



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

ELEKTRICKÝ SKÚTR S ASYNCHRONNÍM MOTOREM

Dalibor Červinka, Pavel Vorel

Abstrakt:

Příspěvek je věnován konstrukci elektrického skútru s nízkonapětovým asynchronním pohonem. Shrnuje základní dosahované elektrické a mechanické parametry. Skútr byl konstruován na ÚVEE s využitím zkušeností z předchozí konstrukce elektrického kola. Pozornost je věnována provedení mechanické konstrukce skútru - zvláště začlenění baterií, měniče, motoru a uspořádání převodových mechanismů. Dále je popsáno mechanické ovládání elektronických regulačních prvků pohonu tj. plynu a rekuperační brzdy. V příspěvku je řešena otázka volby počtu pólů, typové velikosti a napětově – kmitočtových poměrů použitého asynchronního stroje. Pozornost je věnována elektrickým parametrům silového obvodu trojfázového střídače s tranzistory MOS-FET a také základním parametrům digitálních řídicích obvodů střídače. Ty realizují řízení momentu motoru při optimalizaci účinnosti systému střídač + motor v širokém rozsahu otáček a momentu. Část příspěvku je věnována dosahovaným uživatelským parametrům stroje a zkušenostem s jeho provozem. Je nastíněno srovnání s předešlou konstrukcí elektrického kola. V závěru jsou rekapitulovány hlavní nedostatky dosavadní konstrukce a jsou popsány tendence dalšího vývoje.

Klíčová slova:

motor, převodovka, ozubený řemen, trakční akumulátory, střídač, sinusová pulsní šířková modulace, mikroprocesor, čítač, účinnost, asynchronní stroj, brzdy

1. Úvod

Moderní tranzistory MOS-FET s nízkým odporem v sepnutém stavu umožňují konstruovat výkonové střídače pro synchronní a asynchronní nízkonapětové regulované pohony vhodné k trakčním účelům. Tím jsou vytlačovány dosud dominující stejnosměrné pohony se svými klasickými problémy komutace (jiskření, životnost kartáčů a ztráty třením komutátoru).

Hlavní výhodou asynchronního trakčního motoru oproti stejnosměrnému je absence ztrát třením komutátoru. Ty jsou totiž v případě motoru na malé napětí a velký proud značné díky velké nutné ploše a přítlačné síle kartáčů. Je pravda, že účinnost moderního stejnosměrného stroje s permanentním buzením s magnety ze vzácných zemin je vyšší než účinnost asynchronního motoru s podobným jmenovitým momentem. Toto však platí pouze při jmenovitém zatížení motoru, kdy jsou ztráty třením komutátoru relativně nevýznamné, nikoli však při malých zatěžovacích momentech (jízda z kopce či po rovině).

Cílem popisovaného projektu bylo zkonstruovat elektrický skútr použitelný pro místní dopravu především v městském provozu. Prvotní realizovanou variantou bylo elektrické kolo. Výkon pohonu kola byl volen tak, aby bylo možno bez šlapání dosáhnout na rovině rychlosti cca 40km/h a stoupavosti cca 12%. Kapacita baterií umožňuje průměrný dojezd cca 45km. Základem konstrukce bylo horské kolo bez odpružení. Hmotnost pohonu (zejména baterií) je značná, což způsobuje špatné jízdní vlastnosti stroje. Proto bylo přikročeno ke stavbě nové varianty s odpruženým skútrovým rámem. Srovnání parametrů obou strojů je uvedeno v kap. 8.

2. Základní popis skútru

Stroj je vestavěn do klasického skútrového rámu z ocelových trubek a je vybaven plastovou kapotáží. Ovládání stroje bylo vyřešeno tak, aby se shodovalo s ovládáním běžného benzínového skútru. Je tedy použita pouze jednorychlostní převodovka (tj. bez možnosti řazení). Pohon se ovládá plynovou rukojetí. Odlišností je pouze přítomnost nožní rekuperační brzdy, která doplňuje konvenční brzdy ovládané páčkami na řídkách. Celkový pohled na skútr je na obr. 1.

Zadní kolo je letmo upevněno na blok obsahující převody a asynchronní motor. V ose zadního kola je umístěna převodovka. Ta je spojena s motorem pomocí ozubeného řemenu. Celý blok je kyvně uložen v rámu a odpružen jednou pružicí a tlumicí jednotkou. V prostoru za sedlem je umístěn třífázový střídač včetně veškeré řídicí elektroniky. Použitý algoritmus řízení vyžaduje informaci o aktuálních otáčkách motoru. V prostoru ventilátoru motoru je proto indukční snímač otáček.

Skútr je napájen z baterie 48V/40Ah. Ta je sestavena ze čtyř trakčních akumulátorů VARTA 12V/40Ah. Dva jsou umístěny pod sedlem, další dva pak na podlážce mezi chodidly řidiče.

Aby bylo možno skútr vybavit běžnými spotřebiči na 12V (světla, blinkry, klakson aj.), je pro napájení palubní sítě a řídicí elektroniky měniče použit spínaný zdroj 48V/12V. Ten je tvořen snižujícím měničem s regulačními obvody. Je schopen dodávat proud cca 15A. Toto řešení zamezuje nerovnoměrnému vybíjení baterií, ke kterému by docházelo v případě napojení palubní sítě přímo na jeden z akumulátorů 12V. Zdroj je umístěn vpředu, na přístupném místě pod přední kapotou, viz. obr. 2.

V tomto prostoru je také umístěno zařízení umožňující ovládní potenciometrů plynu a rekuperační brzdy pomocí lanovodů od plynové rukojeti a nožního brzdového pedálu. Nastavením potenciometrů se řídí kmitočet pomocného oscilátoru. Na základě velikosti tohoto kmitočtu získává mikroprocesor v řídicích obvodech střídače informaci o požadovaném momentu včetně znaménka, tj. včetně informace, je-li požadován pohon či rekuperační brzdění.



Obr. 1 Celkový pohled na skútr



Obr. 2 Detail zdroje 48V/12V a mechaniky ovládání plynu

3. Elektromotor a jeho parametry

Pro pohon byl použit klasický třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko. Volba počtu pólů plyne z následujících faktů:

- Velikost motoru závisí na jmenovitém momentu, nikoliv výkonu.
- Určitého výkonu lze při daném jmenovitém momentu dosáhnout změnou otáček, tj. změnou frekvence (při zachování sycení). Při možnosti měnit kmitočet odpadá tedy zdánlivá výhoda většího výkonu stroje s menším počtem pólů.
- Počet pólů nemá teoreticky vliv na poměr velikosti motoru ku jmenovitému momentu. V praxi s rostoucím počtem pólů moment poněkud roste (zvláště rozdíl mezi dvou- a čtyřpólovkou), a to díky lepšímu využití magnetického obvodu statoru.
- Rostoucí počet pólů při daném stejném výkonu a momentu znamená růst kmitočtu při stejném sycení. To představuje nárůst ztrát v železe statoru.

Na základě uvedených skutečností byl pro daný účel vybrán jako optimální čtyřpólový stroj. V konstrukci byl použit běžný prodáváný síťový čtyřpólový stroj, jenž byl převinut. Kvůli nízké požadované hmotnosti byl použit malý stroj s relativně malým maximálním momentem $M = 5,2 \text{ N.m}$ tj. s malým typovým výkonem P při činnosti se síťovým kmitočtem $f_s = 50 \text{ Hz}$. Ten činí pouze 750 W – při jmenovitých otáčkách $n_{as} = 1380 \text{ ot./min}$. Uvedené parametry platí pro zapojení do hvězdy tj. při amplitudě fázového napětí (napětí na cívce) $U_{max} = 230 \cdot \sqrt{2} \text{ V} = 325 \text{ V}$. Jmenovitá elektrická skluzová frekvence odpovídající f_s a n_{as} je 4 Hz .

Zvýšení výkonu z původních 750 W na zvolenou novou velikost $P' = 1800 \text{ W}$ bez jakéhokoli proudového přetížení bylo dosaženo zvýšením jmenovitých otáček. Nově požadované jmenovité otáčky jsou:

$$n_{as}' = n_{as} \frac{P'}{P} = 1380 \cdot \frac{1800}{750} \text{ ot./min} = 3312 \text{ ot./min} \quad (1)$$

Při zachování skluzového kmitočtu tomu odpovídá nový synchronní kmitočet $f_s' = 114 \text{ Hz}$. Stejnoseměrné napájecí napětí měniče (napětí meziobvodu) U_D je 48 V , s uvažováním různých napěťových úbytků a poklesu napětí při vybíjení akumulátoru lze počítat s hodnotou cca 43 V . Použitím vhodné metody vytváření PWM je maximální dosažitelná amplituda 1. harmonické sdruženého napětí rovná U_D . Při této nové amplitudě a novém jmenovitém synchronním kmitočtu je nyní maximum časového integrálu statorového napětí motoru k -krát menší, než při standardním provozu na síť. Při uvažovaném zapojení motoru do trojúhelníku bude k :

$$k = \frac{f_s'}{f_s} \cdot \frac{U_{max}}{U_D} = \frac{114}{50} \cdot \frac{325}{43} = 17 \quad (2)$$

Proto bylo třeba zmenšit rovněž 17-krát počet závitů statorových vinutí pro dosažení stejného sycení (tj. i momentu) jako v původním motoru. K tomu potřebná amplituda magnetizačního proudu se přitom zvýší také 17-krát. Pro dosažení téhož momentu bude rovněž nyní potřebná 17-krát větší činná složka proudu. Celkově bude tedy potřebná 17-krát větší amplituda proudu statorovým vinutím. Pro zachování stejné proudové hustoty ve vodičích bylo nutno použít vodič vinutí s 17-krát větším průřezem. Zaplnění drážek (celkový průřez mědi vinutí) zůstalo stejné, neboť je 17-krát méně vodičů s 17-krát větším průřezem. Jsou tedy zachovány i stejné ohmické ztráty ve vinutí.

Tab. 1 udává srovnání teoreticky vypočtených parametrů původního a převinutého stroje pracujícího za uvedených změněných podmínek. Je nutné si uvědomit, že **uvedené změny parametrů nesouvisejí vůbec se snížením napěťové hladiny, ale pouze**

se zvýšením jmenovitého synchronního kmitočtu při zachování velikosti sycení. Je zřejmé, že tím došlo ke zvýšení ventilačních ztrát a hysterezních a vířivých ztrát ve statoru. Nicméně díky zvýšení výkonu tím celková účinnost stroje nebyla snížena, spíše se mírně zlepšila (viz. tab. 1).

	Původní stroj	Upravený stroj
Jmenovitý moment [N.m]	5,2	5,2
Jmenovitý skluz [Hz]	4	4
Jmenovitý výkon [W]	750	1800
Jmenovitý příkon [W]	1054	2350
Ohmické ztráty statoru [W]	159	159
Ohmické ztráty rotoru [W]	65	65
Ztráty v železe a ventilační [W]	80	325
Účinnost [%]	71	77
Sdružený magnetiz. proud [A]	2,6	45

Tab. 1 Parametry původního a převinutého stroje

Zvláště důležité je srovnání magnetizačního proudu, jenž je nyní 17-krát vyšší, než v původním motoru tj. má amplitudu 45 A místo 2,6 A. *Velký magnetizační proud asynchronního motoru na malé napětí je jeho hlavní nevýhodou v porovnání s motorem synchronním.* Velký magnetizační proud způsobuje totiž výkonové ztráty v silovém obvodu měniče, což kazí účinnost měniče a tím i celého pohonu jako soustavy měniče a motoru. (Samotný asynchronní stroj má sám o sobě poněkud nižší účinnost než synchronní, ovšem nezávisle na velikosti napěťové hladiny tj. i nezávisle na velikosti magnetizačního proudu.)

Krátkodobé zvýšení momentu až na 10,4Nm je dosaženo jednak mírným přesycením motoru a jednak zvýšením skluzu nad 4Hz. Tento přetížený režim je softwarově omezen na oblast otáček od nuly do cca 1700ot/min, tj. aby výkon nikdy nepřesahoval 1,8kW (z důvodu zamezení nadproudu z baterií). Motor je proti přehřátí v tomto režimu chráněn tepelným spínačem, jenž při překročení teploty vinutí 130°C zablokuje měnič.

4. Základní parametry silového obvodu měniče

- Třífázový střídač, tranzistory MOS-FET – vždy 2x IXFN180N20 paralelně. Parametry paralelní dvojice: $U_{DSS} = 200 \text{ V}$, $I_D = 360 \text{ A}$ (při teplotě pouzdra 20 °C), R_{Dson} asi 5 mΩ
- Napájecí napětí meziobvodu (4 trakční olověné akumulátory 12 V/40 Ah): 48V
- Maximální amplituda sdruženého proudu motoru (při momentu 10,4Nm): 100A

- Nosný kmitočet PWM: 2144Hz
- Maximální ztráty vedením na polovodičích (při max. momentu): 80W
- Maximální přepínací ztráty na polovodičích (při max. momentu): 110W
- Výška napěťového překmitu při vypnutí tranzistoru (při 100 A): 30V

5. Regulační algoritmus

Pro řízení pohonu je použit algoritmus řízení momentu stroje při zajištění optimální účinnosti systému měnič + stroj v širokém rozsahu momentu a otáček. V [1] bylo vysvětleno, že optimalizace účinnosti η spočívá v nalezení dvou funkcí:

$$U = f(T, n_{as}) \Big|_{\eta=\max.} \quad (3)$$

$$s = f(T, n_{as}) \Big|_{\eta=\max.} \quad (4)$$

kde:

T – žádaná hodnota momentu

n_{as} – skutečná hodnota otáček

U – amplituda sdruženého napětí

s - skluz

Tyto funkce byly experimentálně získány měřením na konkrétním měniči a motoru.

Jednočipový mikropočítač stanovuje potřebnou hodnotu amplitudy a synchronního kmitočtu na základě požadovaného momentu (plynová rukojeť) a skutečných otáček (čidlo otáček) pomocí funkcí (3) a (4). Ty jsou navzorkovány v paměti. Pro zajištění dostatečné přesnosti při úspoře prostoru paměti je použita lineární aproximace hodnot mezi vzorky. Snímač otáček pracuje jako čítač impulsů. Doba čítání se adaptivně mění. Během akcelerace nebo brždění je krátká, informace o otáčkách je rychle k dispozici za cenu menší přesnosti. Jestliže se akcelerace snižuje, doba čítání se prodlužuje, aby bylo dosaženo lepší přesnosti. Toto řešení je kompromisem pro dosažení vyhovující dynamiky pohonu a přesnosti čtení otáček.

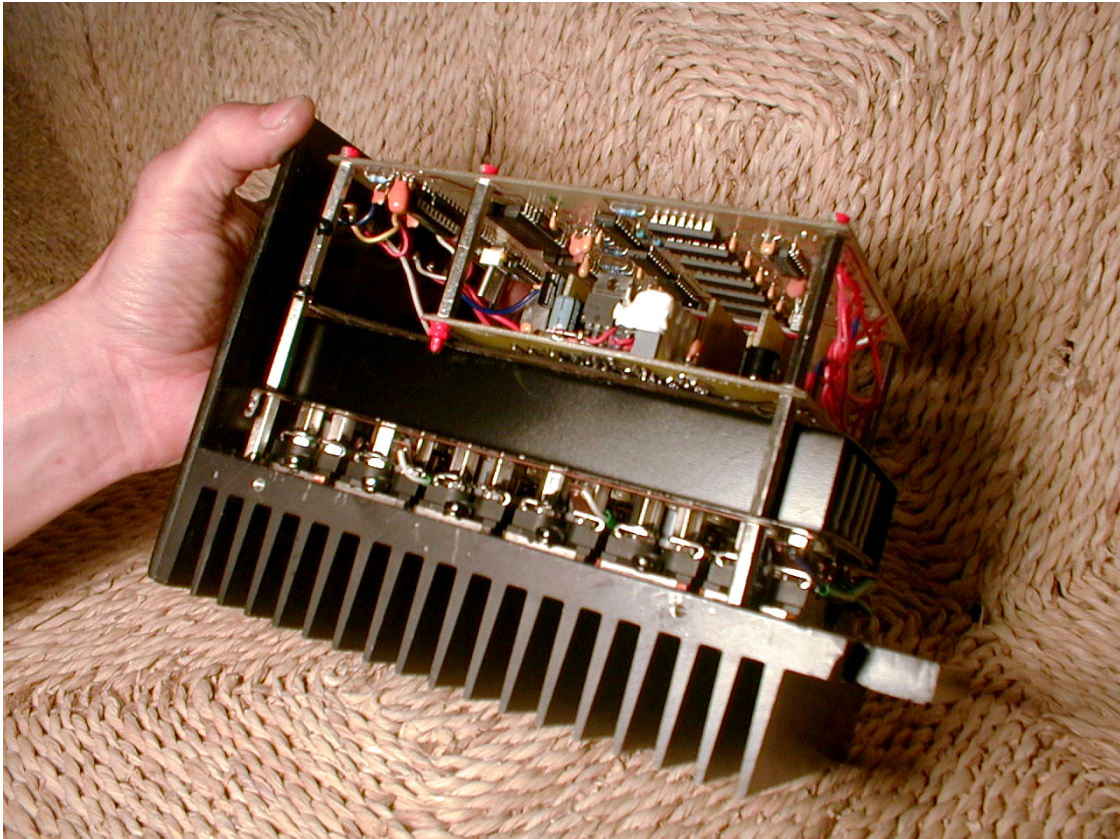
Popsaný regulační systém nevyžaduje žádná proudová čidla. To je cenově výhodné vzhledem k velkým proudům vyskytujícím se v pohonu skútru.

6. Základní parametry řídicího systému

- žádaný moment nastavitelný v 16 diskretních úrovních
- možnost rekuperačního brždění přepnutím polarity skluzu
- rozsah otáček motoru: 0 – 7320ot./min
- blokování měniče – tepelnou a přepěťovou ochranou i ručním ovládním

- unipolární sinusová PWM, algoritmus s max. modulačním činitelem $M_{max} = 1$
 - dynamika amplitudy napětí: 8bitů
 - dynamika modulačního signálu: 5bitů
 - dynamika PWM: redukována na 10bitů

Pohled na střídač bez krytu je na obr. 3.



Obr. 3 Střídač

7. Volba mechanických převodů

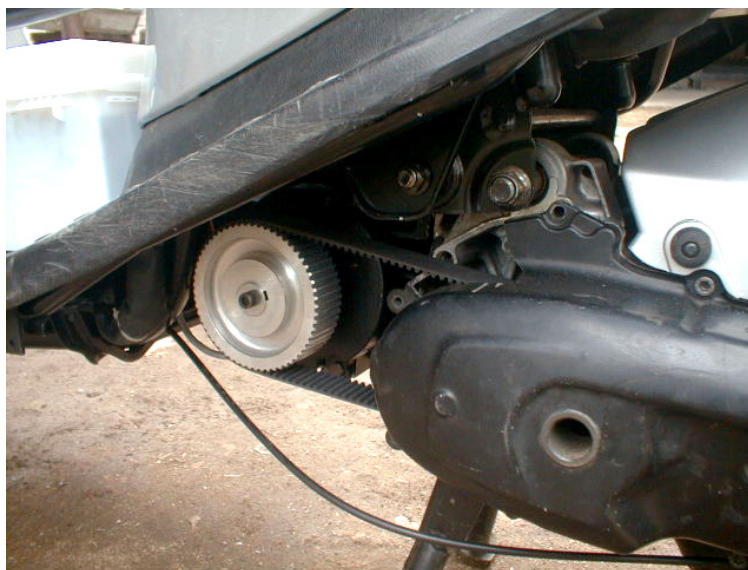
Vzhledem k malému jmenovitému momentu použitého elektromotoru by bylo výhodné použití vícerychlostní převodovky kvůli dosažení dobré stoupavosti a na druhé straně dostatečné rychlosti při jízdě po rovině či z kopce. Pro zjednodušení mechanické konstrukce a pro zachování charakteru skútru bez řazení byla použita jednorychlostní převodovka. Vzhledem k tomu, že elektrický pohon umožňuje zatěžování jmenovitým momentem už od nulových otáček, nevzniká při použití jednorychlostní převodovky problém s rozjezdem charakteristický pro spalovací motor.

Volba převodového poměru je kompromisem mezi dosažitelnou stoupavostí a maximální rychlostí stroje. Ze známé hmotnosti stroje s jezdcem (220kg), maximálního momentu motoru (10,4Nm) a požadované stoupavosti 11% byl vypočten celkový potřebný převodový poměr 7,3.

V náboji zadního kola je vestavěna převodovka s převodem 11. Ozubený řemen spojující motor s touto převodovkou proto musí mít převod 0,67.

Výhodou ozubeného řemenu oproti řetězu je menší hlučnost a bezúdržbový provoz. Je použit moderní řemenový převod typu HTD fy. Walther & Flender zajišťující uspokojivou účinnost i při chodu s malým zatěžovacím momentem.

Volba průměrů řemenic, modulu ozubení a šířky řemenu byla provedena s ohledem na přenášené síly a maximální obvodovou rychlost řemenu. Návod na výpočet lze nalézt v [4].



Obr. 4. Detail převodu

8. Uživatelské parametry

	skútr	kolo
výkon motoru	1,8kW	900W
hmotnost stroje	cca 140kg	cca 70kg
maximální rychlost	60km/h	45km/h
svahová dostupnost	11% při max. rychlosti 17km/h	12% při max. rychlosti 17km/h
akumulátory	4 x VARTA 12V 40/50Ah, trakční provedení	2 x VARTA 12V 40/50Ah, trakční provedení
dojezd	35km	45km
brzdy	1) přední kotoučová kapalinová fy. BREMBO 2) zadní bubnová 3) rekuperační	1) V-brzdy 2) rekuperační

Tab. 2 Uživatelské parametry elektrického kola a skútru

9. Další vývoj

Popsané řešení převodů není optimální. Z hlediska účinnosti je nevhodné kaskádní řazení převodu „do rychla“ a zpět „do pomala“. Toto řešení bylo zvoleno jako prozatímní, aby se využila existující převodovka zabudovaná v zadním kole. Měřením odběru z baterií při chodu naprázdno (zvednuté zadní kolo) bylo zjištěno, že v těchto převodech vzniká při plných otáčkách motoru ztrátový výkon cca 600W.

V dalším vývoji bude převod řešen jako jediný řemenový převod s převodem 7,3 „do pomala“. Mělo by tím dojít k podstatné redukci zmíněných mechanických ztrát a ke znatelnému zlepšení dojezdu stroje.

Pro usnadnění praktického používání skútru je nutné jej v budoucnu ještě vybavit síťovou „on-board“ rychlonabíječkou, která bude řešena jako spínaný zdroj. Dalším užitečným zařízením, na němž se pracuje bude palubní počítač monitorující energetickou bilanci baterií. Na základě získávaných údajů bude možno nejen předpovídat dojezd, ale i dlouhodobě sledovat stav baterií.

Článek vznikl za podpory grantových projektů CEZ J22/98: 26 22 000 10 a GAČR 102/00/DO13.

10. Použitá literatura

- [1] Vorel, P.: A low voltage asynchronous drive. Proceedings of the conference PEMC 2000. Košice 2000. str. 7-120
- [2] Vorel, P.: Elektromoped s asynchronním motorem. Sborník celostátní konference o elektrických pohonech v Plzni. Plzeň 2001
- [3] Vorel, P., Červinka, D.: Electric scooter with an induction motor. Proceedings of the conference EDPE 2001. Košice 2001
- [4] Powergrip HTD-Zahnriemen-Antriebe, katalog fy. Walther&Flender GMBH 2000