

Senzor polohy rotoru vysokootáčkového elektromotoru

Ing. Vladislav Skála, Ing. Tomáš Koudelka

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Abstrakt

Cílem této práce bylo navrhnout a ověřit snímací systém pro elektromotor dosahující až 100 000 ot./min. Pro uvažovanou koncepci elektromotoru byl stanoven požadavek na přesnost polohy při rotaci rotoru provozními otáčkami, tedy požadována je dostatečně krátká reakční doba senzoru. S ohledem na řídicí systém dále vyplynul požadavek na tvar výstupního signálu. Cílem práce bylo navrhnout vhodné varianty senzoru a provést jejich praktické ověření použitelnosti v dané aplikaci.

Klíčová slova

Elektromotor, elektrotechnika, optický snímač.

1. Úvod

Jednou z cest, jak zvýšit užité vlastnosti výrobků je intenzifikace jejich užitečných vlastností. V oblasti elektromotorů je současné době jednou z cest, kterou se vývoj ubírá, je zvyšování počtu otáček za minutu. Rovněž praxe mnoha průmyslových aplikací a moderních výrobních technologií požaduje vysoké otáčky. Vzhledem k rozvoji řídicí elektroniky se v současné době prosazují elektromotory střídavé, a to i v oblasti vysokootáčkových strojů. Jedním z problémů, který je třeba řešit, je snímání polohy rotoru. Informace o poloze rotoru je klíčovým parametrem pro řídicí elektroniku motoru. Ke snímání polohy rotoru je možné použít zpětnou vazbu z elektrického obvodu motoru nebo je možno použít vnější senzor polohy rotoru.

1.1 Cíl práce

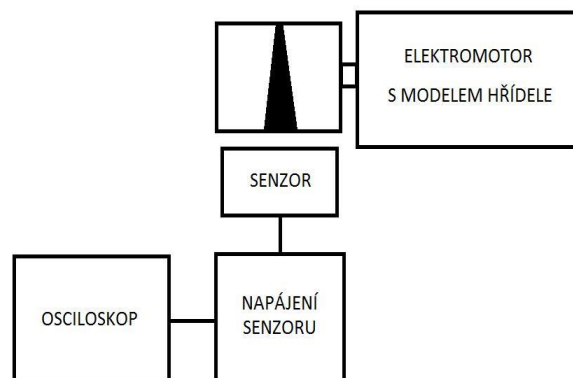
Cílem této práce bylo navrhnout a ověřit snímací systém pro elektromotor dosahující až 100 000 ot./min. Pro uvažovanou koncepci elektromotoru byl stanoven požadavek na přesnost polohy 6° (při rotaci rotoru provozními otáčkami), požadována je tedy dostatečně krátká reakční doba senzoru. S ohledem na řídicí systém dále vyplynul požadavek na tvar výstupního signálu. Požadován je signál s lineárním průběhem, případně signál, který se svým tvarem blíží sinusovému. Nevýhodou sinusového signálu je nejednoznačnost stanovení fáze, a tím i úhlové polohy rotoru při použití jediného senzoru. Z toho případně vyplývá nutnost použití dvou senzorů, které zajistí možnost vyhodnocovat správnou fázi sinusového signálu ze vzájemného fázového posunu dvojice signálů.

1.2 Senzor

Zamýšlený elektromotor bude nedílnou součástí turbinové energetické jednotky, byl navržen optický bezkontaktní systém. Jako optický senzor bylo pro experimenty použito odrazné čidlo CNY70, viz [1]. Čidlo má vlastní zdroj snímacího světelného svazku, který se odráží od snímaného povrchu a dopadá na detektor čidla. Čidlo pracuje v infračervené oblasti. Výstupní napětí na detektoru je závislé na intenzitě dopadajícího odraženého světla. Ke snímání polohy rotoru bude sloužit detekční obrazec umístěný na modelu hřídele o průměru 10mm. Model je poháněn DC elektromotorem, viz obr. č. 1. a 2.



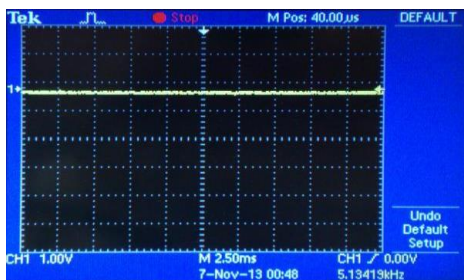
Obr. č. 1 Model hřídele s upraveným povrchem



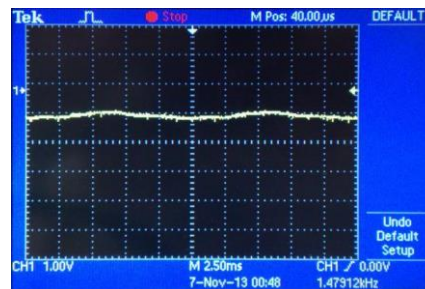
Obr. č. 2 schéma experimentálního zařízení

2. Měření

Nejprve byla ověřena možnost měřit otáčky rotoru. Měřicím programem byl snímán přímo napěťový výstup ze senzoru. Senzor mění úroveň výstupního napětí od 0V do 5V. K záznamu a zobrazení signálu byl použit osciloskop. Ze senzoru je získáván spojitý napěťový signál a ten je následně vzorkován. Nejprve byla ověřena správná funkce celého měřicího řetězce. Na snímaném válcovém povrchu opatřeném polomatným bílým akrylovým nástřikem (viz obr. č. 1) bylo provedeno kontrolní měření pro vzdálenosti 2,5mm a 3,5mm, které ověřilo konstantní úroveň výstupního napětí senzoru a přijatelnou radiální házivost měřicí válcové plochy modelu hřídele. viz obr. č. 3 a 4.



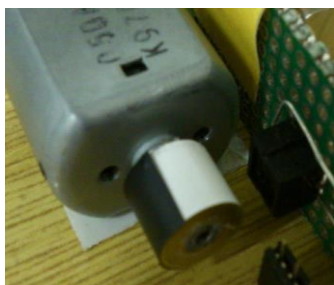
Obr. č. 3 Kontrolní měření 2,5mm



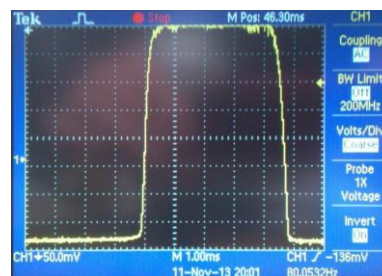
Obr. č. 4 kontrolní měření 3,5mm

2.1 Přechodové vlastnosti senzoru

Dále byly ověřeny přechodové vlastnosti čidla. Tento experiment také zahrnul další vlivy, mimo jiné i vliv průměru hřídele, resp. poloměru zakřivení odrazné plochy. K tomuto účelu bylo sestaveno jednoduché měřící zařízení. Měření přechodových vlastností bylo provedeno na rotujícím odrazném („závěrkovém“) válci. Pro měření přechodové charakteristiky byla použita válcová odrazná plocha, jedna polovina byla opatřena povrchem s nízkou světelnou odrazivostí. Odrazný obrazec měl tedy tvar obdélníku. Takto provedená odrazná plocha realizuje Heavisideovu funkci, viz obr. č.5.



Obr. č.5 Uspořádání experimentu pro měření přechodové charakteristiky

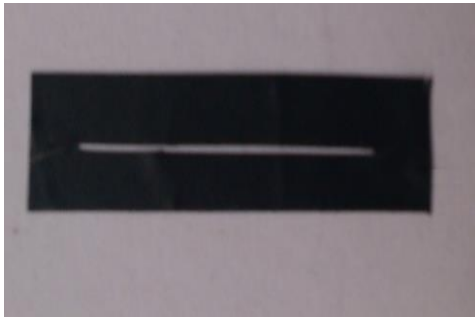


Obr. č. 6 Přechodová charakteristika

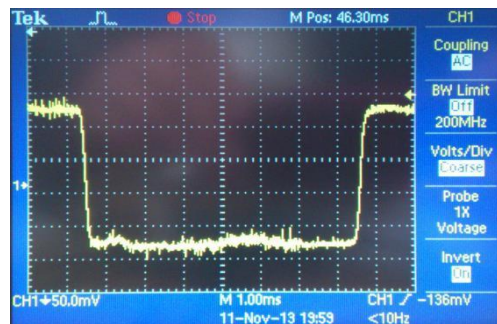
Výsledkem tohoto experimentu je tedy přechodová charakteristika snímače v této konfiguraci. Výsledky experimentů - viz obr. č. 6. Výrobce senzoru udává jeho mezní (cut off) frekvenci 40kHz, tzn. velikost jeho časové konstanty lze odhadnout na cca 0,17ms. Ze záznamu osciloskopu byla stanovena velikost časové konstanty celého snímacího řetězce 0,2ms. Senzor byl umístěn ve vzdálenosti 3mm od snímaného povrchu. Průběh přechodové charakteristiky je exponenciální.

Z tohoto důvodu byla dále experimentálně ověřena možnost zmenšení časové konstanty snímače v dané aplikaci s modelem hřídele o průměru 10mm cca na třetinu původní hodnoty zařazením vymežovací šterbiny o šířce cca 0,3mm do optické cesty, viz obr. č. 7. Šterbina zúží vysílaný světelný svazek, což má pozitivní efekt zejména v oblasti hran signálu, kdy jsou

hrany výrazně ostřejší, viz obr. č. 8. Nejdůležitějším výsledkem tohoto experimentu je ověření možnosti zmenšení časové konstanty při přijatelné napěťové úrovni výstupního signálu.



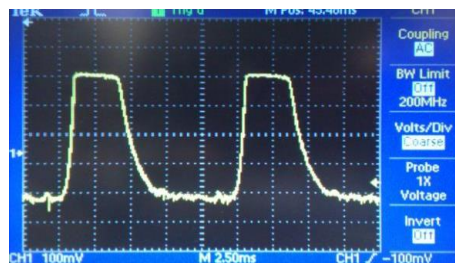
Obr. č.7 Vymezovací štěrbina 0.3mm



Obr. č. 8 Výstupní signál, 5000 ot./min

2.2 Poloha senzoru

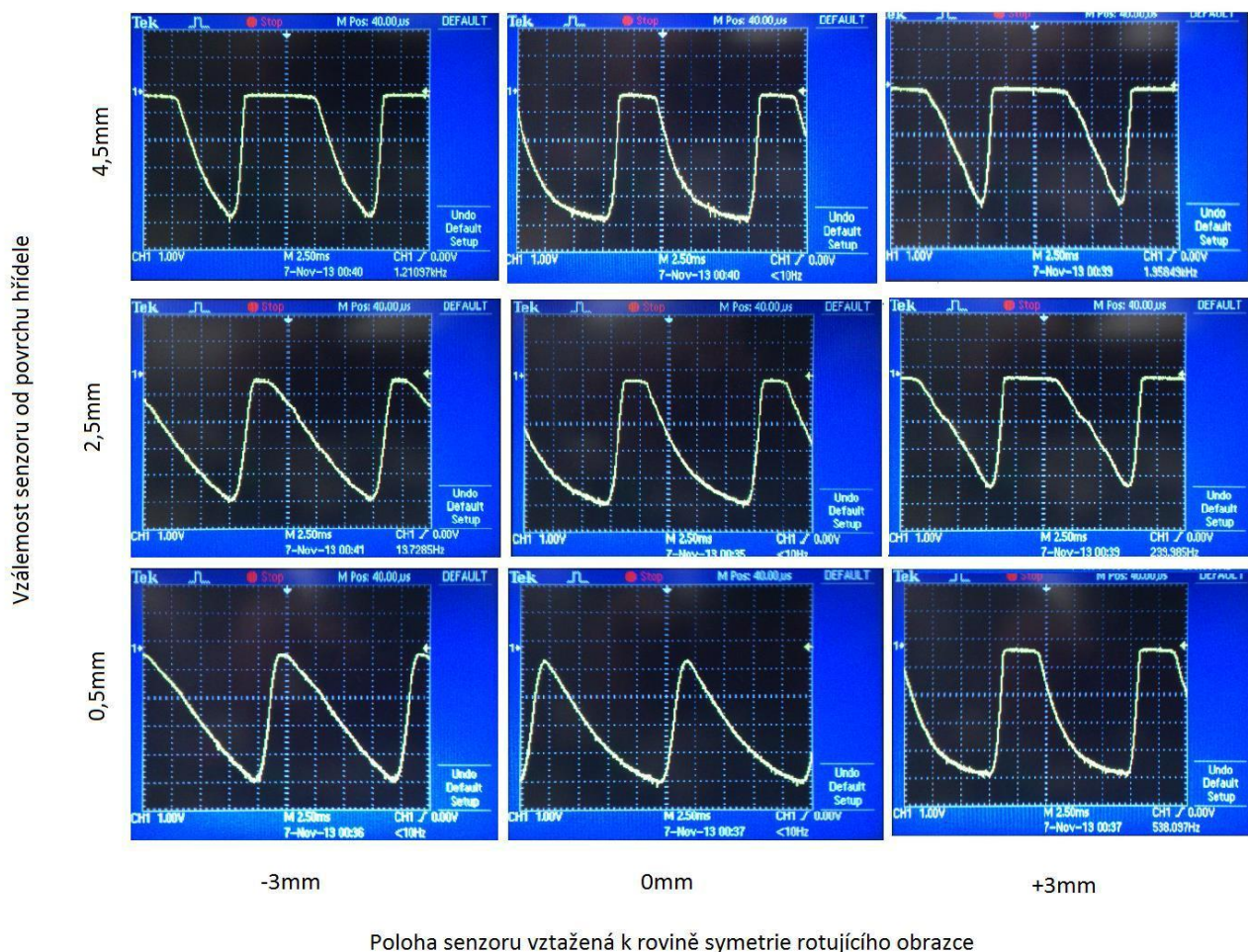
Z výsledků úvodních testovacích měření jednoznačně vyplývá, že výstup (tvar a napěťová úroveň signálu) použitého optického senzoru je nejvíce citlivý na změnu polohy vůči snímanému povrchu. Z tohoto důvodu bylo provedeno další měření (se senzorem bez vymezovací štěrby), jehož cílem bylo určit závislost výstupního signálu na poloze senzoru vůči odraznému válci. Výrobce doporučené umístění senzoru do vzdálenosti menší než 0,5mm od povrchu snímače se ukázalo jako nevhodné pro danou aplikaci. Výstupní signál sice vykazuje největší amplitudu, ale tvar signálu je značně nelineární, viz obr. č. 8.



Obr. č. 8 Senzor ve vzdálenosti 0,5mm

Konstantní úseky odpovídají úhlovým polohám, v nichž je značka mimo oblast, kterou je optický senzor schopen sledovat. Pro měření v takto nízké vzdálenosti je nutné použít velmi úzkou značku. Výhodou je, že značka může být velmi malá a málo kontrastní, což může být výhodné při snímání v reálných aplikacích, kde může být obrazec např. vygravírován do kovového povrchu.

Byla proměřena závislost na poloze senzoru vůči modelu hřídele, pro test byla použita trojúhelníková značka, viz obr. č. 10, výchylky +3mm o obou osách od nominální polohy 2,5mm od povrchu a od roviny rotující značky.



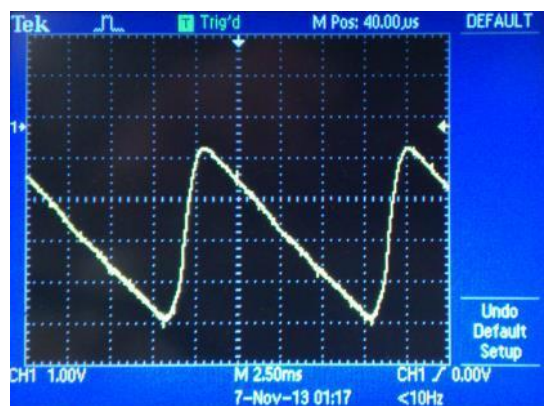
Obr.č. 10 Závislost výstupního signálu na poloze senzoru

2.3 Periodická značka

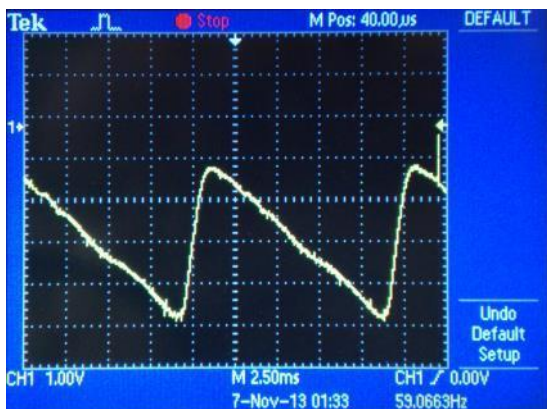
Vzhledem k současným technologickým možnostem při použití gravírování pro výrobu značky se jeví jako výhodné použít periodickou značku ve směru osy rotace, viz obr. č. 11 a zcela tak eliminovat vliv posunutí v tomto směru, jak je dobře patrné z obrázků č. 12, 13 a 14. Pro toto ověřovací měření byla použita periodická trojúhelníková značka.



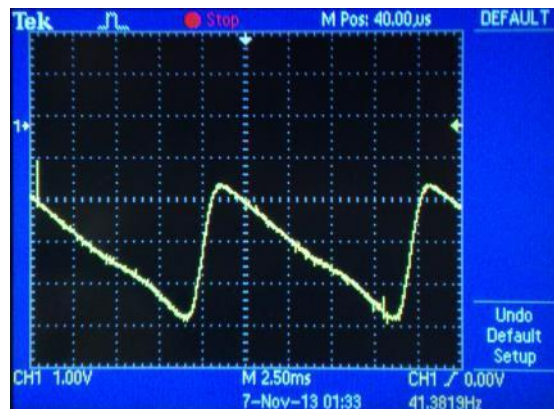
Obr. č. 11 Periodická značka



Obr. č. 12 Posunutí 0mm od ve směru osy rotace, 1,5mm od snímaného povrchu



Obr. č. 13 Posunutí +3mm od ve směru osy rotace, 1,5mm od snímaného povrchu



Obr. č. 14 Posunutí -3mm od ve směru osy rotace, 1,5mm od snímaného povrchu

V mnoha případech může být, např. z technologických důvodů výhodné použít jednoduchou značku. Byla tedy zjišťována závislost výstupního signálu na posunutí optické osy senzoru od roviny symetrie (rotujícího) obrazce. Jako nejlepší řešení se tedy jeví umístění snímače ve vzdálenosti 1,5-3mm od snímaného povrchu. Nižší vzdálenost než 1,5mm vyžaduje použití velmi úzkého obrazce, na němž je hledání vhodného průběhu jeho šířky obtížnější – obrazec musí být vyroben velmi přesně, což není pro úvodní experimenty z praktických důvodů výhodné. Nastavená vzdálenost má značný vliv na amplitudu i tvar výstupního signálu. V uvedeném rozsahu vzdáleností je tvar signálu přijatelný. Vzhledem k dostatečné rozlišovací schopnosti použitého AD převodníku amplituda výstupního signálu není důležitý parametr. Z tohoto důvodu bude tento parametr vypuštěn z další optimalizace.

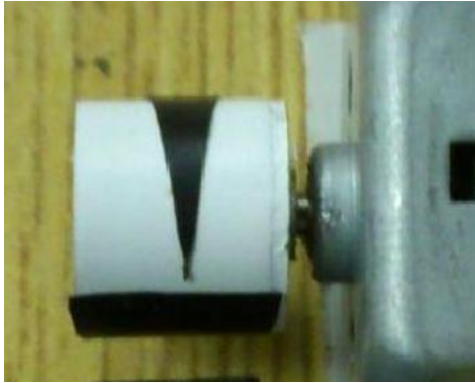
Lze tedy konstatovat významnou závislost výstupního signálu na vzdálenosti od snímaného povrchu i na vzájemné poloze snímané značky a senzoru. V praktické aplikaci snímače bude nutné zajistit osazení snímače v přesné poloze, případně individuální kalibrace každého jednotlivého senzoru po jeho osazení.

2.4 Tvarování výstupního signálu

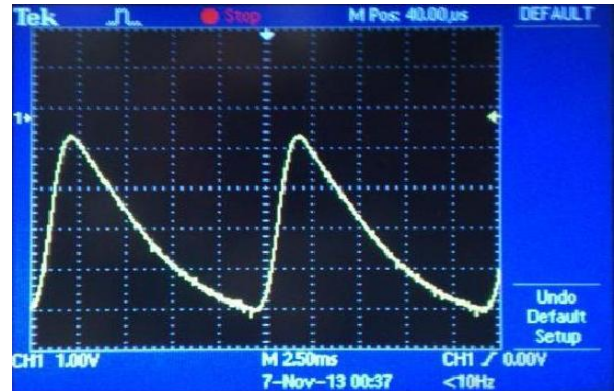
Pro získání výstupního signálu s požadovaným tvarem bude potřebné navrhnout tvar snímaného obrazce.

2.4.1 Pilovitý výstupní signál

Pro získání pilovitého průběhu byl pro první přiblížení nejprve použit odrazný obrazec ve tvaru rovnoramenného trojúhelníku (viz. obr. č. 15) umístěného na povrchu odrazného válce ve směru jeho rotace. Typický průběh signálu je na obr. č. 16. Opět se významně projevil vliv vzdálenosti senzoru, který dominantně ovlivňuje zejména tvar signálu.



Obr. č. 15 Odrazný obrazec



Obr. č. 16 Pilovitý průběh
výstupního signálu.

Dále bylo navrženo několik geometrických modifikací základního trojúhelníkového tvaru odrazného obrazce. Modifikace spočívaly v zúžení nebo rozšíření trojúhelníka v jeho „středové části“ nahrazením odvěsen rovnoramenného trojúhelníku křivkami (kruhovými oblouky) tak, aby byl obrazec vždy symetrický. Obrazce byly postupně umístěny na testovací rotující válcové ploše. Na základě

výsledků měření nebylo možno jednoznačně vybrat nejvhodnější tvar obrazce, neboť se ukázalo, že vliv polohy senzoru má výrazně dominantnější vliv na tvar signálu. Optimalizace tvaru obrazce může mít smysl pouze v případě požadavku na přesný tvar signálu a odstranění případných nelinearit zejména v okolí hran signálu, bude-li požadován např. čistě lineární průběh výstupního signálu.

2.4.2 Sinusový výstupní signál

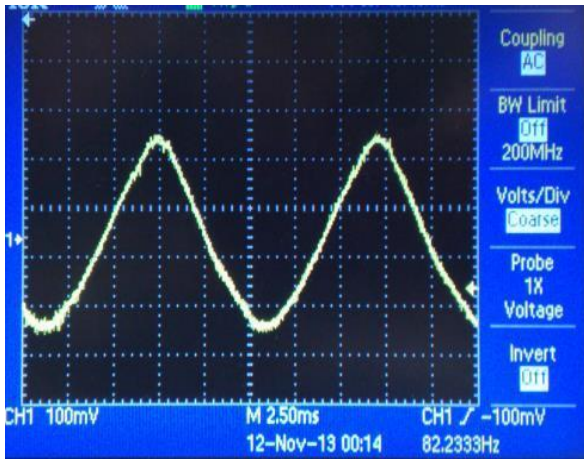
Pro získání přibližně sinusového průběhu výstupního signálu byl pro první přiblížení nejprve použit odrazný obrazec ve tvaru kosočtverce, viz. obr. č. 17, umístěný delším rozměrem po obvodu hřídele. Rovněž bylo otestováno použití inverzního obrazce, viz obr. č. 18. Výsledné průběhy signálu jsou patrné z obr. č. 19 a 20.



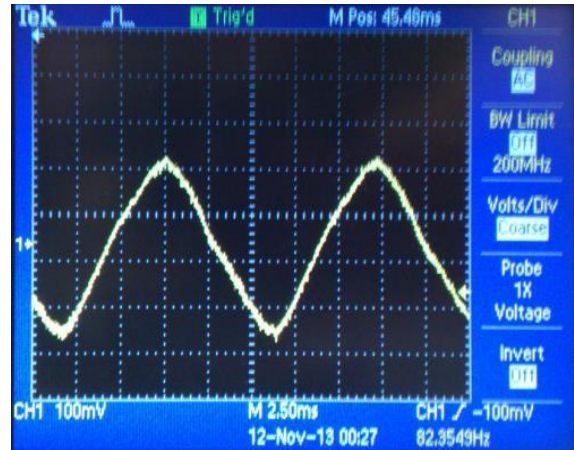
Obr. č. 17 Odrazný obrazec pro signál
se sinusovým průběhem



Obr. č. 18 Inverzní odrazný obrazec pro
signál se sinusovým průběhem

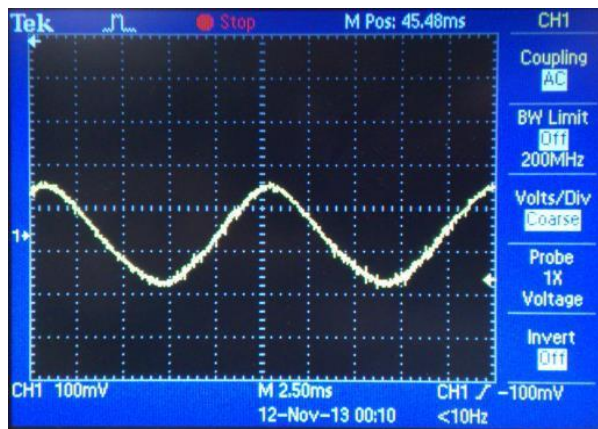


Obr. č 14 Výstupní signál pro obrazec na obr. č. 19



Obr. č. 15 Výstupní signál pro inverzní obrazec na obr. č. 20

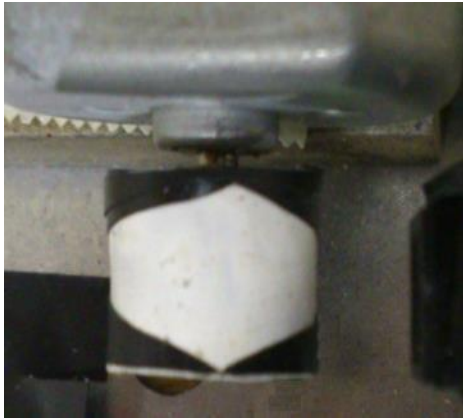
Po vyladění je možné obdržet přibližně sinusový výstupní signál, viz obr. č. 21, je patrné, že se výstupní signál poměrně dobře blíží sinovému průběhu.



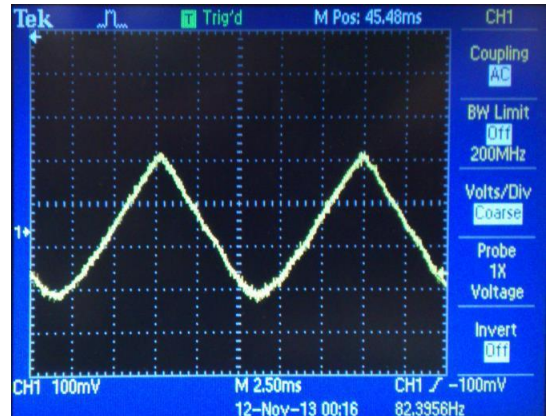
Obr. č. 21 Sinusový výstupní signál

2.4.3 Bilineární výstupní signál

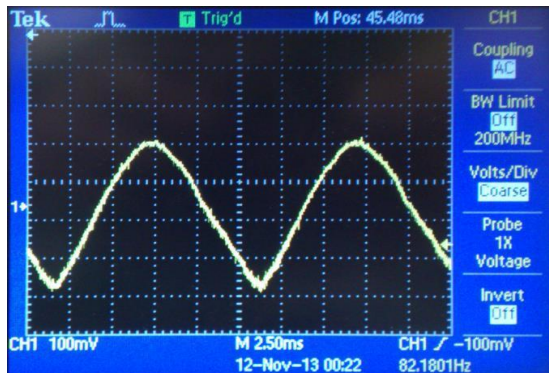
Pro získání přibližně bilineárního průběhu výstupního signálu byla pro první přiblížení provedena geometrická modifikace základního tvaru ve tvaru kosočtverce (pro sinusový signál). Přímkové hrany byly nahrazeny dvojitě (esovitě) prohnutými, viz obr. č. 22. Výsledné průběhy signálu jsou na obr. č. 23, 24 a 25.



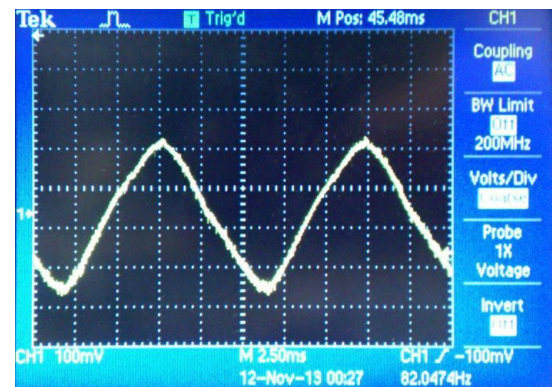
Obr. č. 22 Obrazec získání přibližně bilineárního průběhu výstupního signálu



Obr. č. 23 Bilineární průběh signálu, nutno doladit tvar obrazce v oblasti spodní hrany



Obr. č. 24 Bilineární průběh signálu, nutno doladit tvar obrazce v oblasti horní hrany



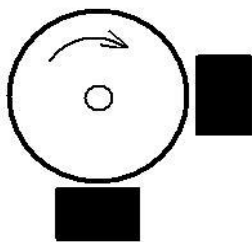
Obr. č. 25 Bilineární průběh signálu, optimalizovaný tvar obrazce

Optimalizací polohy senzoru bylo možné najít přesný tvar obrazce pro přesně bilineární průběh výstupního signálu včetně ostrých hran.

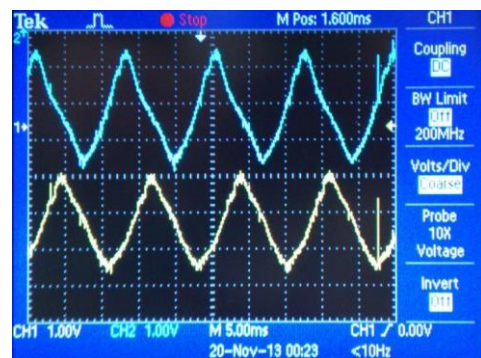
2.4.4 Jednoznačnost úhlové polohy hřídele

Nevýhodou sinusového a bilineárního signálu je nejednoznačnost stanovení fáze ze znalosti jediné hodnoty napětí a tím i nejednoznačnost úhlové polohy rotoru. Z toho vyplývá další požadavek na dva senzory, které zajistí možnost vyhodnocovat správnou fázi sinusového signálu ze vzájemného fázového posunu dvojice signálů.

Bylo provedeno měření při použití dvojice snímačů ve vzájemné poloze posunutě o 90° , viz obr. č. 26. Sensor byl umístěn ve vzdálenosti 0,5mm. Byla použita úzká značka s tvarem podle obr. č. 22.



Obr. č. 26 Dvojice snímačů
ve vzájemné poloze 90°



Obr. č. 27 Dvojice fázově posunutých
signálů pro jednoznačné vyhodnocení
úhlové polohy hřídele

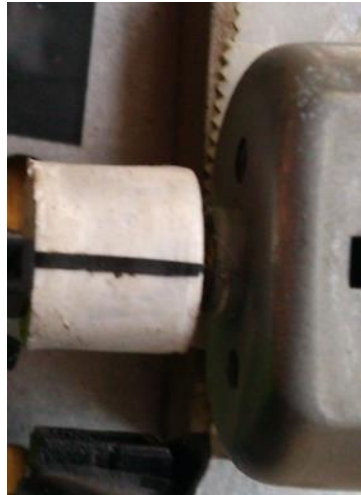
Toto měření mělo ověřit možnost jednoznačného vyhodnocování úhlové polohy hřídele ze signálů dvojice fázově posunutých signálů v případě sinusového nebo bilineárního reálného průběhu výstupního signálu snímače.

2.5 Přímý digitální senzor polohy

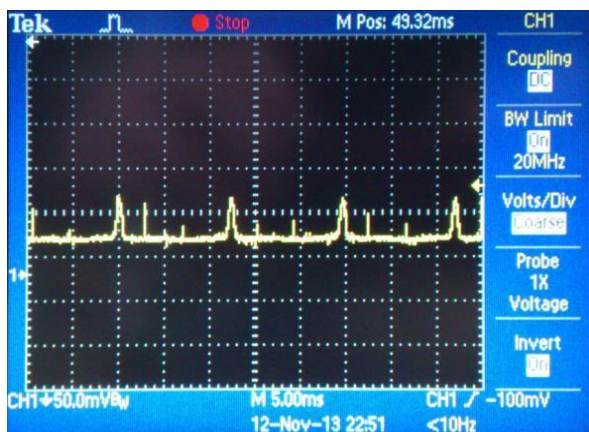
Experimentálně byla ověřena možnost použití přímého digitálního senzoru polohy. Bylo nutné ověřit, že pro požadovanou přesnost je schopen tento snímač zaregistrovat s dostatečnou napětíovou úrovní úzkou značku, jež bude později částí měřicího rastru. Požadované přesnosti 6° odpovídá 32 značek rastru ($1/2$ z $2^8 = 64$ poloh) po obvodu hřídele, při průměru hřídele 15mm vychází šířka značek rastru cca 0,67mm. Pro test byl použit jednoduchý obrazec s šířkou 0,6mm, viz obr. č. 28.

Výsledek prvního měření je na obrázku č. 29. Ze záznamu signálu jsou patrná maxima způsobená odrazem od značky, rovněž jsou ale zřetelné parazitní odrazy způsobené nekvalitním povrchem. Tyto parazitní odrazy by znemožnily použití snímače, důsledkem by bylo chybné vyhodnocování polohy rotoru. V praktické aplikaci senzoru nelze přítomnosti

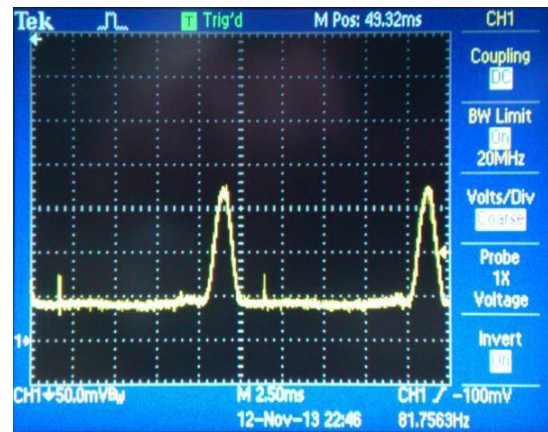
parazitních odrazů zcela zabránit vzhledem k přítomnosti přirozených provozních nečistot. Z tohoto důvodu bylo nutné zlepšit kvalitu povrchu. Výsledek měření po úpravě je na obr. č. 29. Ukázalo se, že snímač je poměrně citlivý na kvalitu povrchu a házivost hřídele.



Obr. č. 28 Obrazec s šířkou 0,6mm



Obr. č. 30 Měření s obrazcem 0,6mm, nedostatečná kvalita povrchu



Obr. č. 30. Průběh signálu po úpravě povrchu

Z výsledků měření po úpravě je patrné, že je možné jednoznačně identifikovat polohu značky a je tedy možné použití přímého digitálního senzoru polohy.

3. Výsledky měření

Pro možnost použití senzoru jakožto snímacího zařízení úhlu v praktických aplikacích se jako neoptimálnější varianta jeví použití značky pro výstupního signál se sinusovým průběhem a se dvěma senzory ve vzájemné úhlové poloze 90° pro jednoznačné stanovení polohy rotoru. Pro přesné vyhodnocování polohy rotoru bude rovněž nutné vždy provést úhlovou kalibraci každého jednotlivého nainstalovaného snímacího zařízení. Ověřena byla také možnost použít přímý digitální senzor polohy.

4. Závěr

Na základě požadavku měření a vyhodnocení pozice rotoru byla navržena metoda optického snímání otáček a polohy rotoru. V průběhu experimentu se ukázalo, že snímání optickým senzorem je závislé na několika parametrech, jako jsou tvar značky, vzdálenost senzoru od rotoru, vliv dopadajícího světla na čidla senzoru, ale i vliv nerovností povrchu, házivosti rotoru a vliv s ní spojených vibrací přenášejících se do měřícího zařízení.

Seznam použité literatury

1. CNY70. 2012. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/83751/cny70.pdf>
2. JENČÍK, Josef; Volf, Jaromír. *Technická měření* : 1.vydání Praha : Vydavatelství ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.
3. Novák, M. – Novák, J. – Chyský, J.: *Experimental Verification of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor Model*. In Proceedings of the XXth International Conference on Electrical Machines ICEM2012. Marseille: IEEE, 2012, p. 2433–2438. ISBN 978–1–4673–0141–1
4. <http://control.fs.cvut.cz/cz/node/165>