analyzovaný motor je určen k přímému pohonu čerpadla, jehož oběžné kolo bude umístěno přímo uvnitř rotoru. Při požití motoru spolu s čerpadlem je značně obtížné měřit vlastnosti samotného motoru. Problematiké by bylo měření otáček i určení mechanického výkonu samotného motoru, protože motor s čerpadlem tvoří uzavřený celek a výkon celého pohonu je ovlivněn i účinností samotného čerpadla. Pro ověření návrhu a pro studium možností zlepšení vlastností jak samotného motoru, tak celého systému je však vhodné znát vlastnosti samotného motoru. Aby je bylo možné změřit, musel být motor doplněn hřídelí a upravenými ložiskovými štíty. Takto upravený motor je na Obrázku 1. Díky tomu bylo možné provést měření na dynamometru. Při provozu s čerpadlem bude motor chlazen proudící kapalinou, k čemuž pochopitelně při měření na dynamometru nedocházelo. Teplota motoru při měření na dynamometru se tedy může lišit od teploty při provozu s čerpadlem.



Obrázek 1: Motor upravený pro měření na dynamometru.

Jmenovité otáčky jsou 5000 min^{-1} a motor je čtyřpólový, není tedy možné napájet ho přímo ze sítě [2]. K napájení je použit měnič frekvence, díky čemuž je možné měnit otáčky a tím i výkon čerpadla.

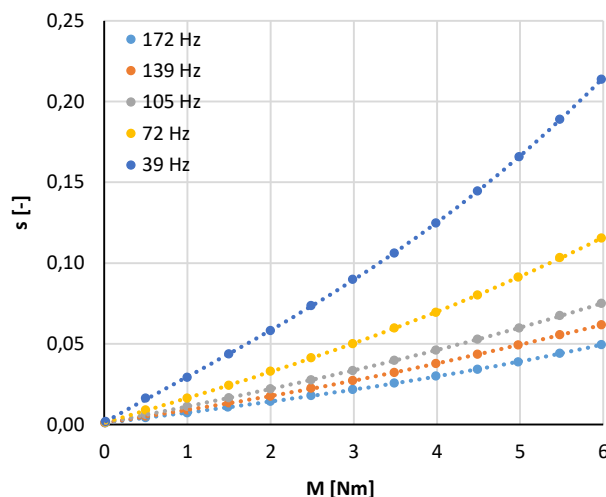
Závislosti skluzu na zatížení pro různé frekvence jsou zobrazeny na Obrázku 2. Je zde vidět, že s klesající frekvencí se při stejném momentu skluz zvyšuje. Závislosti motorem odebraného proudu na zatížení při různých frekvencích jsou na Obrázku 3. Na obrázku je vidět, že vliv frekvence na velikost proudu při stejném zatížení je minimální. Při vyšších zatíženích byly naměřeny o něco vyšší proudy pro vyšší frekvence. Při malých zátěžích tomu bylo naopak, o něco vyšší proudy byly naměřeny při nižších frekvencích.

Na Obrázku 4 jsou znázorněny závislosti účinnosti na zatížení pro různé frekvence. Jak je zde vidět, účinnost se snižující se frekvencí, přičemž tento jev je výraznější při nižších frekvencích. Dále je zde vidět, že účinnost při vyšších frekvencích dosahuje maxima při momentu, který přibližně odpovídá jmenovitému zatížení (moment při 2 kW a 5000 min^{-1} je přibližně $3,82 \text{ Nm}$), což je výhodné. Při snižování frekvence se maximum účinnosti začne přesouvat směrem k menším momentům.

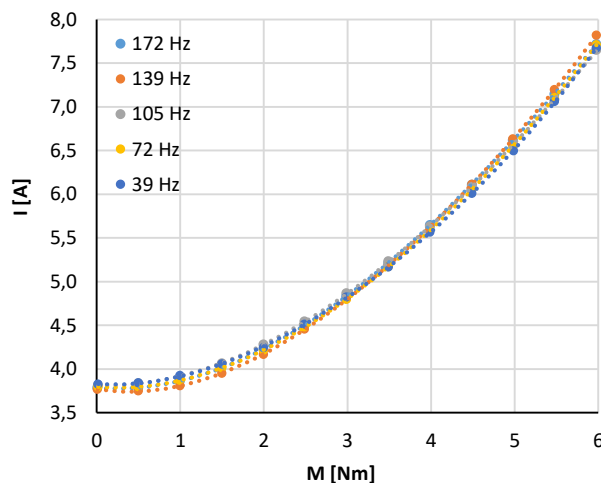
Závislost power factoru (v češtině se lze setkat s označením opravdový účinník) na zatížení je na Obrázku 5. Motor byl napájen z měniče frekvence, napájecí napětí tedy obsahovalo mnoho vyšších harmonických složek a také odebraný proud nebyl sinusový. Naměřený power factor tedy nelze zaměňovat s účinníkem ve smyslu fázového posunu mezi první harmonickou složkou napětí a proudu. Na obrázku je vidět, že se snižující se frekvencí power factor klesá.

3 Vliv použitých elektrotechnických plechů

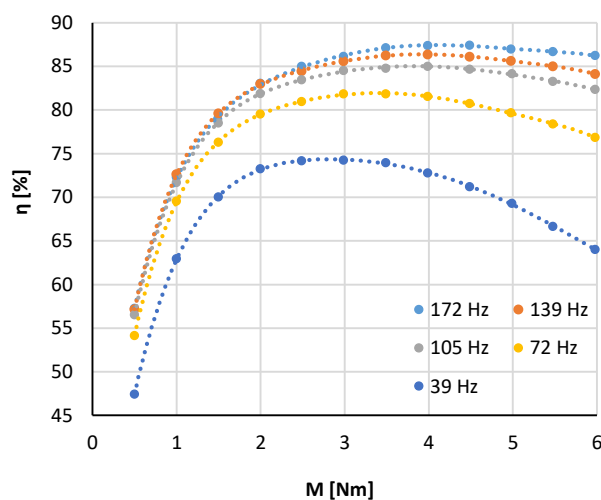
Jednou z možností, jak zlepšit vlastnosti elektrického stroje je použití elektrotechnických plechů s lepšími vlastnostmi [9]. Důležitými vlastnostmi všech elektrotechnických plechů jsou závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole (BH křivka) a velikost měrných ztrát. Měrné ztráty by měly být co nejnižší, aby nezhoršovaly účinnost motoru.



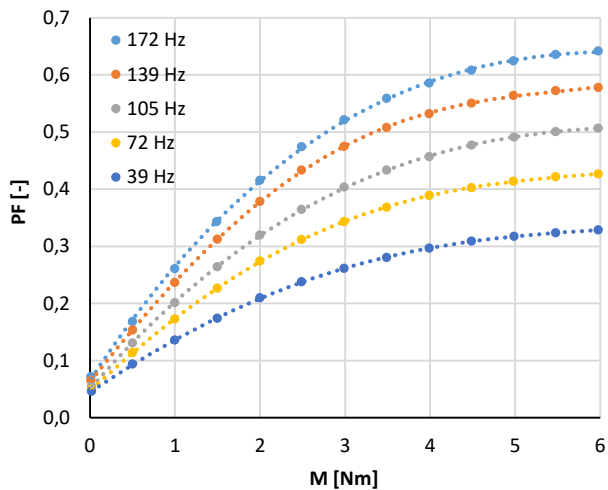
Obrázek 2: Naměřené závislosti skluzu na zatížení pro různé frekvence.



Obrázek 3: Naměřené závislosti proudu na zatížení pro různé frekvence.

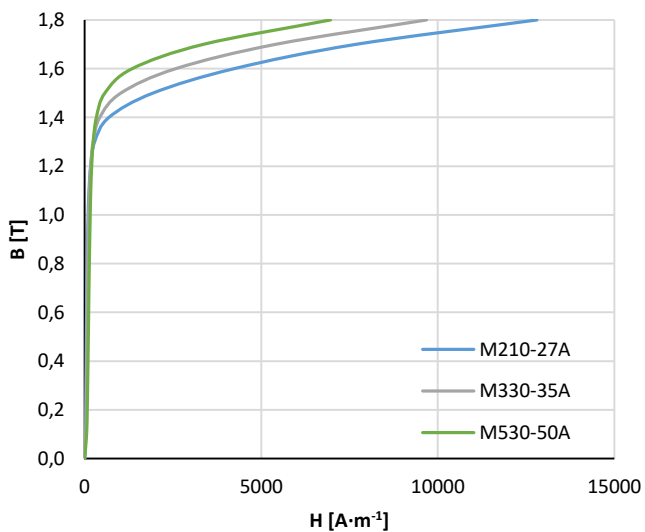


Obrázek 4: Naměřené závislosti účinnosti na zatížení pro různé frekvence.

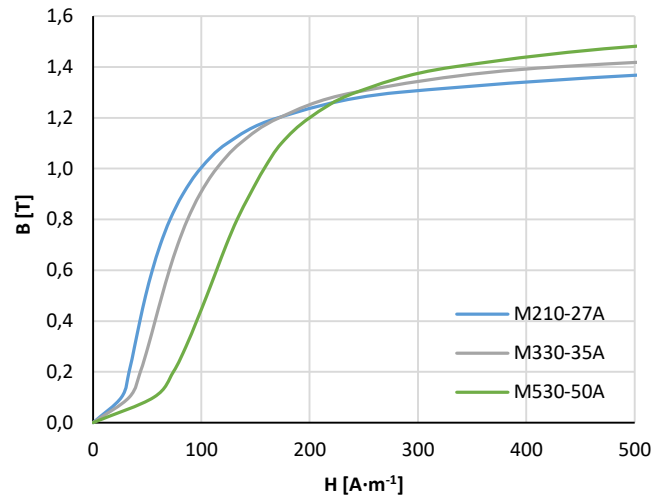


Obrázek 5: Naměřené závislosti power factoru na zatížení pro různé frekvence.

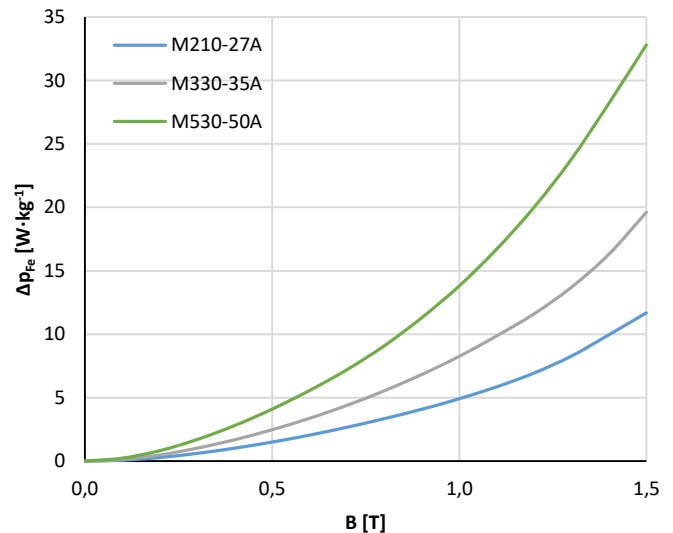
Opatření, která vedou ke snížení měrných ztrát, ale často způsobují změnu tvaru BH křivky. Měrné ztráty se běžně snižují zvýšením elektrického odporu plechů přidáním křemíku. To ale vede také k tomu, že jsou plechy tvrdší a více opotřebovávají prostřihovadlo [10]. Měrné ztráty se také dají snížit zmenšením tloušťky plechů. To má ale za následek nižší plnění magnetického obvodu. Při stejné délce svazku je tedy ve stroji méně železa, což má nepříznivý vliv na magnetizační reaktanci [9]. Vztah mezi měrnými ztrátami a tvarem BH křivky je nejlépe patrný po prostudování katalogových údajů jednotlivých plechů. Obecně lze říci, že plechy s nižšími měrnými ztrátami mají často níže položené koleno BH křivky. Ale pro nižší indukce, v oblasti před kolenem, je naopak tvar plechů s nižšími měrnými ztrátami často výhodnější [11]. Toto je vidět v Tabulce 1a na Obrázcích 6–8 (zpracováno na základě dat získaných z [11]). Je zde vidět, že koleno BH křivky plechů M530-50A je výše, ale její tvar pro nižší indukce je méně výhodný než např. v případě plechů M210-27A. Plechy M530-50A mají, bez ohledu na velikost indukce, vyšší měrné ztráty než plechy M210-27A.



Obrázek 6: Porovnání BH křivek plechů M210-27A, M330-35A a M530-50A [11].



Obrázek 7: Detail oblasti pod kolenem BH křivek plechů M210-27A, M330-35A a M530-50A [11].



Obrázek 8: Porovnání závislosti měrných ztrát na indukci plechů M210-27A, M330-35A a M530-50A [11].

Tabulka 1: Přehled vlastností uvažovaných elektrotechnických plechů [11]. (H_1 – intenzita magnetického pole nutná k dosažení indukce 1 T; $H_{1,5}$ intenzita magnetického pole nutná k dosažení indukce 1,5 T; Δp_1 – měrné ztráty při indukci 1 T; $\Delta p_{1,5}$ – měrné ztráty při indukci 1,5 T).

	H_1 [A·m ⁻¹]	$H_{1,5}$ [A·m ⁻¹]	Δp_1 [W·kg ⁻¹]	$\Delta p_{1,5}$ [W·kg ⁻¹]
M210-27A	99,2	1937	4,92	11,7
M250-35A	107,0	1810	6,14	14,7
M330-35A	114,0	1027	8,25	19,6
M250-50A	120,0	1600	7,73	18,9
M330-50A	91,8	1097	9,42	21,8
M530-50A	158,0	573	13,80	32,8

V běžných elektrických strojích nejsou jednotlivé části magnetického obvodu syceny stejně. Například indukce v zubech je typicky vyšší než indukce ve jhu. Délka a objem zubů je však nižší než délka a objem jha [7]. Vzhledem k nelinearitě BH křivky, nelineární závislosti měrných ztrát na indukci a různému sycení a různým velikostem jednotlivých částí magnetického obvodu, je pro studium vlivu kvality elektrotechnických plechů na parametry motoru nutné vždy provést podrobný výpočet. Analyzovaný motor má relativně vysokou napájecí frekvenci 172 Hz, byl tedy navržen s plechy s nízkými měrnými ztrátami a s relativně nízkým sycením magnetického obvodu [2]. Teoreticky by tedy mělo být výhodnější použití plechů s nižšími měrnými ztrátami, které navíc mají výhodnější tvar BH křivky pro nižší indukce. Nižší položené koleno BH křivky by nemělo vadit. K analýze vlivu kvality plechů na parametry motoru byl použit nástroj RMxpert, který je součástí programu Maxwell a umožňuje provádět rychlé výpočty elektrických točivých strojů. Vzhledem k rychlosti výpočtů bylo možné vyzkoušet více různých plechů. Vyzkoušeny byly všechny plechy uvedené v Tabulce 1.

Výsledky analýzy vlivu kvality plechů na vlastnosti motoru jsou shrnuty v Tabulce 2. Je zde uvedena magnetizační reaktance X_m ; odpor R_{Fe} , který v náhradním schématu reprezentuje vliv ztrát v železe; proud při jmenovitém výkonu I , účinník při jmenovitém výkonu $\cos \varphi$; celkové ztráty při jmenovitém výkonu ΔP , ztráty v železe při jmenovitém výkonu ΔP_{Fe} a účinnost při jmenovitém výkonu η . Původní návrh motoru počítá s plechy M250-35A [2], tomu odpovídá druhý řádek Tabulky 2. Tyto plechy jsou použity i v měřeném motoru. Jak je vidět v Tabulce 2, nejvyšší účinnost byla vypočtena při uvažování plechů M210-27A. Účinnost se oproti původnímu návrhu zvýšila o 0,5 %. Za povšimnutí také stojí výsledky výpočtů získané při uvažování plechů M250-50A a M330-50A. Účinnost vyšla s těmito plechy pouze mírně nižší (o 0,1 % a 0,2 %) a došlo k mírnému zvýšení účinníku. Naopak, jako nevhodné se ukázalo použití plechů M530-50A. Účinnost při použití těchto plechů klesla o téměř 2 %. Tyto plechy mají ze všech uvažovaných nejvýše položené koleno BH křivky, ale také horší magnetické vlastnosti při nižších syceních a nejvyšší měrné ztráty.

Tabulka 2: Vypočtené parametry stroje s různými plechy (měděné tyče s průměrem 5 mm, měděné kruhy s výškou 5 mm).

	X_m	R_{Fe}	I	$\cos \varphi$	ΔP	ΔP_{Fe}	η
	[Ω]	[Ω]	[A]	[-]	[W]	[W]	[%]
M210-27A	65,9	2143,7	5,47	0,699	472,3	50,5	80,9
M250-35A	66,3	1670,8	5,48	0,702	487,4	64,8	80,4
M330-35A	66,9	1200,2	5,51	0,706	513,9	90,2	79,6
M250-50A	66,9	1551,4	5,47	0,705	491,9	69,9	80,3
M330-50A	67,6	1477,9	5,46	0,707	494,7	73,4	80,2
M530-50A	66,9	896,2	5,56	0,709	546,9	120,6	78,5

Jak již bylo uvedeno výše, druhý řádek Tabulky 2 odpovídá původnímu návrhu a také měřenému stroji. Přímé porovnání výsledků měření a výpočtu je však problematické. Motor byl při měření napájen z měniče frekvence, ale při výpočtech se uvažuje harmonické napájecí napětí. Ve výpočtech tedy není zahrnut vliv vyšších harmonických složek způsobených nesinusovým napájecím napětím. Při výpočtech se navíc vždy uvažovalo zatížení motoru čerpadlem a tedy přítomnost kapaliny uvnitř rotoru. Tření kapaliny o rotor by způsobovalo výrazně vyšší mechanické ztráty, než jaké byly při měření motoru na dynamometru. Při výpočtech se vždy uvažovaly odhadnuté vyšší mechanické ztráty, které by byly způsobeny třením o kapalinu [2]. Nesinusové napájecí napětí a rozdílné mechanické ztráty jsou hlavní příčinou rozdílu mezi měřením výpočtem.

4 Vliv velikosti rotorových tyčí

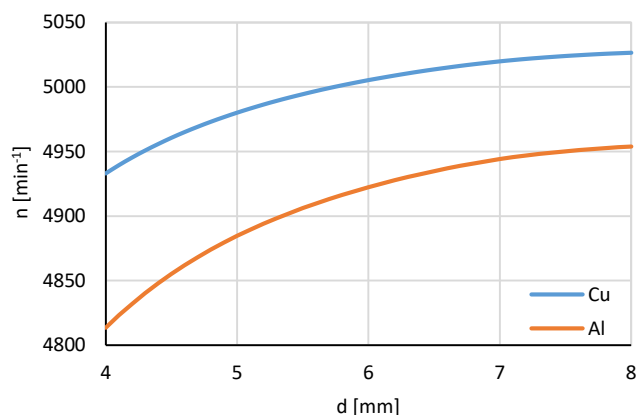
Další možností jak ovlivnit vlastnosti asynchronního motoru bez nutnosti měnit jeho rozměry je úprava tvaru rotorových drážek a použití jiného materiálu klece [9]. Původní motor je navržen s měděnou klecí, která je spájena z měděných tyčí a kruhů. Tyče jsou kruhového průřezu s průměrem 5 mm [2]. Indukce v rotoru je relativně malá, zvětšení plochy drážek by tedy mohlo vést k dobrým výsledkům. Změna plochy rotorových drážek i změna materiálu klece povedou ke změně rotorového odporu. To se projeví nejen změnou ztrát v kleci ale i změnou tvaru celé momentové charakteristiky. Při snížení rotorového odporu se sníží ztráty, v pracovní oblasti se sníží skluz, ale klesne záběrný moment a vzroste záběrný proud. Při úpravách klece je tedy nutné vzít v úvahu nejen pracovní oblast momentové charakteristiky, ale i záběrný moment a proud [7].

Použití hliníkové klece místo původní měděné zvýší rotorový odpor, to je ale kompenzováno řadou výhod. Především jde o výrazně jednodušší technologii výroby, což snižuje cenu. Hliníková odlévaná klec navíc umožňuje bezproblémové použití sešikmených rotorových drážek. Díky tomu lze potlačovat vliv parazitních momentů [7]. Nižší vodivost hliníku lze v tomto případě alespoň částečně kompenzovat zvětšením plochy tyčí. Hliníkové tyče navíc mohou být kratší než měděné, protože kruhy lité klece mohou být přímo na rotoru, zatímco tyče pájené měděné klece jsou delší, aby bylo možné připájet kruhy. Mezi kruhy a rotorem je tedy mezera.

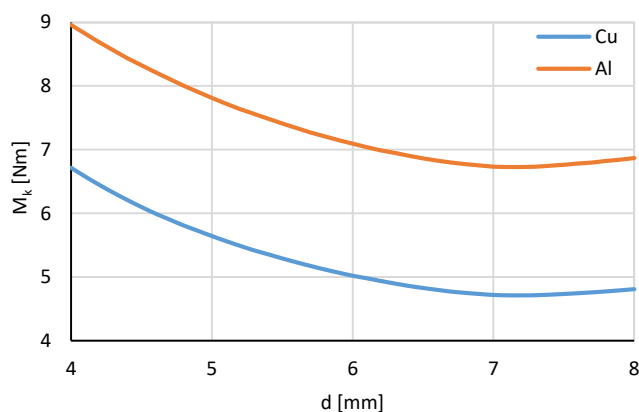
Značný vliv na vlastnosti motoru má nejen plocha rotorových tyčí ale i jejich tvar. Tvarem rotorových tyčí lze ovlivnit všechny vlastnosti stroje – účinnost, skluz, záběrný moment atd. [6]. Netypické použití analyzovaného motoru vyžaduje mnoho prostoru uprostřed rotoru, což značně omezuje výšku rotorového jha a rotorových zubů. Použití jiného než kruhového tvaru tyčí tedy není příliš výhodné.

Vliv průměru rotorových tyčí na momentovou charakteristiku a účinnost je znázorněn na Obrázcích 9–11. Výpočty byly provedeny pro měděnou i hliníkovou klec. Maxima účinnosti při použití měděné klece bylo dosaženo při průměru tyčí 6,7 mm. Při použití hliníkové klece se maximum účinnosti posunulo na 6,8 mm. Rozdíl mezi maximální účinností dosaženou s měděnou a s hliníkovou klecí je téměř jedno procento. Původní průměr tyče je 5 mm, při použití tyčí s průměrem optimalizovaným na dosažení nejvyšší účinnosti by se účinnost zvýšila

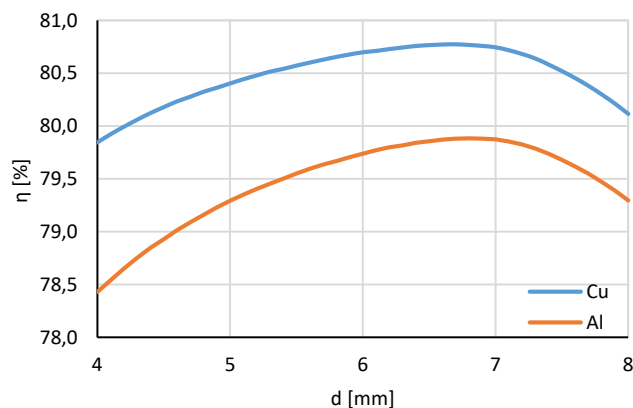
téměř o 0,5 %. Cenou za zvýšení účinnosti je ale snížení záběrného momentu. Záběrný moment by klesl o přibližně 0,9 Nm. Použití hliníkové klece místo měděné by záběrný moment zvýšilo o přibližně 2,2 Nm. Použití tyčí s vyšším průměrem by také vedlo ke zvýšení otáček při jmenovitém výkonu.



Obrázek 9: Závislost otáček při jmenovitém výkonu na průměru rotorových tyčí pro měděnou a hliníkovou klec (výška kruhů 5 mm, plechy M250-35A).

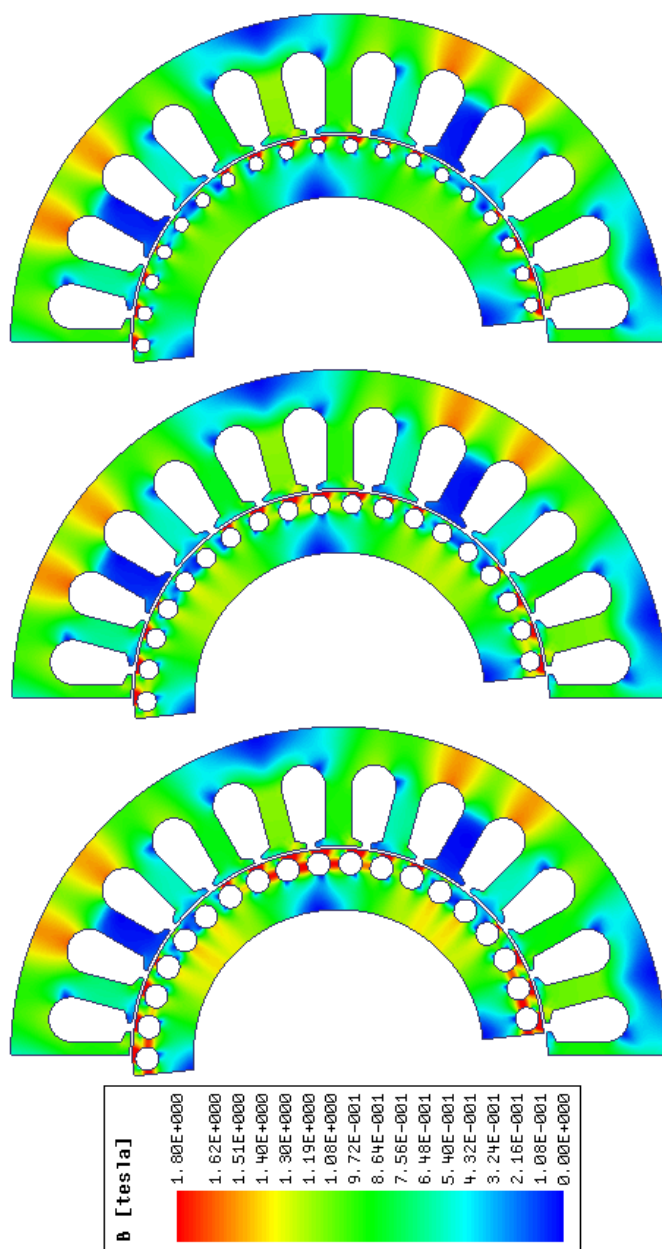


Obrázek 10: Závislost záběrného momentu na průměru rotorových tyčí pro měděnou a hliníkovou klec (výška kruhů 5 mm, plechy M250-35A).

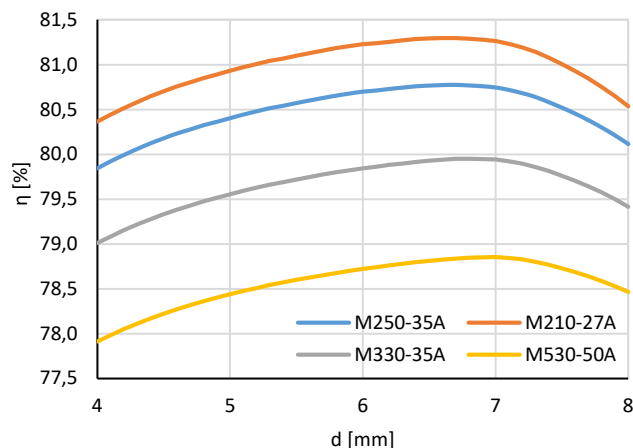


Obrázek 11: Závislost účinnosti při jmenovitém výkonu na průměru rotorových tyčí pro měděnou a hliníkovou klec (výška kruhů 5 mm, plechy M250-35A).

Při zvyšování průřezu tyčí dochází k poklesu rotorového odporu, ale také se zvyšuje sycení rotorových zubů i jha. Při použití tyčí širších než 6,7 mm u měděné klece nebo 6,8 mm u hliníkové klece je vliv snížení rotorového odporu převážen snížením magnetizační reaktance. Snížení magnetizační reaktance vede k nárůstu magnetizačního proudu, což se projeví zvýšením Joulových ztrát ve statorovém vinutí. Vliv zvýšení ztrát v železe vlivem vyššího sycení rotoru je zanedbatelný, protože rotorová frekvence je malá. Rozložení magnetické indukce v analyzované stroji je na Obrázku 12. Znárodněna je zde magnetická indukce při použití původních tyčí (šířka 5 mm), tyčí s průměrem odpovídajícím maximální účinnosti (6,7 mm) a maximálním uvažovaným průměrem (8 mm).



Obrázek 12: Indukce v magnetickém obvodu při jmenovitém výkonu při průměru rotorových tyčí 5 mm (nahore), 6,7 mm (uprostřed) a 8 mm (dole). Měděná klec, výška kruhů 5 mm, plechy M250-35A.



Obrázek 13: Závislost účinnosti při jmenovitém výkonu na průměru rotorových tyčí při použití různých plechů (měděná klec, výška kruhů 5 mm).

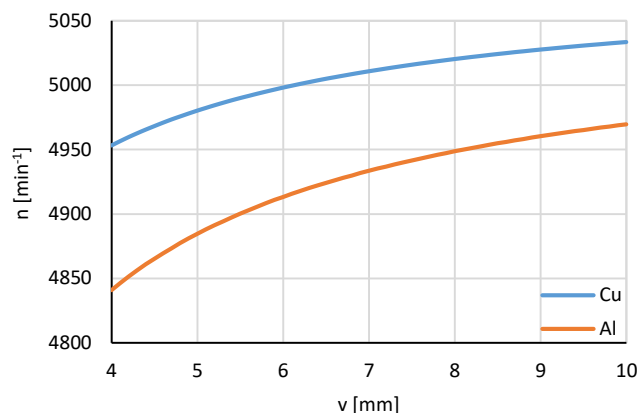
Z výše uvedeného je zřejmé, že optimální průměr rotorových tyčí bude ovlivněn vlastnostmi použitých plechů. Při použití jiných plechů, s jiným tvarem BH křivky a jinými měrnými ztrátami se změní optimální průměr rotorových tyčí i maximální účinnost. Jaký vliv na optimální průměr rotorových tyčí z hlediska účinnosti mají použité plechy je patrné z Obrázku 13. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo při použití plechů M210-27A, optimální průměr tyčí se nezměnil. Naopak nejnižší účinnost vyšla s plechy M530-50A a optimální průměr rotorových tyčí se zvýšil na 7 mm. Zvýšení optimálního průměru rotorových tyčí je způsobeno tím, že tyto plechy mají výhodnější tvar BH křivky pro vyšší sycení, tedy pro užší zuby a jho.

5 Vliv výšky kruhů

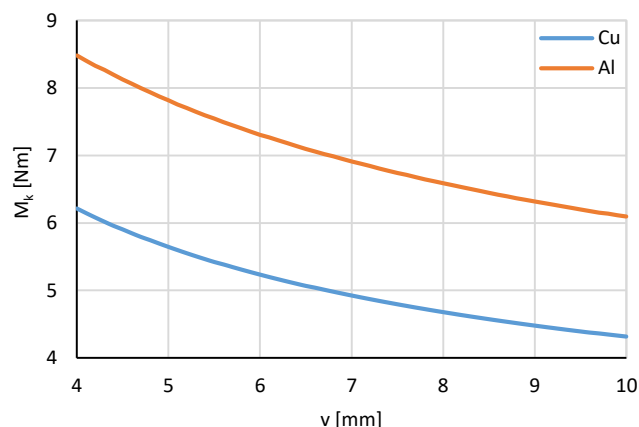
Vlastnosti asynchronního motoru s kotvou nakrátko mohou být také ovlivněny výškou kruhů [7]. Při zvětšování výšky kruhů se sice zvětšuje i axiální délka rotoru, celková délka stroje tím však nemusí být ovlivněna. Celkovou délku stroje určuje především stator s čely vinutí, které jsou ve většině případů vyšší než kruhy klece [7]. V analyzovaném stroji navíc nejsou na kružnicích lopatky, které často u malých strojů s hliníkovou klecí bývají odlévány přímo s klecí [7]. Díky tomu je prostoru pro kruhy dost. Při zvětšování výšky kruhů klesá rotorový odpor, stejně jako při zvětšování průměru tyčí. Na rozdíl od zvětšování průměru tyčí však nedochází k ovlivňování sycení rotoru, což je výhodné.

Vliv výšky kruhů na momentovou charakteristiku a účinnost analyzovaného motoru je zřejmý z Obrázků 14–16. S narůstající výškou kruhů klesá rotorový odpor, což se projevuje snižováním skluzu a zvyšováním účinnosti, ale také poklesem záběrného momentu. Závislost účinnosti na výšce kruhů nemá, na rozdíl od závislosti na průměru tyčí, maximum, po jehož dosažení by při dalším zvyšování výšky kruhů začala účinnost klesat. To je způsobeno tím, že nedochází k ovlivňování sycení rotoru. Na Obrázku 16 je však vidět, že vliv přírůstku výšky kruhů se snižuje s jejich výškou. Při změně výšky kruhů z pěti milimetrů na šest se účinnost zvýší o přibližně 0,2 % (v případě mě-

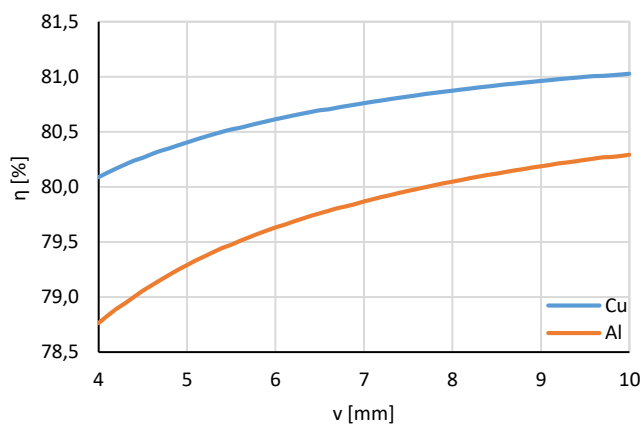
děné klece), ale při změně z devíti milimetrů na deset se účinnost zvýší již pouze o přibližně 0,05 %. Použití příliš vysokých kruhů tedy nemá smysl, protože účinnost tím již není nijak významně ovlivněna.



Obrázek 14: Závislost otáček při jmenovitém výkonu na výšce kruhů pro měděnou a hliníkovou klec (průměr tyčí 5 mm, plechy M250-35A).



Obrázek 15: Závislost záběrného momentu na výšce kruhů pro měděnou a hliníkovou klec (průměr tyčí 5 mm, plechy M250-35A).



Obrázek 16: Závislost účinnosti při jmenovitém výkonu na výšce kruhů pro měděnou a hliníkovou klec (průměr tyčí 5 mm, plechy M250-35A).

6 Závěr

Měřením upraveného vzorku na dynamometru bylo prokázáno, že motor postavený podle původního návrhu plně vyhovuje požadavkům této speciální aplikace. Provedená měření naznačují, že motor má dostatečné rezervy na to, aby byl schopný dlouhodobě pracovat s vyšším výkonem než jmenovitým. Nevýhodou analyzovaného stroje jsou jeho rozměry. Ty jsou ale ovlivněny speciální aplikací, pro kterou je určen a jejich zmenšení je problematické. Protože další zvětšování rozměrů je nežádoucí, byly při analýze možnosti, jak zlepšit parametry daného stroje brány v úvahu pouze ty, které nepovedou ke zvětšení jeho rozměrů. Konkrétně pak byly testovány tyto možnosti: změna materiálu magnetického obvodu, úprava průměru rotorových tyčí a úprava výšky kruhů klece nakrátko.

Při analýze vlivu použitých plechů bylo nutné zvažovat nejen měrné ztráty, ale i změny ve tvaru BH křivky. Nejvyšší účinnosti bylo dosaženo s plechy s nejnižšími měrnými ztrátami. Ale také se ukázalo, že použití vhodně zvolených plechů s větší tloušťkou a s vyššími měrnými ztrátami nemusí vést k výraznějšímu zhoršení parametrů.

Z analýzy průměru rotorových tyčí vyplynulo, že z hlediska účinnosti není původní průměr tyčí 5 mm optimální. Nejvyšší účinnosti při uvažování původních plechů bylo dosaženo s tyčemi o průměru 6,7 mm. Při dalším zvyšování průměru tyčí začala účinnost klesat, což je způsobeno zvyšováním sycení zubů a jha rotoru. Optimální průměr tyčí je ovlivněn použitými plechy. Cenou za zvýšení účinnosti tímto způsobem je snížení záběrného momentu.

Analýza vlivu kruhů ukázala, že zvětšování jejich výšky má smysl pouze do určité míry. Při jejím dalším zvyšování se vliv na účinnost postupně zmenšuje. Negativním dopadem zvyšování výšky kruhů je opět snižování záběrného momentu.

Při volbě opatření, která by vedla ke zvýšení účinnosti analyzovaného motoru nelze zohledňovat pouze vliv na jeho parametry ale i cenu. Kvalitnější plechy s nižšími měrnými ztrátami jsou dražší a navíc obvykle způsobují vyšší opotřebení stříhačích nástrojů. Stejně tak použití měděné klece stroj prodražuje. Zvýšení objemu mědi pro dosažení vyšší účinnosti vede k dalšímu zvýšení ceny. Z hlediska technologie výroby a také ceny je výhodnější použití lité hliníkové klece, i když se nedá dosáhnout tak vysoké účinnosti jako s klecí měděnou. Nižší elektrická vodivost hliníku může být částečně kompenzována tyčemi s větším průměrem a vyššími kruhy.

Hlavním přínosem článku je analýza možností zvýšení účinnosti asynchronního motoru ne zcela typické konstrukce. Motor je určen pro hybridní čerpací systém s oběžným kolem uvnitř rotoru. Toto uspořádání ovlivňuje rozměry jednotlivých částí motoru způsobem, který má negativní dopad na účinnost. Motor má malou axiální délku, což vede k nepříznivému poměru aktivních a neaktivních částí. Umístění oběžného kola doprostřed rotoru ovlivňuje tvar tyčí. Článek se zabývá tím, jak zvýšit účinnost bez nutnosti změny vnějších rozměrů motoru.

Tato analýza byla provedena prostřednictvím simulací pomocí nástroje RMXprt a metodou konečných prvků. Při těchto simulacích nebylo možné uvažovat všechny okolnosti, které mohou mít na motor vliv. Především jde o vliv technologie výroby.

Součástí provedené analýzy bylo i měření na již hotovém vzorku motoru. Měření bylo provedeno na dynamometru. Aby toto bylo možné provést, musel být motor upraven tak, aby ho bylo možné s dynamometrem spojit. Tato úprava a nepřítomnost vody uvnitř rotoru (na rozdíl od provozu v hybridním čerpacím systému) mohly mít vliv na výsledky měření.

Poděkování

Tento článek vznikl v rámci projektu LO1202 za finanční podpory Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy v rámci Národního programu udržitelnosti.

Literatura

- [1] F. POCHYLÝ, M. HALUZA, M. HUDEC, Č. ONDRŮŠEK. Vysoké učení technické v Brně, Brno, CZ: Hybridní čerpací systém. 29274, užitečný vzor. (2016)
- [2] R. JUCHELKA. *Návrh asynchronního motoru pro kaskádní systém čerpání kapalin*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 65 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [3] L. ABERTI, N. BIANCHI, A. BOGLIETTI, A. CAVAGNINO. *Core axial lengthening as effective solution to improve the induction motor efficiency classes*. Proceedings of the Conference on Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011.
- [4] S. PARK, H. LEE, S. HAHN. *Stator slot shape design of induction motors for iron loss reduction*. IEEE Transactions on Magnetics, sv. 31, pp. 2004-2007, květen 1995. ISSN 0018-9464.
- [5] S. PALKO, T. JOKINEN. *Optimisation of squirrel cage induction motors using finite element method and genetic algorithms*. Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, 1997. ISBN 0-85296-696-2.
- [6] G. N. PETROV. *Elektrické stroje 2*. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [7] I. P. KOPYLOV. *Stavba elektrických strojů*, Praha: SNTL, 1988. 685 s.
- [8] M. MACH, V. HÁJEK. *Impact of Magnetic Circuit Stee-Grade on Single-Phase Induction Motor Efficiency*. Proceedings of the International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2013. ISBN 978-80-248-2988-3.
- [9] M. MACH, V. HÁJEK. *Practical testing of methods for improvement of efficiency of a small induction motor*. Proceedings of the 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), Řím, 2015. ISBN 978-1-4799-7993-6.
- [10] F. DESORT. *Elektrotechnologie (Výroba elektrických strojů a přístrojů)*. Praha: SNTL, 1980, 344 s.
- [11] *Non oriented electrical steel Typical data*. Cogent, dostupné z: <https://cogent-power.com/downloads>, [cit. 22.8.2017]