# TAČR: Robot pro inspekci a diagnostiku distribuční a přenosové sítě (NET-Robotics)

## Číslo projektu: TH02020319

Vývoj elektroniky (Výzkumná zpráva **TH02020319-V6** - evidenční číslo: **22190-055-2017**) Jiří Skála, Jiří Hammerbauer, Zdeněk Kubík, Vjaceslav Georgiev, Kamil Kosturik, Jindřích Křivka, Jiří Žahour, Pavel Valenta (ZČU/Energon<sub>1</sub>)

20. ledna 2018



1 Identifikátory organizací: ZČU –Západočeská univerzita v Plzni, Energon – Energon Dobříš s.r.o.

Tento dokument je součástí projektu TH02020319/Robot pro inspekci a diagnostiku distribuční a přenosové sítě -NET-Robotics, realizovaného za finanční spoluúčasti Technologické agentury České republiky.



Ι.	ÚVOD	. 4
II.	Napájecí systém inspekčního robota využívající vysokonapěťové přenosové vedení	. 4
III.	Vývoj a simulace elektroniky pro napájení z hladiny vvn	. 5
IV.	Proudový transformátor – teoretický rozbor	. 5
V.	DC/DC měnič	15
VI.	Návrh komunikačních obvodů	16
VII.	Závěr	17

## I. ÚVOD

V období 1.1.2017 do 31.12.2017 byly řešeny napájecí obvody robota z přenosového vedení vvn s ohledem na maximální přenos energie. Byly teoreticky vypočítány a simulovány možná uspořádání napájecího systému.

Etapa řešení obsahovala jednak rozvahu blokového schéma napájecího modulu, dále teoretický rozbor možností odběru energie z vvn vedení, které byly podpořeny simulacemi intenzit elektromagnetických polí v okolí vedení a uvnitř přiložených magnetických jader. Následoval teoretický rozbor proudového transformátoru s cílem zjistit množství získané energie. Byl řešen příklad proudového transformátoru s usměrňovačem a parametry blížící se realitě, který vedl na konstrukci konkrétního proudového transformátoru s děleným jádrem. Na testovacím pracovišti bude realizován zdroj s možností vytvořit na krátkém přenosovém vedení proud až 300A. Konstrukce proudového transformátoru byla podrobena prvotnímu měření. Výsledky ukazují správnost úvah a lze předpokládat, že uvedený způsob získávání energie z vvn vedení je vhodný.

Koncepčně byly též řešeny obvody nabíjení hlavní napájecí Li-ion baterie, pro kterou upravuje hladinu napětí DC/DC měnič.

Také byla položena koncepce komunikace robota s dispečerem.

#### II. Vývoj a simulace elektroniky pro napájení z hladiny vvn

Ze zadání požadavků na inspekčního robota na vysokonapěťovém přenosovém vedení vyplývá potřeba autonomního napájení s dostatečným výkonem pro jeho pohon a detekční systémy. Na základě provedené rešerše se jako nejlepší možnost jeví získávání elektrické energie prostřednictvím proudového transformátoru umístěnému na přenosovém vedení, kde přenosové vedení tvoří jeden závit primární strany transformátoru. Ve prospěch tohoto řešení hovoří dosažení maximálního výkonu z přijatelné velikosti a váhy napájecího modulu. Kromě vlastního proudového transformátoru bude napájecí modul obsahovat obvody omezující přepětí, usměrňovač, DC/DC měnič, bateriový management a Li-Pol baterii. Principiální bloková konfigurace napájecího modulu je na obr. 1.

## III. Napájecí systém inspekčního robota využívající vysokonapěťové přenosové vedení



Obr. 1. Blokové schéma napájecího modulu

#### IV. Proudový transformátor – teoretický rozbor

V souladu s teorií elektromagnetického pole platí, že v okolí vodiče, kterým prochází proud *I* se vytváří magnetické pole o intenzitě *H*. Platí, že ve vzdálenosti *r* od vodiče je intenzita

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

V programu CST Studio byl tento fakt simulován, aby byla evidentní závislost intenzity magnetického pole na vzdálenosti od vodiče. Přesněji, aby bylo možné určit "těsnost, jádra proudového transformátoru na přenosovém vysokonapěťovém vodiči a z toho vyplývající závislost dosaženého výkonu na geometrických rozměrech jádra. Výsledky simulací jsou na obrázcích 2 až 5.



Obr. 2. Simulace závislosti intenzity magnetického pole na vzdálenosti od vodiče o průměru 20mm a procházející proud 100A



Stránka 6 z 17



Obr. 3. Průběh magnetické indukce v plném jádře pro  $\mu_r$  = 1000 a frekvence 0.1, 1, a 50Hz







Pro uspořádání jádra cívky proudového transformátoru a přenosového vedení podle obr. 6 je možné určit velikost magnetického toku.



Obr. 6. Uspořádání jádra transformátoru a přenosového vedení pro výpočet magnetického toku

V podstatě se jedná o magnetický tok od primárního vinutí. Velikost je určena rovnicí

$$\phi_1 = \int_{r_1}^{r_2} B dS = \frac{\mu I_1 h}{2\pi} ln \frac{r_2}{r_1},$$

kde  $I_1$  je proud přenosovým vedením a  $\mu$  je permeabilita jádra. Indukované napětí v sekundární cívce transformátoru je pak dáno rovnicí

$$U_i = \sqrt{2} \pi N f \phi = \sqrt{2} \pi N f (\phi_1 - \phi_2),$$

kde  $\phi_2$  je magnetický tok od sekundární cívky, *f* frekvence a *N* počet závitů. Ze značně zjednodušeného náhradního obvodu na obrázku 7, který představuje proudový transformátor s odporovou zátěží, dostaneme

$$\phi_2 = k I_2 N,$$

Stránka **8** z **17** 

kde *k* je konstanta určující vlastnosti jádra, *l*<sub>2</sub> je proud sekundární cívkou a *N* je počet závitů sekundární cívky.



Obr. 7. Zjednodušený náhradní obvod ideálního proudového transformátoru

Pak lze pro indukované napětí psát

$$U_i = \sqrt{2} \pi N f (\phi_1 - k I_2 N)$$

a zároveň platí

$$U_i = I_2 R$$

Z předcházejících rovnic můžeme odvodit vztah pro výkon na odporové zátěži transformátoru

$$P = I_2^2 R = \left(\frac{\sqrt{2} \pi N f \phi_1}{R + \sqrt{2} \pi N^2 k f}\right)^2 R$$

Optimální počet závitů pro dosažení maximálního výkonu můžeme určit z rovnice

$$N = \sqrt{\sqrt{2} \pi k R f}$$

Stránka **9** z **17** 

#### Proudový transformátor s usměrňovačem

V konečné podobě bude na proudový transformátor připojen usměrňovač a ekvivalentní obvod se mění na zapojení podle obrázku 8. Analýzou obvodu, kde se předpokládá ideální usměrňovač, a s využitím vztahů pro popis proudového transformátoru dospějeme k rovnici, která určuje velikost usměrněného napětí na odporové zátěži

$$U = \frac{4 L_m I_1}{\sqrt{2} T N},$$

kde L<sub>m</sub> je magnetizační indukčnost a *T* je perioda střídavého proudu.



Obr. 8. Náhradní obvod ideálního proudového transformátoru s usměrňovačem

Následně můžeme určit vhodnou velikost odporové zátěže, která je dána rovnicí

$$R = \frac{2\pi L_m}{T}$$

Pak maximální získaný výkon z tohoto uspořádání je dán vztahem

$$P_{max} = \frac{4 L_m I_1^2}{\pi T N^2}$$

Dosazením výrazu

$$L_m = \frac{N^2 \mu S}{l},$$

kde S je průřez jádra,  $\mu$  permeabilita jádra a l střední délka siločáry, dostaneme

$$U = \frac{4 I_1 N S \mu}{\sqrt{2} T l}$$

$$R = \frac{2\pi N^2 S \mu}{T l}$$

$$P_{max} = \frac{4 I_1^2 \mu S}{\pi T l}$$

Vztah pro maximální získaný výkon předkládá důležité zjištění, že výkon proudového transformátoru s usměrňovačem a odporovou zátěží je úměrný pouze  $\mu$ , *S*, *I* a není závislý na počtu závitů *N* sekundárního vinutí.

#### Proudový transformátor – příklad výpočtu

V následujícím příkladu je proveden výpočet proudového transformátoru s usměrňovačem a odporovou zátěží. Parametry jádra odpovídají obrázku 9. Primární obvod tvoří rovné AlFe lano o průměru 16 mm s protékajícím proudem  $I_1 = 100A$ . Sekundární vinutí má 50 závitů s průměrem měděného vodiče 1.2 mm.

Dále jsou použity hodnoty: Průřez jádra S = 18.5 x 70 = 1295 mm<sup>2</sup> Střední délka siločáry I =  $2\pi$  31.75 = 199.49 mm Relativní permeabilita jádra  $\mu_r$  = 22 000 Permeabilita vakua  $\mu_0$  = 1.256637061x10<sup>-6</sup> H/m Permeabilita jádra  $\mu$  = 0.027646 H/m Perioda střídavého proudu T = 0.02 s.

$$P_{max} = \frac{4 I_1^2 \mu S}{\pi T l} = \frac{4 \cdot 100^2 \cdot 0.027646 \cdot 0.001295}{\pi \cdot 0.02 \cdot 0.19949} = 114 W$$

$$U = \frac{4 I_1 N S \mu}{\sqrt{2} T l} = \frac{4 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 0.001295 \cdot 0.027646}{\sqrt{2} \cdot 0.02 \cdot 0.19949} = 126 V$$

$$R = \frac{2 \pi N^2 S \mu}{T l} = \frac{2 \pi \cdot 50^2 \cdot 0.027646 \cdot 0.001295}{0.02 \cdot 0.19949} = 141 \,\Omega$$

Uvedený výpočet nepostihuje zcela přesně situaci. Předpoklad, že primární vinutí má jeden závit, není v souladu se skutečností. Primární vinutí tvoří jen provlečené AlFe lano otvorem jádra. Další

nepřesnost vnáší relativně velká vzdálenost mezi lanem a vnitřním průměrem jádra. Výpočet má tedy informativní charakter a je nezbytné provést upřesnění experimentem.

Poměry pro navrženou konstrukci proudového transformátoru s děleným jádrem se budou dále komplikovat přídavnými ztrátami, které vznikají zvětšováním magnetického odporu. Situaci by bylo možné opět analyzovat a popsat rovnicemi. Podstatné je to, že počáteční stav se blíží ideálnímu. Mezery jádra jsou natolik malé (zabroušené dělicí roviny), že nijak významně neomezují dosahovaný výkon. Lze však předpokládat, že z dlouhodobého pohledu se budou mezery zvětšovat vlivem nečistot, případně koroze a pak bude docházek ke zhoršování získávání energie. Tento fakt bude v následujícím období řešen a ověřován.

#### Proudový transformátor – experiment

Na základě teoretického rozboru byl navržen prototyp proudového transformátoru, kde hlavním omezujícím parametrem byla jeho váha a geometrické rozměry vyplývající z průměru přenosového vedení a mechanických požadavků na inspekčního robota. Vhodné rozměry a parametry jádra transformátoru jsou zachyceny na obrázku 9.



Obr. 9. Rozměry toroidního jádra a rozložení vinutí proudového transformátoru

Správnost úvah bude ověřena na měřicí sestavě s možností vytvoření primárního proudu až 300A na krátkém přenosovém vedení s navlečeným proudovým transformátorem. Pro experimenty bude sekundární cívka transformátoru rozdělena do několika sekcí s počtem závitů 20+10 a 20+20. Navržené provedení proudového transformátoru je na obrázcích 10 až 11.



Obr. 10. Celkový pohled na dělený proudový transformátor s krytem



Obr. 11. Odhalený proudový transformátor s děleným jádrem

#### V. DC/DC měnič

Výkon dodávaný proudovým transformátorem je závislý na velikosti primárního proudu. Jeho výkon je tedy závislý na okamžité hodnotě proudu, který teče přenosovým vedením a může velmi kolísat. Rovněž sekundární napětí transformátoru se velmi mění v závislosti na primárním proudu a na zatížení. Z toho důvodu je nezbytnou součástí napájecího modulu DC/DC měnič. DC/DC měnič, pro potřeby této aplikace, by měl být schopen udržovat konstantní výstupní napětí pro napájení systémů inspekčního robota a pro battery management. Dále je potřeba, aby měnič byl schopen pracovat s širokým rozsahem vstupního napětí.

Na základě provedené rešerše se jako nejvýhodnější jeví topologie Buck-Boost. Tato topologie je schopna vstupní napětí jak zvyšovat, tak snižovat. V kombinaci s vhodným řídícím obvodem lez dosáhnout širokého rozsahu vstupního napětí a výstupního výkonu v řádu stovek wattů. Topologie měniče Buck-Boost je naznačena na obrázku 12.



Obr. 12 Zjednodušené schéma měniče s Buck-Boost topologii.

#### VI. Návrh komunikačních obvodů



Obr. 13 Zjednodušené schéma komunikačních obvodů.

Pro systém autonomního robota se počítá s využítím několika komunikačních sběrnic a protokolů, jak je ukázáno na obrázku 13. Jádrem robota má být centrální řídicí počítač, který bude komunikovat s ostatními elektronickými jednotkami po sběrnici CAN. Bude se jednat o komunikaci s nabíjecí a napájecí jednotkou, která bude odesílat informace o aktuálním stavu baterie, nabíjecích proudech a spotřebe celého robota. Na sběrnici CAN bude připojena i řídicí jednotka pohonů, která bude obstarávat pohyb robota. Centrální poítač bude připojen na sběrnici ethernet, ke které budou připojeny IP kamery a kombinovaný LTE/WiFi modem. Primárním komunikačním kanálem bude LTE připojení do sítě internet, WiFi zde bude jen jako záloha. Modem se pokusí navázat zabezpečené VPN spojení s centrálním serverem, na který bude periodicky ukládat veškerá provozní data. Na tomto serveru poběží řídicí aplikace, přes kterou bude možno odesílat příkazy do robota. V neposlední řadě zde bude vizualizační rozhraní, řešené jako WWW stránky.

#### VII. Závěr

V příštím období bude na měřicím pracovišti ověřen návrh proudového transformátoru s děleným jádrem v provozních režimech s různými zatěžovacími podmínkami. Dále budou elektronické obvody řízení napájení testovány vzhledem k elektromagnetické kompatibilitě. Též budou řešeny obvody měničů a bateriového managementu.

Přenos dat jak ze systémů diagnostiky robota, tak vedení bude využívat bezdrátové přenosové cesty, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. WIFI a GSM budou též testovány v reálném prostředí na síti vvn.

#### VIII. Literatura

[1]

Optimization Design of an Inductive Energy Harvesting Device for Wireless Power Supply System

Overhead High-Voltage Power Lines,

WeiWang, Xueliang Huang \*, Linlin Tan, Jinpeng Guo and Han Liu

[2]

Designing the Transformer for Line Powering of Transmission Line Inspection Robots

Diogo F. Lopes 1, Fernando A. Silva 1,2, João Sequeira 1,3

[3]

Design and Analysis of Multi-Winding Power Current Transformer for Power Transmission Lines Inspection Robot

Mingbo Yanga\*, Zize Lianga, Hanbo Qianb, En Lia, Guodong Yanga