



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ SKAKUII 2019 SEKEL 2019

www.fm.tul.cz

SKAKUII 2019

Mezinárodní setkání kateder automatizace,
kybernetiky, umělé inteligence a informatiky
4.–6. září 2019, Harrachov

SEKEL 2019

Mezinárodní setkání učitelů elektrotechniky
9.–11. září 2019, Harrachov



Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Ústav mechatroniky a technické informatiky

SBORNÍK PŘÍSPĚVKŮ

SKAKUII 2019

**Mezinárodní setkání kateder automatizace,
kybernetiky, umělé inteligence a informatiky**

4.-6. září 2019, Harrachov

SEKEL 2019

Mezinárodní setkání učitelů elektrotechniky

9.-11. září 2019, Harrachov

Liberec, srpen 2019

Verze: 03092019

Sborník byl připraven s využitím typografického systému $\text{\LaTeX}$.

Obsah

Mezinárodní setkání kateder automatizace, kybernetiky, umělé inteligence a informatiky (SKAKUII 2019)	5
M. Kolář: Simulační studie robustnosti řízení metodou aktivní kompenzace poruchy	7
J. Koprnický: 3D tisk a robotické ruce	13
J. Kubín, Ž. Ferková, A. Richter: Párování trakčních stejnosměrných motorů, simulace a dlouhodobé zkušenosti z praxe	17
P. Marcon a kolektiv: The Asset Administration Shell of Operator in the Platform of Industry 4.0	23
R. Pirník: Detektor mimoriadnych udalostí v cestnom tuneli	29
M. Železný: Koncept letních kybernetických soustředění na KK Y FAV ZČU	33
Mezinárodní setkání učitelů elektrotechniky (SEKEL 2019)	35
J. Eichler: Problémy nastavení Preisachova modelu k modelování vlastností transformátorových plechů	37
J. Ivan, V. Šlapák, F. Ďurovský: Automatizovaný merací stend pre elektrické servopohony	39
J. Kaňuch: Vyšetrovanie vlastnosti päťfázového indukčného motora pri trojfázovom napájaní	43
T. Mlčák, R. Hrbáč, S. Zajacsek: Bezpečnostní obvody strojních zařízení	49
J. Novák, V. Lenocho, L. Mlynařík, O. Sadílek: Aktivity Univerzity Pardubice v rámci Centra kompetence drážních vozidel	53
M. Novák, P. Ringelhán: Oteplovací zkouška tyristorových spínacích modulů pro centrální kompenzaci účiníku sníženým napětím	59
A. Richter, J. Morava, P. Kučera: Elektromagnetická kompatibilita kardiostimulační techniky, vymezení základních směrů výzkumu	63

Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Ústav mechatroniky a technické informatiky

SKAKUII 2019

**Mezinárodní setkání kateder automatizace,
kybernetiky, umělé inteligence a informatiky**

4.-6. září 2019, Harrachov

Simulační studie robustnosti řízení metodou aktivní kompenzace poruchy

Milan Kolář

Fakulta mechatroniky, informatiky a
mezioborových studií
Technická univerzita v Liberci
Liberec, Česká republika
milan.kolar1@tul.cz

Abstrakt — Tento článek popisuje simulace řízení pomocí metody aktivní kompenzace poruchy (active disturbance rejection control / ADRC). Teoretické základy metody jsou popsány v první části statí. Metoda je následně aplikována na systém popsaný přenosovou funkcí v praktické části. Robustnost metody je testována změnami parametrů nominální přenosové funkce, zavedením poruch do zpětnovazebního obvodu a nelineárních vztahů do diferenciální rovnice systému. Na základě pozorování využitelnosti ADRC je následně navržen regulátor pro řízení výstupního výkonu vodní turbíny. Vlastnosti regulátoru jsou následně testovány v simulacích přechodové odezvy systému a potlačení poruchy.

Klíčová slova — Metoda aktivní kompenzace poruchy (ADRC), lineární rozšířený pozorovatel stavu (LESO), robustní řízení, nelineární řízení

Abstract — This paper describes simulations of the active disturbance rejection control (ADRC). Theoretical basics of the method are described in the first theoretical part. The method is then applied to the system described by the transfer function in the practical part. Robustness of the method is tested by varying the nominal system's parameters, including disturbances in the control loop and non-linear relations in the system. On basis of the observation of ADRC capabilities a controller is purposed for water turbine power control. The controller capabilities are tested by transient process simulation and test of disturbance rejection capability.

Keywords — Active disturbance rejection control (ADRC), linear extended state observer (LESO), robust control, non-linear control

I. ÚVOD

Návrh řídicích systémů je v současné době nedílnou součástí inženýrské práce. Rozvoj komplexnějších řídicích algoritmů je povzbuzován stále narůstajícím výpočetním výkonem průmyslových řídicích jednotek, díky čemuž lze provádět další optimalizace průmyslových pochodů

Jedna z hlavních odnoží návrhu řídicích algoritmů je zaměřena na potlačení poruch. Teorie lineárních systémů popisuje metody, pomocí kterých lze minimalizovat dopad poruchy na řízenou veličinu a teoreticky vliv poruch zcela eliminovat. Problémem těchto metod je fakt, že jsou založeny na matematické teorii, která se liší od reálných podmínek.

Během návrhu je třeba vzít v potaz, že lineární systém je pouze aproximací reálného systému v omezeném rozsahu

hodnot a nezahrnuje nelinearity systému, neurčitost a vliv poruch.

Metoda aktivní kompenzace poruchy (Active disturbance rejection control / ADRC) umožňuje kompenzaci poruch a nejistot systému [1], [2]. Přestože ADRC vyžaduje základní znalosti o řízeném systému, není nutné mít k dispozici jeho přesný model. Díky tomu, jednoduché aplikaci, vysoké robustnosti a relativně nízké výpočetní náročnosti představuje ADRC dobrou alternativu robustních PID regulátorů [1], [3].

Aplikace ADRC sahají od řízení synchronních strojů [3] přes regulaci přehráte páry [4] až po autopilota výškového modulu (near space vehicle) [5].

II. METODA AKTIVNÍ KOMPENZACE PORUCHY

A. Matematický popis systému

Základním principem metody ADRC je, že řízený dynamický systém obsahuje neměřené poruchy a neurčitosti [1], [2]. Systém s jedním vstupem a jedním výstupem (single-input single-output / SISO) lze popsat následující rovnicí.

$$y^{(n)}(t) = f(y(t), \dots, y^{(n-1)}(t), t) + bu(t) + d_e(t) \quad (1)$$

Kde $y(t)$ je řízený výstup, $u(t)$ je řízený vstup, $d_e(t)$ je vnější porucha, b je neznámá konstanta se známým znaménkem, $f(y(t), y'(t), \dots, y^{(n)}(t), t)$ reprezentuje dynamiku systému včetně neurčitostí.

B. Rozšířený pozorovatel stavu

Problém měření stavu dynamického systému lze vyřešit pomocí estimátoru. Požadavkem je model systému dostatečně přesný, aby byl proces estimace konvergentní. Pomocí přesnějších modelů lze zkrátit dobu estimačního procesu.

V případě neměřitelné poruchy lze taktéž využít estimačního procesu. Estimátor se rozšíří o jeden další stav reprezentující poruchy a nejistoty $d(t)$. Lineární rozšířený pozorovatel stavu (Linear extended state observer / LESO) pro SISO systém 2. řádu je popsán maticovou rovnicí.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}(t) &= (A - LC)\hat{\mathbf{x}}(t) + Bu(t) + Ly(t) \\ \hat{y} &= C\hat{\mathbf{x}}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Kde $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}_1 \hat{x}_2 \hat{x}_3]^T$, $x_3 = d(t)$ je vektor eximovaných stavů, $u(t)$ je řízený vstup, $y(t)$ je měřený výstup. Matice mají následující podobu.

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} 0 \\ b_0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C &= [1 \quad 0 \quad 0] & L &= \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

Estimované stavy z LESO ($\hat{x}$) lze použít pro zpětnovazební řízení.

C. Struktura řízení

Úlohu návrhu ADRC lze rozdělit do dvou částí. První částí je návrh LESO. Druhý krok je volba koeficientů zpětné vazby.

Zákon řízení pro systém 2. řádu řízený metodou ADRC je popsán následující rovnicí.

$$\begin{aligned} u(t) &= -\hat{x}_3(t) + u_0(t) \\ u_0(t) &= k_p(v(t) - \hat{x}_1(t)) - k_d\hat{x}_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Kde k_p je proporcionální koeficient zpětné vazby, k_d je derivační koeficient zpětné vazby a $v(t)$ je žádaná hodnota. Struktura zpětnovazebního obvodu je zobrazena na následujícím diagramu.

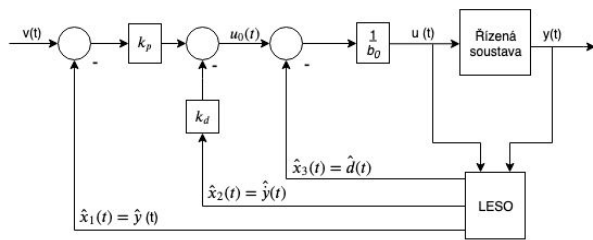


Fig 1. ADRC zpětnovazební řízení

Existují různé metody výpočtu parametrů řídicího systému. Proces parametrizace se nazývá pásmová parametrizace (bandwidth parameterization). Jedna z metod popsáná v [1] je založena na volbě času ustálení t_{settle} . Pro dosažení 2 % intervalu žádané hodnoty s přetlumeným chováním je zvolen záporný dvojnásobný reálný pól řídicí smyčky. Póly jsou voleny na základě koeficientů k_p a k_d . Póly rozšířeného pozorovatele stavu jsou voleny pro zajištění konvergence estimace v čase kratším než přenosový jev. Matice L je vypočítána z charakteristického polynomu $A - LC$.

Pokročilejší metody návrhu jsou uvedeny například v[7], [9], [12][13].

III. NÁVRH REGULÁTORU

A. Lineární časově invariantní systém

Řídicí systém je popsán v případě lineárního časově invariantního (Linear time invariant / LTI) systému 2. řádu přenosovou funkcí.

$$F(s) = \frac{K}{as^2 + bs + 1} \quad (5)$$

Jak bylo zmíněno LTI systém představuje pouze aproximaci řízeného systému. Nominální systém je zvolen následující.

$$F(s) = \frac{1}{2s^2 + 3s + 1} \quad (6)$$

Parametry ADRC pro nominální systém jsou vypočteny na základě volby doby ustálení. Hodnoty jsou zobrazeny v tabulce I. Parametr b_0 byl zvolen na základě experimentu, neboť výpočty podle [1] způsobovaly nestabilitu regulační smyčky.

Tabulka I. ADRC PARAMETRY REGULÁTORU

T_{settle}	Matrix L	k_p	k_d	b_0
1	$[180 \ 10800 \ 216000]^T$	36	12	1
3	$[60 \ 1200 \ 8000]^T$	4	4	1
5	$[36 \ 432 \ 1728]^T$	1.44	2.4	1
10	$[18 \ 108 \ 216]^T$	0.36	1.2	1

Přenosové procesy pro jednotlivé sady parametrů jsou zobrazeny v grafu 2.

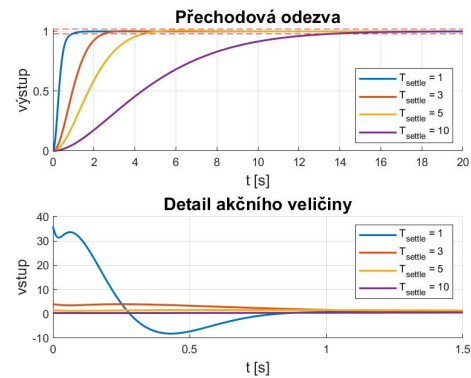


Fig 2. Přechodová odezva

Jediná ze sad parametrů, která nedosahuje 2 % přesnosti v žádaném časovém intervalu je $T_{settle} = 10$. Řídicí signály jsou zobrazeny pouze v krátkém intervalu, kde jsou nejlépe pozorovatelné rozdíly mezi jednotlivými řídicími parametry. Snížení požadovaného intervalu zvyšuje požadavky na rozsah akčního členu.

Je zřejmé, že ADRC umožňuje snížit dobu přechodového jevu a výpočet koeficientů zpětné vazby lze provést na základě žádané doby ustálení pomocí algebraických vztahů.

B. Potlačení poruchy

ADRC bylo původně navrženo pro kompenzace neměřených poruch v řízených systémech. Zvolený systém má přenosovou funkci popsanou rovnicí (6). Porucha je popsána rovnicí (7).

$$d(t) = 0.5 \cdot H(t - 25) \quad (7)$$

Kde $d(t)$ je porucha a $H(t)$ je Hevisideova skoková funkce.

Porucha působí na výstup systému.

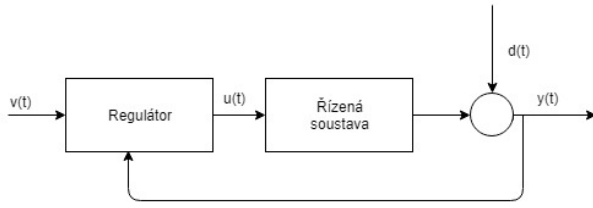


Fig 3. Diagram porucha výstupu

Výsledky simulací pro různá nastavení regulátoru jsou zobrazeny v grafu 4.

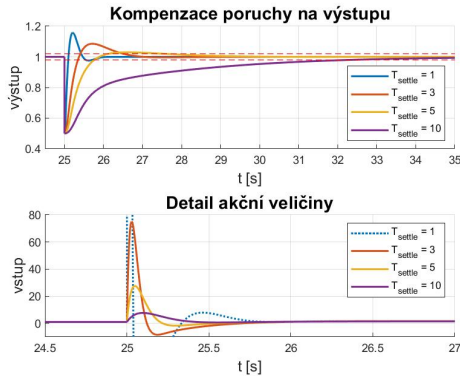


Fig 4. Kompenzace poruchy na výstupu

V grafu 4 je patrný vliv parametrizace. Snižováním požadovaného času ustálení dochází k agresivnějším zásahům regulátoru s vyššími požadavky na rozsah akčního zásahu. Akční zásah pro $T_{settle} = 1$ v grafu 4 není zobrazen v plném rozsahu, neboť hodnoty minima a maxima jsou $u_{max} \approx 800, u_{min} \approx -200$. Předpokládáme, že tyto hodnoty jsou mimo rozsah akčního členu. Neboť ADRC pro systém 2. řádu vychází z PD regulace, výsledný regulační pochod není ovlivněn wind-up efektem, což je demonstrováno v grafu 5.

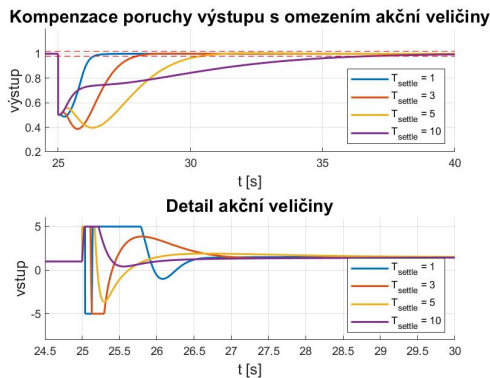


Fig 5. Kompenzace výstupní poruchy se saturací akčního členu

Akční zásah je omezen na interval $u(t) \in \langle -5; 5 \rangle$. Výsledkem saturace je delší doba kompenzace poruchy i odstranění překmitu.

IV. ANALÝZA ROBUSTNOSTI REGULÁTORU

A. Robustnost

Problematika řízení dynamických systémů zahrnuje neurčitost modelu systému. Vzhledem k tomu, že model

je pouze aproximací řízeného systému je třeba brát v potaz možnost změn parametrů a vliv vnitřních nelinearit.

Většina řídicích systémů je založena na lineární aproximaci řízeného systému v okolí pracovního bodu. Řešení neurčitosti lze rozdělit mezi dvě kategorie. První je založena na jednom návrhu řídicího systému, který splňuje kritérium stability pro všechny možné potenciální kombinace parametrů systému. Adaptivní řízení zavádí změny řídicího algoritmu podle změn parametrů řízeného systému, což vede k větší složitosti návrhu oproti robustnímu řešení.

Robustnost metody ADRC je testována změnami parametrů systému, zahrnutím filtru do struktury modelu, zahrnutím časové závislosti modelu a nelinearity matematického popisu systému. Parametry regulátoru jsou zachovány, porucha je popsána rovnicí (7).

B. Variace parametrů přenosové funkce

Parametry fyzikálního systému se mohou měnit v čase a v jednotlivých pracovních bodech. Testování robustnosti řídicího systému je prováděn dvěma přenosovými funkcemi popsanými rovnicemi (8) a (9).

$$F_1(s) = \frac{6}{s^2 + 5s + 6} \quad (8)$$

$$F_2(s) = \frac{0.05}{s^2 + 0.85s + 0.075} \quad (9)$$

Dynamické chování $F_1(s)$ a $F_2(s)$ se liší od nominální přenosové funkce (7). To lze demonstrovat na charakteristické rovnici přenosu. Kořeny nominálního přenosu jsou $p_{nom} = \{-1; -0.5\}$. Kořeny testovaných funkcí jsou $p_{F_1} = \{-3; -2\}$ a $p_{F_2} = \{-0.75; -0.1\}$. V případě $F_2(s)$ je statické zesílení změněno na $K = 0.66$. Rozdílné chování zpětnovazební smyčky lze demonstrovat pomocí gap metriky [6]. Gap metrika je nástroj robustní analýzy a prezentuje rozdíl ve zpětnovazebním chování obvodu dynamického systému. Gap metrika nabývá hodnot $0 < \delta < 1$, kde 0 je stejné a 1 zcela odlišné zpětnovazební chování. Vzdálenost gap metriky mezi přenosy je následující.

$$\delta(F_1, F_{nom}) = 0.56 \quad (10)$$

$$\delta(F_2, F_{nom}) = 0.53 \quad (11)$$

Výsledky simulací jsou zobrazeny v následujícím grafu.

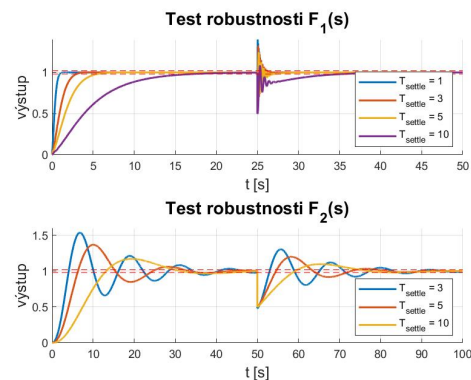


Fig 6. Testování reobustnosti

Výsledky dokazují robustnost metody ADRC. V případě systému $F_1(s)$, jehož dynamika je výrazně rychlejší ($T_{set} \approx 4$ s) oproti nominálnímu přenosu, všechna nastavení

regulátoru stabilizují výstup. Výraznější rozdíl mezi jednotlivými nastaveními regulátoru jsou patrné v případě kompenzace poruchy, kde se objevují tlumené oscilace.

Druhá část grafu zobrazuje výsledky pro systém s pomalejší dynamikou ($T_{set} \approx 75 \text{ s}$). Výsledný pochod pro $T_{settle} = 1$ byl odstraněn, neboť výstup byl nestabilní. Souhlasí to s výsledky, kde oscilace rostou s klesající hodnotou požadované doby ustálení. Řešením by bylo přeparametrizování regulátoru na $T_{settle} \approx 20 \dots 30$.

C. Filtr

Další potenciální problém představují změny mimo pracovní bod, což může zahrnovat změnu dynamiky reprezentovanou zahrnutím filtru do systému. Struktura je následující.

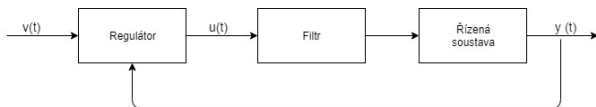


Fig 7. Diagram systému s filtrem

Filtry pro potřeby simulace jsou popsány přenosovými funkcemi.

$$F_{f1}(s) = \frac{0.5s+1}{2s+1} \quad (12)$$

$$F_{f2}(s) = \frac{-0.5s+1}{2s+1} \quad (13)$$

Oba filtry obsahují dominantní časovou konstantu vzhledem k nominálnímu systému (6), která bude mít významný vliv na dynamiku procesu [9]. Filtr zvyšuje dobu ustálení při přechodovém jevu na $T_{tp} \approx 15 \text{ s}$. Nuly v přenosech filtrů způsobují posun fáze systému. Nula v případě $F_{f2}(s)$ je nestabilní, což způsobuje neminimální fázi systému během přechodových jevů.

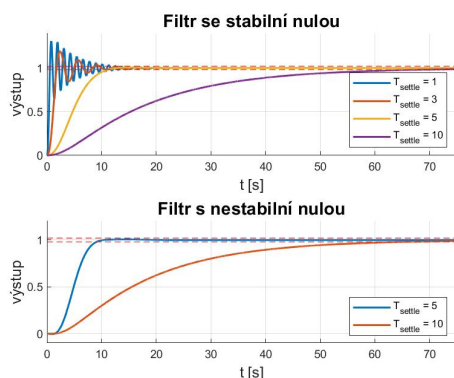


Fig 8. Vliv zahrnutí filtru

Neminimální fázi systému je třeba vždy brát v potaz během návrhu řídicího systému. Inverzní překmit způsobuje nestabilitu více agresivních regulátorů. Doba přechodového jevu není možné zásadním způsobem redukovat základní parametrizací ADRC. Dokazuje to druhá část grafu 8, kde další redukce oscilací a stabilizace výstupu v 2 % intervalu nelze dosáhnout dříve než po 10 sekundách. Tyto oscilace způsobují nestabilitu v případě neminimální fáze systému.

D. Závislost na čase a nelineární elementy

Většinu fyzikálních systémů nelze považovat za lineární. Nelinearity zahrnují například jevy jako vůle, relé charakteristika nebo kvadratické vztahy. Nelineární modely nejsou vázány na pracovní bod a mohou aproximovat chování systému v plném rozsahu možných stavů. Důvodem, proč jsou lineární modely vázané na pracovní body preferovány, je jednodušší analýza a výpočet.

Nominální systém lze popsat lineární časově nezávislou diferenciální rovnicí.

$$\ddot{y} = \frac{1}{2}(u(t) - 3\dot{y}(t) - y(t)) \quad (14)$$

Pro otestování schopnosti metody ADRC vyrovnat se s potenciálními nelinearitami byla rovnice modifikována, aby obsahovala kvadratické elementy.

$$\ddot{y} = \frac{1}{2}(u(t) - 3\dot{y}^2(t) - y^2(t)) \quad (15)$$

Porucha ovlivňuje akční proměnnou a je popsána následující rovnicí.

$$u(t) = (u_0(t) - x_3(t)) b_0 - 0.2 \cdot H(t - 10) \quad (16)$$

Výsledky simulace jsou zobrazeny v grafu 9. Je zřejmé, že kvadratická nelinearita primárně ovlivňuje agresivnější nastavení regulátoru. Systém je stabilní pro všechna nastavení regulátoru.

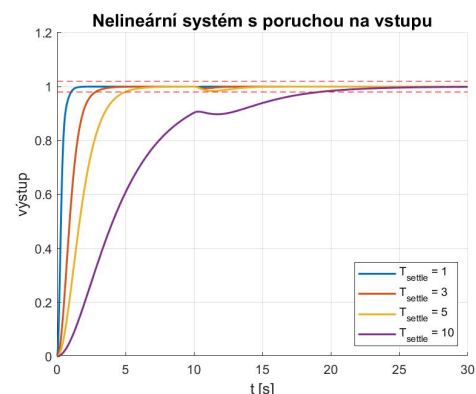


Fig 9. Nelineární časově nezávislý systém

Nelineární elementy jsou během druhé simulace definovány jako goniometrická funkce a absolutní hodnoty. Do systému je také zahrnuta časová závislost.

$$\ddot{y} = \frac{1}{2}(u(t) - 3 \sin(\dot{y}(t)) - |y|(t) - \frac{1}{50}t) \quad (17)$$

Porucha v tomto případě ovlivňuje výstup systému a je popsána následující rovnicí.

$$y(t) = y_0(t) - 0.2 \cdot H(t - 25) \quad (18)$$

Výsledky jsou zobrazeny v grafu 10. ADRC stabilizuje systém i v tomto případě. Nevýhoda ADRC je zvýrazněna v případě $T_{settle} = 10$. Metoda je založena na estimaci, jež musí být rychlejší než dynamika poruchy ovlivňující systém, proto v tomto případě nedochází k ustálení výstupu v 2 % intervalu.

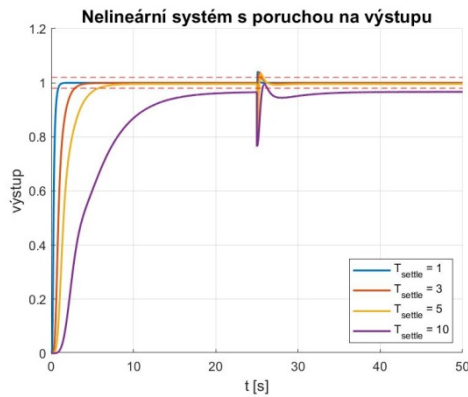


Fig. 10. Nelineární systém se závislostí na čase

V. NÁVRH ŘÍZENÍ VODNÍ TURBÍNY

A. Popis systému

Bylo potvrzeno, že metoda ADRC dokáže regulovat nelineární systémy s vlivem poruch. ADRC bude nyní aplikována na model Francisovi vodní turbíny

Vodní turbína je pohon s vysokou účinností využívající energie vodního spádu. Lze jej charakterizovat jako systém s nelineárním chováním a neminimální fází. Akční člen závisí na konkrétním typu turbíny. Francisova vodní turbína využívá servopohon ovládající lopatky rozváděcího kola, které regulují průtok turbínou.

Model systému vychází z původního per unit modelu podle pracovní skupiny IEEE [13]. Nelineární model je dále rozšířen o tabulkové hodnoty, které byly odvozeny z dat z reálného provozu s cílem zvýšit přesnost výstupu modelu. Akční člen je aproximován přenosovou funkcí, jež byla získána identifikací dat z téhož provozu, a dále je rozšířen o statická a dynamická omezení.

Cílem regulace bude v tomto případě stabilizace výstupního výkonu turbíny.

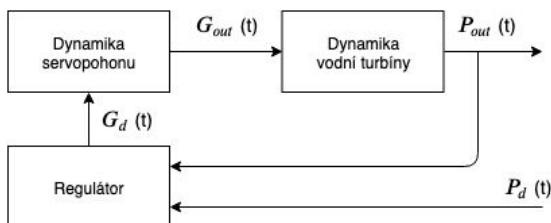


Fig. 11. Diagram řízení turbíny

První simulace je zaměřena na parametrizaci ADRC pro linearizovaný model dynamiky. Pro systém je uvažováno dominantní chování systému 2. řádu. Je třeba brát v potaz neminimální fází systému a omezující podmínky akčního členu. Doba trvání přechodové odezvy systému je $T_{tp} \approx 14$ s.

ADRC je následně aplikována na lineární model. Výsledky simulace jsou zobrazeny v grafu 12.

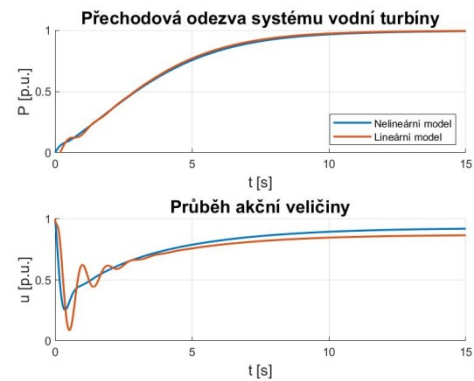


Fig. 12. Přechodová odezva vodní turbíny

Dynamika obou modelů je téměř identická. Na začátku procesu je patrný vliv neminimální fáze systému. Akční zásah je ovlivněn záporným překmitem a způsobuje atypický tvar křivky na začátku přechodové odezvy. Tento dopad je patrnější v případě dynamiky linearizovaného modelu. Lineární model je charakterizován pracovním bodem $G_0 = 0,5$. Se zvyšující se vzdáleností od pracovního bodu vypovídací hodnota modelu klesá, což lze vidět například na ustáleném stavu akčního zásahu.

Doba ustálení je redukována na $T_{set} \approx 10$ s. Jak bylo dokázáno v předchozí kapitole metoda ADRC představuje možné řešení i pro nelineární systém.

B. Potlačení poruchy

Další krok bude zaměřen na reakci na poruchu na vstupu turbíny. V kontextu soustavy by se jednalo o poruchu v polohování řídicích lopatek.

$$d(t) = -0.2 \cdot H(t - 25) \quad (19)$$

Vzhledem k tomu, že vstupy a výstupy modelu jsou normovány, a turbína obvykle operuje v rozsahu 70 – 90 % výkonu, žádaná hodnota je zvolena na $P_d(t) = 0,8$. Pracovní bod lineárního modelu je vybrán pro $G_0 = 0,7$.

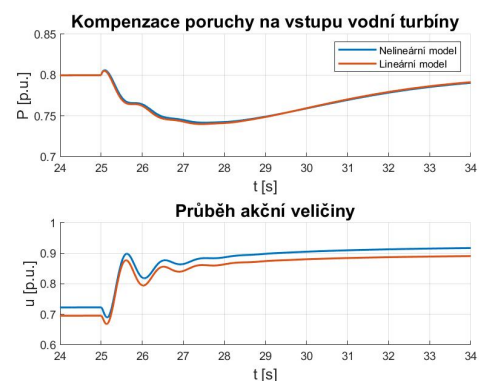


Fig. 13. Potlačení poruchy na vstupu vodní turbíny

Vzhledem k tomu, že porucha v tomto případě prochází celou dynamikou modelu, je systém schopen poruchu kompenzovat relativně plynule. Jiný scénář nastává v případě, kdy porucha ovlivňuje výstup systému, což je zobrazeno v následujícím grafu.

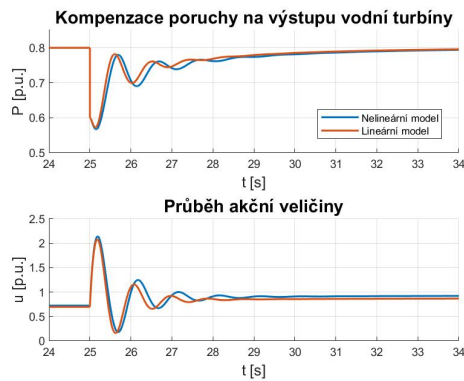


Fig 14. Potlačení poruchy na výstupu vodní turbíny

Skoková funkce nyní ovlivňuje výstup a je patrný značný propad výstupu i z důvodu vlivu neminimální fáze systému. V reálném systému lze tuto poruchu zpodobnit jako skokovou změnu výkonu generátoru. Porucha na výstupu je důležitou částí řízení výkonu elektrárny. Výstupní výkon turbíny musí být řízen v rovnováze se zatížením generátoru, aby byla zachována synchronní frekvence výstupního napětí.

VI. ZÁVĚR

Stať popisuje aplikaci metody ADRC. Teoretický základ metody je vyložen v začátku stati. Na základě pravidel a nominálního modelu jsou nastaveny parametry regulátoru, na něž následně aplikován různé variace parametrů nominálního systému, se kterými se lze v běžném provozu setkat. To zahrnuje změny parametrů přenosové funkce, zahrnutí filtru a vlivu pozice jeho nul, nelineární popis systému a časovou závislost. Výsledky simulací dokazují vysokou robustnost metody a možnost jejího uplatnění na nelineární systémy.

Poslední část stati je zaměřena na aplikaci ADRC na modely vodní turbíny. S pomocí ADRC metody je úspěšně snížen čas přechodové odezvy i přes neminimální fázi systému. Rozdíly mezi chováním linearizovaného a nelineárního modelu jsou popsány. Následně je testována schopnost řídicího algoritmu potlačovat poruchu. Porucha na akčním zásahu a na výstupu je testována. ADRC stabilizuje výstup v obou případech. Poruchy jsou popsány v kontextu chování reálného systému.

Další práce by se mohla zaměřit na vylepšení ADRC regulátoru vodní turbíny. Hlavní zaměření by mělo být na kompenzaci poruchy na výstupu. Oscilace v grafu 14 by potenciálně bylo možné odstranit užitím některé ze složitějších struktur ADRC, či případně zahrnutím adaptivních prvků do řídicího algoritmu. Případným dalším

krokem by mohlo být zahrnutí zátěže generátoru do modelu a využití ADRC v komplexnějším algoritmu řídícím zároveň turbínu i synchronní stroj.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2019.

LITERATURA

- [1] HERBST, G. A Simulative Study on Active Disturbance Rejection Control (ADRC) as a Control Tool for Practitioners. *Electronics*. 2013, (August 2013), 246-279.
- [2] DU, B, S WU a S CUI. Application of Linear Active Disturbance Rejection Controller for Sensorless Control of Internal Permanent Magnet Synchronous Motor. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016, s. 3019-3027.
- [3] TONG, Z, G HONG, X JINQUAN, K XIAOLIN a Q HAO. Research on PMSM Active Disturbance Rejection Controller Based on Model Compensation. In: *ICEMS*. Pattaya City, 2015, s. 1593-1596.
- [4] WU, Z, T HE, Y XUE, L SUN a L SUN. Superheated Steam Temperature Control based on Modified Active Disturbance Rejection Control. In: *Control Engineering Practice*. 2018.
- [5] LI, H, Z YIN, F LI a C SONG. A Linear Active Disturbance Rejection Control Approach for Near Space Vehicle Autopilot. In: *ICCAIS*. Beijing, s. 47-51.
- [6] HLAVA, J, L HUBKA a L TŮMA. Multi model predictive control of a power plant heat exchanger network based on gap metric. In: *16th International Conference on System Theory, Control and Computing*. Sinaia, 2012.
- [7] INOHANA, G, H SHIBASAKI a Y ISHIDA. Model Matching Control in an Improved Discrete-Time ADRC Using the Zero-Order Hold Considering Input-Side Disturbance. In: *Proceedings of the 35th Chinese Control Conference*. Chengdu, 2016, s. 302-307.
- [8] SUN, L. Combined feedforward and model-assisted active disturbance rejection control for non-minimum phase system. In: *ISA transactions*. 2016, s. 24-33.
- [9] XUE, W. C., W. Y. BAI, S. YANG, K. SONG, Y. HUANG a H. XIE. ADRC with adaptive extended state observer and its application to air-fuel ratio control in gasoline engines. In: *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015, s. 5847-5857.
- [10] SHE, J, H. KOBAYASHI, Y. OHYAMA a X. XIN. Disturbance Estimation and Rejection An equivalent input disturbance estimator approach. In: *43rd IEEE Conference on Decision and Control*. Atlantis, s. 1736-1741.
- [11] DU, Y., W. CAO, J. SHE, M. FANG a Z. LU. An Improved Equivalent-Input-Disturbance Approach for Disturbance-Rejection Using High-Gain Observer. In: *37th Chinese Control Conference*. Wuhan, s. 2643-2647.
- [12] GUO, L., Y. ZHU a W. LI. An enhanced anti-disturbance control approach for systems subject to multiple disturbances. In: *Engineering Control Practice*. Beijing, 2019, s. 247-283.
- [13] Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies. In: *Transactions on Power Systems*. 1992, s. 167-179.

3D tisk a robotické ruce

3D printing and Robotic Hands

Jan Koprnický

Ústav mechatroniky a technické informatiky

Technická univerzita v Liberci

Liberec, Česká republika

jan.koprnický@tul.cz

Abstrakt—Článek shrnuje aktivity laboratoří na Technické univerzitě v Liberci věnujících se využití 3D tisku při výrobě levných protetických náhrad horních končetin. V první části je krátké seznámení s využívanými 3D tiskovými technologiemi, následuje představení realizovaných projektů aktivních protéz. V závěru jsou popsány projekty, které souvisejí s propojením uživatelů s robotickými systémy, nebo zlepšujícími výsledky tisku z 3D tiskové technologie SLS.

Klíčová slova—Technologie 3D tisku, bionické ruce, HACKberry Hand, Brunel Hand, EMG, Myoware, Myo Armband

Abstract—This article summarizes activities of laboratories at Technical University of Liberec in the field of low cost upper limb prosthesis 3D printing. The short introduction into the used 3D printing technologies is in the first part. The presentation of realized projects of active prostheses follows. In the last part there is the description of projects they deal with connection of users with robotic systems, or projects which improves quality of printed models from SLS 3D printer.

Keywords—3D Printing Technology, Bionic Hands, HACKberry Hand, Brunel Hand, EMG, MyoWare, Myo Armband

I. ÚVOD

Aktivity uplatnění aditivní výroby (AM) v protetice na TUL vyvolal projekt HACKberry [1], což je bionická ruka vyrobena za pomoci technologie 3D tisku. Zveřejnění výrobních dat v souladu s pravidly open source projektů otevřelo na TUL zajímavou problematiku mechatronických systémů, které je možné rozvíjet při pedagogické činnosti, stejně tak i ve vědě a výzkumu. Společně s tím se také ukázalo, jaký potenciál se v této oblasti skrývá.

II. 3D TISK NA TUL

Využívání aditivního způsobu výroby má na TUL dlouhou tradici. V Laboratoři prototypových technologií (LPT) na Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace (CxI) je zastoupena většina dnes rozšířených 3D tiskových technologií. Jedná se o průmyslové stroje nebo experimentálních zařízení pracujících s plastovými nebo kovovými materiály.

Přehled technologií v LPT je následující:

- **FDM/FFF** (Fused Deposition Modeling / Fused Filament Fabrication) je jednou z nejrozšířenějších technologií. Vstupním materiálem je struna z termoplastu. Princip spočívá v extruzi této struny v roztavené podobě a její ukládání ve vrstvách vzájemně na sebe.

- **SLS** (Selective Laser Sintering) t. pracuje s plastovým práškem ve vaně tiskového prostoru, který je laserovým paprskem po vrstvách spékán dohromady.
- **SLA** (Stereolithografie) t. pracuje s fotopolymery vytvrzovanými UV zářením nebo laserovým paprskem. Model se postupně vytahuje z lázně fotopolymery.
- **PolyJet** t. spočívá v nanášení tenkých vrstev fotopolymery pomocí tiskových hlav (podobnost s inkoustovou tiskárnou). Po vystříknutí jsou vrstvy vytvrzeny UV zářením.
- **Multi Jet Fusion** t. funguje na principu selektivního vstřikování kapaliny tzv. agentu do polyamidového prášku po vrstvách nanášeného do tiskového prostoru.
- **SLM** (Selective Laser Melting) je technologie pracující s kovovými prášky, které jsou v tiskovém prostoru laserem po vrstvách taveny.

III. 3D TISK V OPEN SOURCE PROJEKTECH PROTÉZ HORNÍCH KONČETIN

Ze své podstaty je 3D tisk jako forma výroby přímo stvořená pro prototypovou výrobu. Na druhé straně, protézy jsou svým způsobem prototypy. Tuto skutečnost si uvědomila řada lidí, kteří se, buď jako jednotlivci nebo skupiny/organizace, pustili do vývoje a výroby různých druhů protéz. Vznikly tak pasivní (kosmetické) nebo aktivní protézy (tahové, elektricky nebo pneumaticky poháněné) [1]–[3], [8], jejichž výrobní data jsou ve většině případů sdílána online. Vzhledem k snazší dostupnosti FFF 3D tiskové technologie je většina modelů navržena právě pro ni, přestože není její použití z hlediska konstrukce vždy nejvýhodnější.

Následující text se zaměřuje na aktivní protézy horních končetin poháněné elektricky. Ty jsou z mechatronického hlediska svou komplexností nejzajímavější. Naše výzkumy se také věnovaly různým konstrukcím tahových protéz, které nabízely zajímavá technická řešení. V řadě případů je možné tyto konstrukce vybavit elektromotory a vytvořit z nich elektricky poháněné protézy. Žádný z modelů jsme zatím tímto způsobem netestovali.

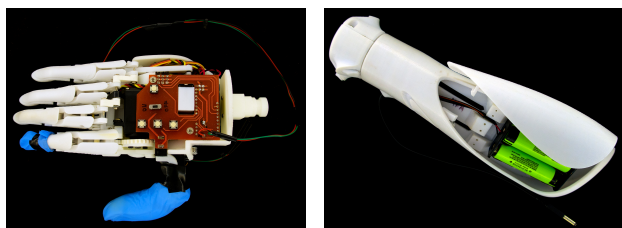
A. HACKberry

Vytištěn a sestavení bionické ruky podle projektu HACKberry [1] na Technické univerzitě v Liberci (na obrázku 1) bylo realizováno v rámci diplomové práce [5].

Jedná se o aktivní protézu poháněnou vnější elektrickou silou, ovládanou uživatelem prostřednictvím signálů ze senzoru na předloktí. Ovládání je doplněno pomocí tlačítek



Obr. 1. HACKberry sestavená na TUL [4]



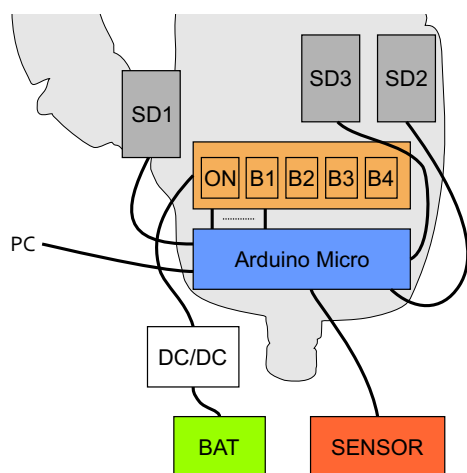
Obr. 2. Bionická ruka HACKberry vyrobená na TUL, ruka (vlevo), lůžko pro předloktí (vpravo) [5]

umístěných na hřbetu ruky (obr. 2). Protéza je určena pro uživatele s předloketní amputací.

Řídicí systém ruky (viz blokové schéma na obr. 3) má jednoduchou strukturu postavenou na platformě Arduino Micro.

Za povšimnutí stojí, že zařízení pracuje bez interně realizované zpětné vazby. Tento fakt nás vedl k experimentům se snímači síly umístěnými na konstrukci ruky [11]. V této práci jsme se tak pokusili realizovat zpětnovazební řízení. Na obrázku 4 je ruka vybavena dodatečnými snímači.

Při sestavování a používání ruky HACKberry jsme narazili na některé slabiny konstrukce nebo použité 3D tiskové technologie. Rozhodli jsme se proto provést analýzu 3D tiskových technologií při výrobě ruky [9]. Pro testování byl vybrán model ukazováku, který byl vyroben v laboratoři LPT všemi



Obr. 3. Blokové schéma systému HACKberry (SDx – servomotory, Bx – tlačítka) [7]

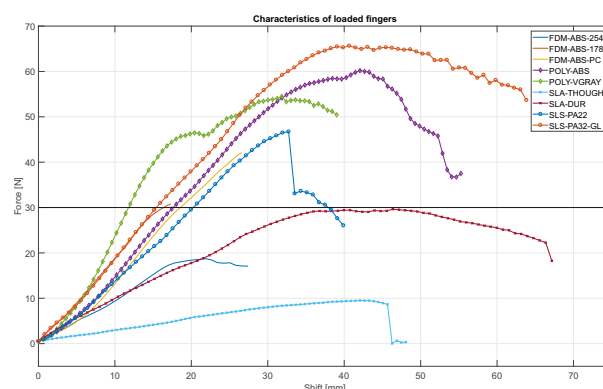


Obr. 4. Ruka HACKberry vybavená snímači na prstech [11]

dostupnými technologiemi vyjma SLM a Multi Fusion Jet (v době experimentů v LPT ještě nebyla). Na obrázku 5 je mechanické testovací zařízení a dále následuje graf s naměřenými výsledky na obrázku 6.



Obr. 5. Mechanické testování ukazováku HACKberry na trhačce (1 – snímač síly, 2 – směr pohybu, 3 – testovaný prst, 4 – držák prstu) [9]



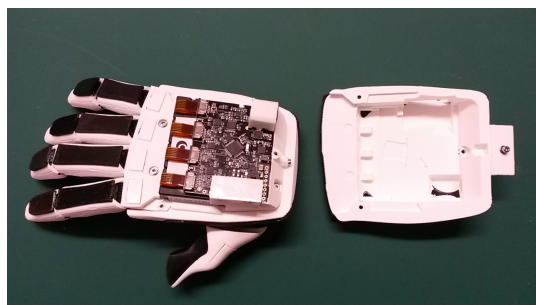
Obr. 6. Průběh silového zatížení jednotlivých modelů prstů [9]

Nejlépeších výsledků, z pohledu mechanické odolnosti, dosáhly modely vyrobené technologií SLS.

B. Brunel Hand

Brunel Hand robotická ruka firmy Open Bionics [8], jejíž výrobní data jsou dostupná ve formě open source. Na základě

zkušenosti z projektu HACKberry a neúspěšného tisku *Ada Hand*, model předcházející *Brunel Hand*, jsme zakoupili již sestavenou ruku (viz obrázek 7). Přeskočili jsme tak výrobní fázi a mohli jsme přistoupit přímo k experimentům. Open Bionics záměrně prodávala tuto ruku jako robotickou, čímž chtěla upozornit na to, že tento model neprošel certifikací medicínského zařízení. To se změnilo v podobě následujícího modelu *Hero Arm*, který už je certifikován jako protetická náhrada. Výrobní data pro *Hero Arm* však už nejsou volně k dispozici.



Obr. 7. Robotická ruka Brunel Hand s odkrytou hřbetní částí

Model ruky *Brunel Hand* je vyroben kombinací různých technologií za použití 3D tisku (3D tisk krytů, 3D tisk forem pro odlévání gumových částí). Konstrukce ruky zajišťuje větší pohyblivost oproti HACKberry, neboť je vybavena čtyřmi lineárními miniaturními servomotory. V modelu nejsou plastová ozubená soukolí, klouby jsou z gumového materiálu. Řídicí systém není univerzální, ale je vyroben přímo pro robotickou ruku (obsahuje procesor i stupně řízení pro motory). Přístupuje se k němu však stejně jako k řídicí desce Arduino.

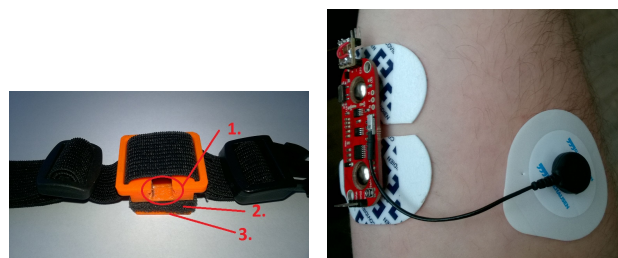
Experimenty s robotickou rukou byly řešeny v rámci studentských prací [10], [13]. Sledovali jsme v nich schopnosti robotické ruky, možnosti řízení pomocí snímačů na předloktí, aplikace v mobilním telefonu nebo pomocí náramku *Myo Armband* (viz níže).

IV. SNÍMAČE K OVLÁDÁNÍ AKTIVNÍCH ELEKTRICKÝCH PROTÉZ

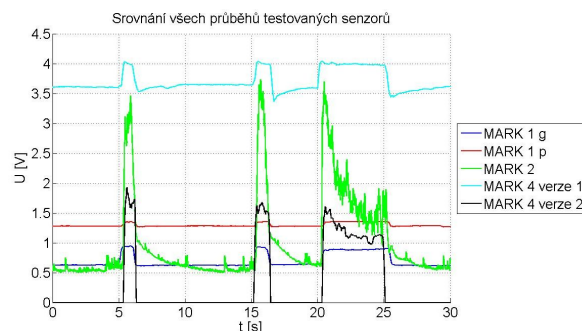
Nezbytnou součástí pro ovládání aktivních elektrických protéz je snímač propojující uživatele s robotickým systémem. V komerčních modelech protéz se používá výhradně snímačů elektromyografických potenciálů (EMG), které nebyly do nedávna dostupné. Z tohoto důvodu přistupovali tvůrci open source projektů k návrhu různých alternativ. Testování těchto snímačů jsme se s kolegy zabývali pracích [5], [6], [14].

Součástí systému ruky HACKberry byl pro účely snímání kontrakce svalů vyvinut tlakový snímač využívající optického principu (obrázek 8 vlevo). V práci [6] jsme zkoumali použití různých alternativ snímačů. Mezi ně patří i EMG snímač *MyoWare* [15] na obrázku 8 vpravo. Jedná se o elektronické zařízení, které bylo vytvořeno pro snadné zpracování EMG naměřených dat.

Na obrázku 9 jsou zobrazeny průběhy testovaných snímačů s viditelným rozdílem v citlivosti snímání kontrakce svalů na předloktí.



Obr. 8. Tlakový snímač k HACKberry ruce (vlevo, 1 – pouzdro se snímačem vzdálenosti, 2 – pružná distanční podložka, 3 – plocha kontaktu s uživatelem) a snímač EMG MyoWare (vpravo) [5]



Obr. 9. Průběhy testovaných snímačů (MARK 1 g – snímač projektu HACKberry, Mark 2 – snímač MyoWare) [5]

Při testování různých EMG snímačů jsme se seznámili s produktem firmy Thalmic Lab (nyní North, [12]) nazvaným *Myo Armband* (na obrázku 10). Jedná se náramek umožňující rozpoznat gesto z informací získaných ze svalů předloktí. Kromě osmikanálového EMG je tento náramek vybaven tříosým gyroskopem, tříosým akcelerometrem a tříosým magnetometrem. Systém svou otevřeností umožňuje přístup k signálům ze všech měřených 17 kanálů.



Obr. 10. Myo Armband [12]

V pracích [13], [16], [19] jsme se zabývali jeho aplikací pro řízení robotických rukou nebo pro diagnostiku únavy při svalové zátěži.

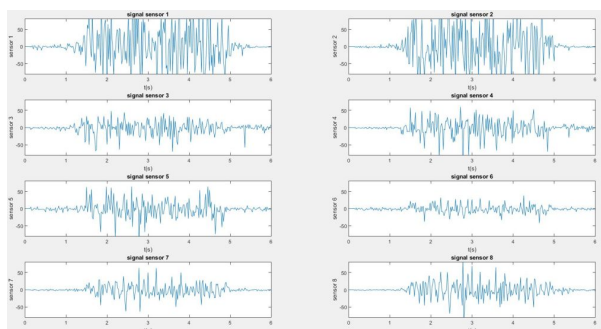
Obrázky 11 a 12 ukazují náramek s očíslovanými EMG elektrodami a průběhy signálu na jednotlivých elektrodách při gestu zatnutí pěsti.

V. VYLEPŠENÍ TISKU TECHNOLOGIÍ SLS

V návaznosti na práci [9], kdy jsme analyzovali 3D tiskové technologie, jsme se zaměřili v práci [17] na optimalizaci 3D tisku technologií SLS. Polohování objektu v tiskovém



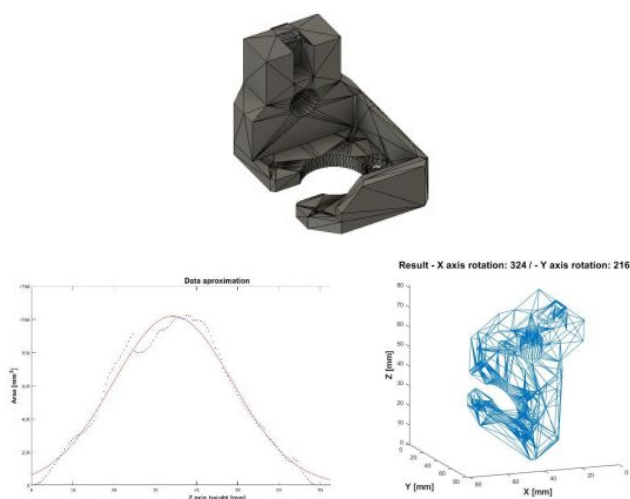
Obr. 11. Myo Armband s čísly elektrod [13]



Obr. 12. Naměřené průběhy na jednotlivých EMG elektrodách Myo Armandu v gestu zatnuté pěsti pravé ruky [13]

prostoru má totiž významný vliv na výslednou rozměrovou přesnost, optické i mechanické parametry vytištěného modelu. Jedná se o multikriteriální úlohu, jejíž řešení není v případě použité SLS tiskárny automatizované a kvalita výsledného tisku tak závisí převážně na zkušenosti obsluhy tiskárny.

V práci jsme se pokusili aplikovat algoritmus vycházející z natočení modelu tak, aby plochy jednotlivých vrstev při tisku měly přibližně tvar Gaussovy křivky, jak ukazuje obrázek 13.



Obr. 13. Testovaný CAD model; křivka ploch jednotlivých vrstev modelu; finálně natočený model pro vložení do tiskového prostoru [17]

Tento způsob optimalizace natočení má za následek postupný přísun energie laserovým paprskem při tisku jed-

notlivých vrstev. Vlivem toho nedochází ve vytisknutém modelu k tak velkému vnitřnímu pnutí materiálu při chladnutí. Zkušenosti získané touto studií mohou být aplikovány u podobných práškových technologií, např. SLM, kterou ja laboratoř LPT také vybavena.

ZÁVĚR

Aktivní protézy horních končetin (robotické ruce) představují krásný příklad mechatronického systému, kde je možné řešit nespočet technických otázek. V kombinaci s dynamicky se rozvíjející technologií 3D tisku se technické otázky a jejich řešení násobí. Z tohoto faktu mohou profitovat hlavně uživatelé protetických náhrad, kterým se dostane finančně dostupná protéza na míru, ale také komunita, jež tvoří smysluplné produkty.

Předložený článek je průřezem projekty řešícími tuto mezioborovou problematiku. V převážné většině se jednalo o spolupráci se studenty, kteří byli z práce s moderními technologiemi nadšení.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena z prostředků MŠMT na institucionální podporu na dlouhodobý koncepční rozvoj, dále pak z darů společnosti Škoda Auto a. s. a Preciosa a. s.

LITERATURA

- [1] "HACKberry: 3D-printable open-source bionic arm", *HACKberry: Open source community*, 2015. [Online]. Dostupné: <http://exiii-hackberry.com>. [Vid. 25. srpna 2019].
- [2] "Enabling the Future: A Global Network Of Passionate Volunteers Using 3D Printing To Give The World A 'Helping Hand.'", 2019. [Online]. Available: <http://enablingthefuture.org>. [Vid. 25. srpna 2019].
- [3] "Limbless Solutions", 2019. [Online]. Available: <https://limbless-solutions.org>. [Vid. 25. srpna 2019].
- [4] *T-UNI 360: Budoucnosti na dosah — vyvíjíme bionickou ruku*, roč. 2016, č. Listopad. Liberec: TUL, 2016.
- [5] P. Najman, "Bionická ruka", Diplomová práce, Liberec, 2017.
- [6] J. Koprnický, J. Šafka, and P. Najman, "3D Printed Bionic Prosthetic Hands", in *Proceedings of the 2017 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics, ECMSM 2017*, 2017, s. 1–6.
- [7] J. Koprnický and P. Najman, "Ovládání bionické ruky vyrobené technologií 3D tisku", in *Trendy v biomedicínském inženýrství*, 2017, s. 1–4.
- [8] "Open Bionics", 2019. [Online]. Dostupné: <https://openbionics.com>. [Vid. 25. srpna 2019].
- [9] J. Koprnický, J. Šafka, and M. Ackermann, "Using of 3D Printing Technology in Low Cost Prosthetics", *Materials Science Forum*, č. 919, s. 199–206, 2018.
- [10] M. Blažek, "Bionická protéza a její propojení s pacientem", Bakalářská práce, Liberec, 2018.
- [11] E. Nyrobtseva, "Control system of bionic hand", Master thesis, Liberec, 2018.
- [12] "Welcome to Myo Support", *Myo Armband by Thalmic Lab*, 2018. [Online]. Dostupné: <https://support.getmyo.com/hc/en-us>. [Vid. 25. srpna 2019].
- [13] A. Richard, "Control system of robotic hand: Myo Armband", Internship report, Liberec, 2018.
- [14] V. Vaníčková, "Snímače bionických náhrad horních končetin", Bakalářská práce, Liberec, 2018.
- [15] "MyoWare Muscle Sensor", 2019. [Online]. Available: <http://www.advancertechnologies.com>. [Vid. 25. srpna 2019].
- [16] C. B. A. Dias, "Development and 3D printing of prosthesis and artificial hands", Internship report, Liberec, 2019.
- [17] Z. Dolenský, "Optimalizace 3D tisku SLS technologií", Bakalářská práce, Liberec, 2019.
- [18] Z. Dolenský, "Optimalizace 3D tisku SLS technologií", in *Studentská vědecká a odborná činnost 2019*, 2019, s. 261–270.
- [19] A. Laurent, "Signal Measurement and Processing from Myo Armband Device", Internship report, Liberec, 2019.

Párování trakčních stejnosměrných motorů, simulace a dlouhodobé zkušenosti z praxe

Jiří Kubín

Institute of Mechatronics and Computer Engineering
Technical university of Liberec
Liberec, Czech republic
jiri.kubin@tul.cz

Želmíra Ferková

Department Electrical Engineering & Mechatronics
Technical University of Košice
Košice, Slovakia
zelmira.ferkova@tuke.sk

Aleš Richter

Institute of Mechatronics and Computer Engineering
Technical University of Liberec
Liberec, Czech Republic
ales.richter@tul.cz

Abstrakt— Ačkoliv čtyři trakční motory na dvou tramvajových podvozcích jedné tramvaje jsou stejného typu a mají stejné štitkové hodnoty, vlastnosti jednotlivých motorů jsou poněkud odlišné. To způsobuje problémy během tramvajového provozu, neboť citlivé elektronické řízení tramvaje vyhodnocuje skluz mezi nápravami a rozpoznává malé rozdíly ve vlastnostech motoru a vyvolá zastavení tramvaje. Aby k těmto případům nedocházelo, byla vyvinuta metoda, která zajišťuje, že motory v jedné tramvaji jsou pod rozlišovací schopností řídicí elektroniky. Tento proces nazýváme párování. Článek se zabývá dlouhodobými zkušenostmi, které jsme získali během používání této testovací metody.

Klíčová slova—trakční motor, sériový kartáčový motor, tramvajové podvozky, ANSYS/Maxwell 3D simulace, párování stejnosměrných motorů

Abstract— Although four traction motors of two undercarriages in one tram car have the same type with the same label parameters, properties of the individual motors are slightly different. This made problems during tram operating because the sensitive electronic control evaluates the small difference of motor's properties like slip and stops trams. There was developed method which ensured that the motors in one tram car are under resolution of control electronic. We call this progress as a pairing. The paper deals with long term experience which we get during using of this testing method.

Keywords— traction drives, series brush motors, tram undercarriages, ANSYS/Maxwell 3D simulation, pairing of DC motors

I. ÚVOD

A. Údržba tramvají v libereckém depu

Dopravní podnik měst Liberce a Jablonce nad Nisou obsluhuje dvě tramvajové tratě pro něž má k dispozici 66 tramvajových vozů. 44 z nich vyjíždí každé ráno do provozu. Zbylé vozy slouží buď jako rezerva pro případné nehody nebo jsou na dlouhodobé střednědobé, nebo krátkodobé údržbě a opravách.

Dlouhodobá údržba spočívá v kontrole všech částí tramvajového podvozku. Je nutné celý podvozek rozebrat a zkontrolovat všechny části (kola, nákolky, osy, převodovky a trakční motory). Největší problém je s testováním trakčních motorů, protože se jedná o sériové trakční motory. Trakční motory jsou při zkoušce přetěžovány a řízeny řízeným usměrňovačem. Zatěžovací pohon je pro tento účel navržen jako stejnosměrný motor s cizím buzením.

B. Typy tramvají v depu Liberec

Většina tramvají používaná v tramvajovém provozu je založena na tramvaji typu T3 (obr. 1). Řada z původních vozů

prošla různým typem modernizace, proto tramvaje obsahují různé typy výzbroje. Historicky nejstarší je odporové řízení. Rychlost stejnosměrného motoru se řídí vkládáním odporů do rotorového obvodu. Tato výzbroj je zastaralá a má nejvyšší spotřebu elektrické energie.

Novější elektronická výzbroj je vybavena IGBT tranzistory. Tramvaje s touto výzbrojí se dělí na dva typy. První z nich je od francouzské společnosti *Segeleg* s obchodním názvem Progres. Druhý typ je z ČKD transportation a tramvaje s touto výzbrojí se označují jako T3.M. Touto výzbrojí se vybavují všechny nejnověji modernizované tramvaje.



Fig. 1. Tramvaj T3 v libereckém depu

Každá tramvaj obsahuje dva trakční podvozky (obr. 2) se čtyřmi nápravami a dvěma páry trakčních motorů, které jsou k nápravám připojeny jednostupňovou převodovkou. Na každém podvozku jsou motory spojeny do série. Oba podvozky jsou k troleji připojeny paralelně.

Štitkové hodnoty všech trakčních motorů jsou stejné:

- výkon $P_{\text{Motor}} = 40 \text{ kW}$
- stejnosměrné trakční napětí $U_{\text{Motor}} = 300 \text{ V}$
- jmenovitý proud $I_{\text{Motor}} = 150 \text{ A}$
- jmenovitá otáčky $n_{\text{Motor}} = 1750 \text{ rpm}$

Přestože všechny motory mají výrobcem uvedeny stejné štitkové hodnoty, ve skutečnosti reálné chování se může být

v praxi velmi rozdílné. Při provozu tramvají to způsobuje obrovské problémy. Stejnosměrné motory se vyrábí a dokud nedojde k průrazu izolace, provozují desítky let. Při dlouhodobé údržbě trakčních motorů se měří parametry rotorů a statorů. Pokud parametry nezajišťují provozní a elektrotechnickou bezpečnost vadná část se vymění. Nová část se zapasuje do původního motoru. Drobná změna vlastností u elektromagnetického materiálu a magnetizační křivky odporové řízení tolerovalo, ale u citlivého elektronického řízení je to problém.



Fig. 2. Tramvajový podvozek se dvěma osami

II. PÁROVÁNÍ TRAKČNÍCH MOTORŮ U TRAMVAJÍ S ŘÍDICÍMI JEDNOTKAMI S IGBT TRANZISTORY

Tramvaje vybavené výzbrojí s IGBT tranzistory obsahují řídicí jednotky, které mimo jiné sledují skluz mezi jednotlivými tramvajovými nápravami. Z různých důvodů se velmi často stává, že otáčky první a druhé nápravy u jednoho podvozku jsou různé. Řídicí systém vyhodnocuje tuto situaci jako chybu. Následně jsou motory odpojeny od trakčního vedení a tramvaj zastaví.

Podobný problém nastává, pokud při stejném napětí mají dva trakční motory různé otáčky. Otáčky stejnosměrného motoru jsou přímo spojeny s indukovaným napětím, tak jak vychází z teorie (viz rovnice 1).

$$U_i = \frac{pN}{a\pi} \cdot \Phi \cdot \omega = c \cdot \Phi \cdot \omega \quad (1)$$

Vysvětlení symbolů v rovnici:

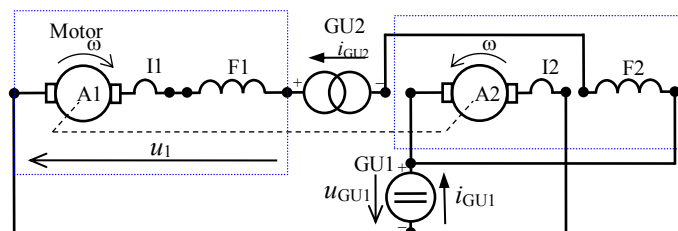
U_i	indukované napětí	[V]
Φ	budící magnetický tok	
	je funkcí zátěžného proudu	[Wb]
c	konstanta stejnosměrného stroje	[-]
p	počet pólů	[-]
N	počet cívek ve větvích	[-]
a	počet větví	[-]
ω	úhlová rychlost	[s ⁻¹]

Indukované napětí je v přímém vztahu s otáčkami, které jsou měřeny řídicí jednotkou. Přestože všechny motory mají stejné štítkové hodnoty, jsou poskládány z různých statorů a rotorů, což má vliv na konstantu stejnosměrného stroje a další parametry. Tím pádem indukované napětí různých motorů je různé. Hlavním důsledkem této skutečnosti je to, že při stejném trolejovém napětí mají motory různé indukované napětí i otáčky.

Měřit indukované napětí přímo je téměř nemožné. Proto byla vyvinuta testovací metoda založená na měření otáček a statorového napětí. K tomu se používá měřicí stolice (obr. 3) s trakčním motorem, který má stejné štítkové hodnoty jako testované motory a využívá se jako zátěž. Testované motory a zátěž jsou napájeny z řízených usměrňovačů. První řízený usměrňovač napájí testovaný motor a druhý usměrňovač hradí ztráty v systému. Silový obvod je na obr. 4



Fig. 3. Měřicí stolice pro testování trakčních motorů



Význam symbolů:

- A1 testovaný motor
- A2 zátěžný stejnosměrný stroj
- GU1 řízený usměrňovač, který hradí mechanické ztráty
- GU2 řízený usměrňovač napájející testovaný motor
- F1 budící vinutí testovaného motoru
- F2 budící vinutí zátěžného stejnosměrného stroje
- I_1, I_2 kotevní proud stejnosměrných strojů
- i_{GU1}, i_{GU2} proudy usměrňovačů

Fig. 4. Blokový diagram testovací stolice

Mechanický popis testovací stolice je na obrázku 5.

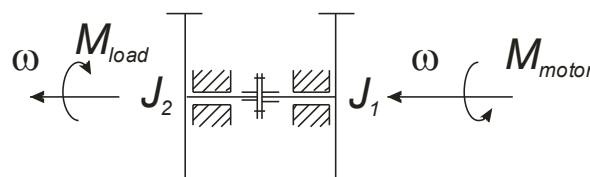


Fig. 5. Kinematické schéma testovací stolice trakčních motorů

Model, který reprezentuje tento mechanický systém je popsán momentovou rovnicí na hřídeli se dvěma trakčními motory.

$$M_{Motor} = J_{Tot} \frac{d\omega(t)}{dt} + M_{Load} + M_{Loss}(\omega(t)) \quad (2)$$

kde:

M_{Motor}	moment na hřídeli motoru,	[N.m]
M_{Load}	zátěžný moment	[N.m]
M_{Loss}	souhrnný moment ztrát třecích a ventilačních,	[N.m]
J_{Tot}	celkový moment setrvačnosti,	[kg.m ²]
ω	úhlová rychlost	[s ⁻¹]

Základem měřicího systému je měřicí karta *NI USB 6212*, která je napojena na desku přístrojových zesilovačů, jejíž účelem je napěťové a impedanční přizpůsobení signálu.

Kotevní a budicí proud obou strojů je snímán třemi snímači LEM LF 305-S/SP10 300 A. Snímače jsou umístěny v přívodu ke strojům na boku testovací stolice. Otáčky hřídele jsou snímány indukčním proximitním senzorem na lopatkách chladicího ventilátoru zatěžovacího stroje. Díky vyššímu počtu lopatek systém měří otáčky i při nízkých rychlostech. Kotevní a budicí napětí obou strojů jsou snímána přímo přístrojovými zesilovači.

III. PÁROVÁNÍ TRAKČNÍCH MOTORŮ, JEHO REALIZACE

Jak již bylo zmíněno, pro srovnání dvou motorů jsou důležité indukované napětí a otáčky. Protože není možné měřit indukované napětí přímo, měří se kotevní napětí.

Test probíhá vždy za stejných podmínek. Testovaný motor je namontován na testovací stoličce a zatížen zatěžovacím pohonem po dobu pěti minut. Během tohoto času se testovaný motor zahřeje. Na konci testu se zaznamená konečné kotevní napětí a konečné otáčky. Průběhy nejdůležitějších veličin jsou ukázány na obr. 6.

Z dlouhodobých zkušeností vyplývá, že motory, které mají rozdíl mezi ± 5 otáček je možné použít do jedné tramvaje.

Zóna necitlivosti je relativně úzká a najít optimální čtyři motory pro jednu tramvaj je komplikované. Proto jsme vytvořili model trakčního motoru abychom našli možnosti jak vlastnosti trakčního motoru změnit [3].

IV. 3D EM MODELOVÁNÍ STEJNOSMĚRNÉHO TRAKČNÍHO MOTORU

Stejnosemnný trakční motor se skládá ze čtyř hlavních pólů a čtyř komutačních pólů.

Při sestavování modelu vycházíme z rovnic stejnosmnného sériového motoru. Pro napětí, moment na hřídeli můžeme využít následující rovnice [3]:

$$u = u_i + R_c \cdot i + L_c \frac{di}{dt} + \Delta U_k \quad (3)$$

$$u_i = C_{Es} i \omega \quad a \quad (4)$$

$$T = C_{Ts} i^2 \quad (5)$$

$$T - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

Symbole pro rovnice (3,4,5,6)

u	napětí na svorkách motoru	[V]
i	kotevní proud	[A]
u_i	indukované napětí	[V]
ΔU_k	úbytek na kartáčích	[V]
R_c	celkový odpor kotevní větve	[Ω]
C_{Es}	emf koeficient	[-]
C_{Ts}	koeficient momentu (CEs= CTs)	[-]
T	moment ve vzduchové mezeře	[N.m]
T_L	zátěžný moment (obsahující mechanické a ventilační ztráty)	[N.m]
J	moment setrvačnosti	[kg.m ²]
ω	úhlová rychlost	[s ⁻¹]

Trakční stejnosmnný motor je simulován v programu ANSYS/Maxwell. Model postihuje především na přechodové děje. Model motoru je vidět na obr. 6. Magnetické pole bylo vypočteno metodou konečných prvků ve 3D space. Příklad rozložení vektoru magnetické indukce je vidět na obrázku 7. Pro potřeby tvorby modelu byl rovněž použit 2D space.

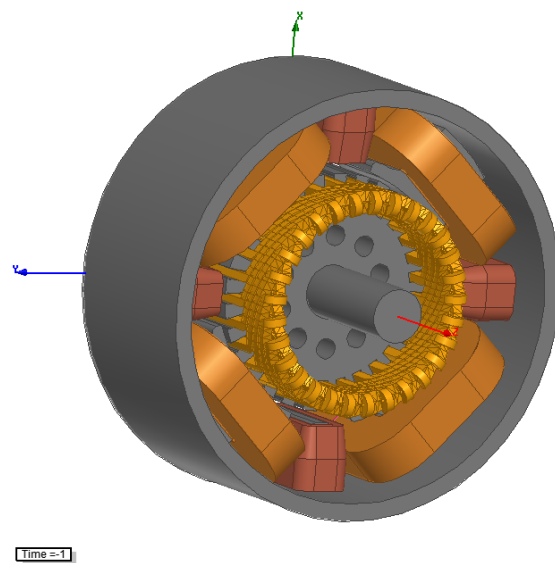


Fig. 6. Dispozice elektromagnetického obvodu stejnosmnného trakčního motoru

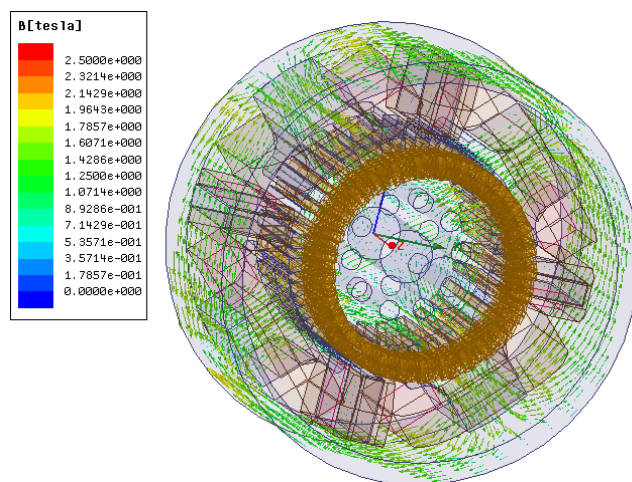


Fig. 7. Vektory magnetické indukce vypočtené ANSYS/Maxwell 3D v ustáleném stavu a jmenovitém momentu

Při dlouhodobé údržbě je možné složit trakční motor ze statoru a z rotoru vyrobené v různých obdobích. Magnetické vlastnosti statorů a rotorů jsou pak rozdílné.

Výrobci magnetických materiálů pro elektrické stroje garantují kvalitu magnetického materiálu na základě magnetizační charakteristiky (závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H). Na obrázku 9. je základní hysterezní křivka transformátorových plechů s označením M600.

Rozptýl vlastností magnetických materiálů mají značný vliv na momentovou charakteristiku stejnosměrného motoru. (obrázek 9). Magnetické obvody statoru a rotoru se vyrábí z stejného materiálu M600, ale hysterezní křivky těchto materiálů vykazují určitou nepřesnost viz mat. A (modrá křivka) až po nepřesnost B (červená křivka).

Mnohem důležitější při párování stejnosměrných motorů při řízení skluзу je rozběhová charakteristika. Na obrázku 10 je rozběhová křivka pro tři typy materiálů s rozdílnými parametry magnetizační křivky.

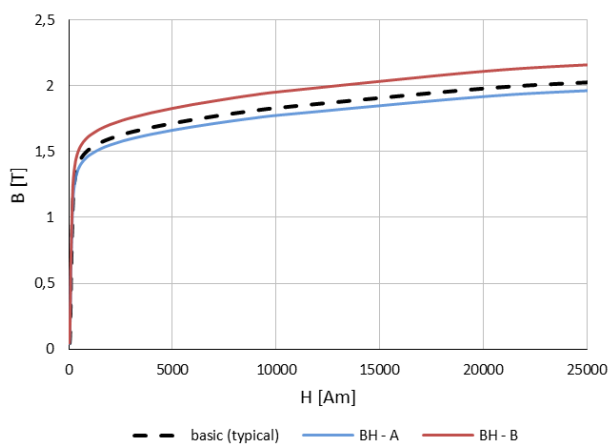


Fig. 8. Magnetizační křivka materiálu M 600 pro různé tolerance. Čárkovaná křivka – typická charakteristika, BH-A – nejhorší magnetické vlastnosti, BH – B - maximální magnetická indukce (+10%).

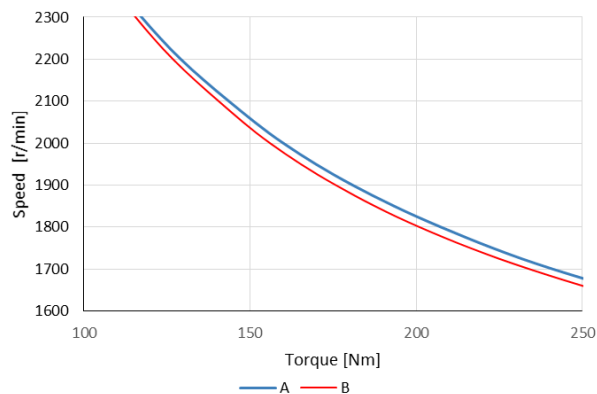
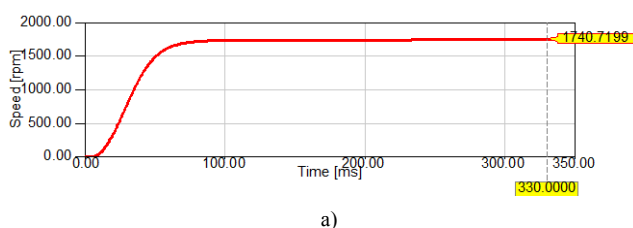
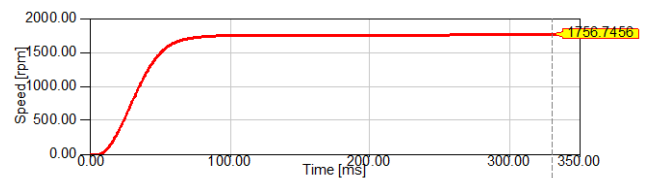


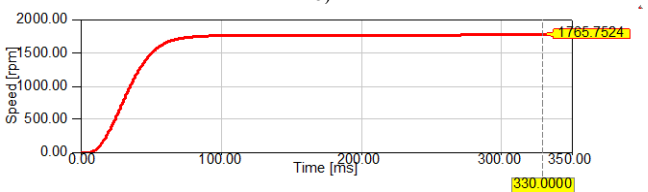
Fig. 9. Momentová charakteristika DC motoru s různými magnetickými materiály mezi rotorovým obvodem a statorovými póly



a)



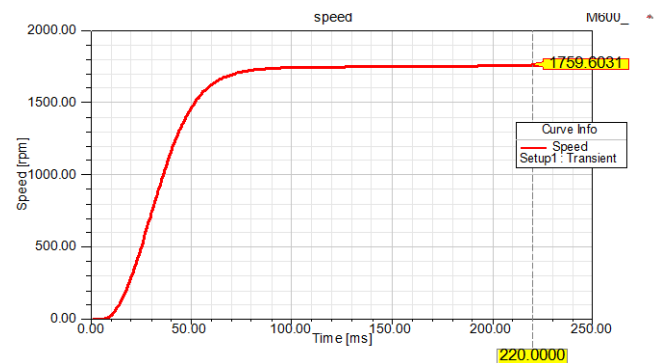
a)



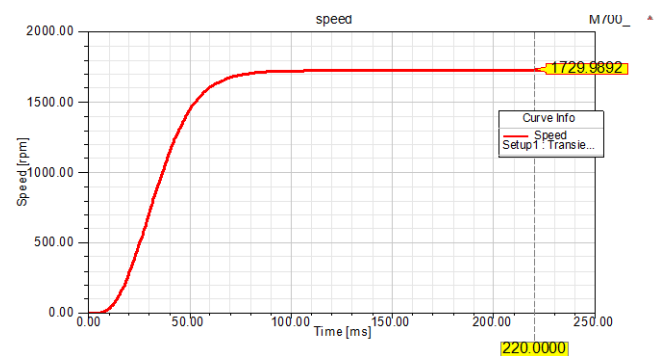
c)

Fig. 10. Rozběhová křivka při různém rozptýlu parametrů v magnetickém materiálu (Obrázek 9) a) BH-A, b) typická hysterezní křivka, c) BH - B

Jak je vidět z obrázku 12, rozdíly v magnetickém materiálu mají vliv na dobu rozběhu i na ustálené otáčky, které se mění v intervalu od 1740 do 1765 ot.min⁻¹. Naproti tomu se požaduje, aby tolerance v ustálených otáčkách motorů na dvou podvozcích se čtyřmi motory nebyla větší než ± 5 otáček za minutu. Je zřejmé, že vliv výrobní tolerance vlastností magnetizační křivky má vliv na úspěšné párování stejnosměrných trakčních motorů. V reálné praxi je mnohem komplikovanější měřit hysterezní křivku, než měřit napětí, proud a otáčky v průběhu zatěžování motoru.



a)



b)

Fig. 11. Rozběhová křivka trakčních motorů se různými materiály rotoru, horní křivka je s transformátorovými plechy M600 a druhá křivka s transformátorovými plechy M700. Ustálený stav je při jmenovitém zatížení

Použitím různých magnetických materiálů (M600 nebo M700) v rotoru přináší drobné rozdíly v ustálených otáčkách pro stejné zatížení.

Větší vliv na ustálené otáčky při zátěži má rozptýl magnetických vlastností ve jhu satoru. Obrázek 12 ukazuje momentovou charakteristiku stejnosměrného motoru pro základní hysterezní křivku a pro odchylku $\pm 5\%$. Maximální rozdíl při jmenovitém zatížení je kolem 40 ot.min⁻¹.

Nesprávná kombinace satoru a rotoru při sestavování motoru může způsobit rozdíl až 100 ot.min⁻¹. Praktický výsledek pro 34 měření na trakčních motorech je ukázán na obr. 13 [4].

Je zřejmé, že rozdíl rychlostí je až 25 ot.min⁻¹ při zatížení od 80 Nm do 250 Nm. To potvrzuje, že testovací metoda s konstantní zátěží je vhodná pro párování trakčních motorů ačkoliv skutečná zátěž se mění velmi rychle a v širokém rozsahu.

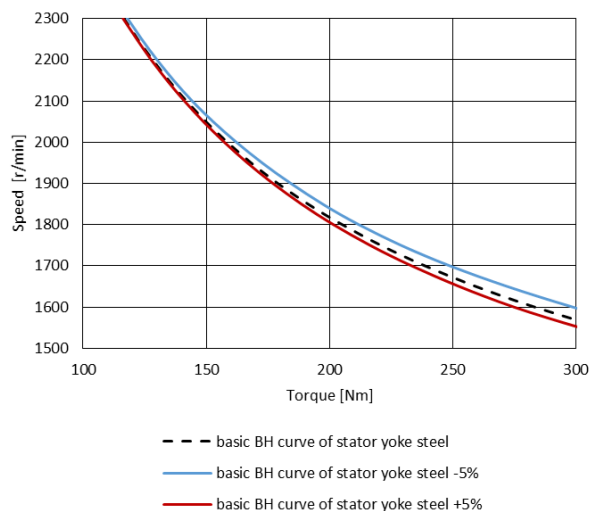


Fig. 12. Momentová charakteristika stejnosměrného trakčního motoru s různými magnetickými materiály ve jhu satoru

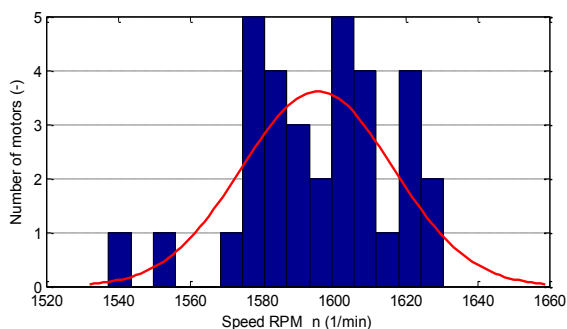


Fig. 13. Histogram otáček motoru pro 34 testovaných motorů

V. ZÁVĚR

Článek shrnuje dlouhodobé zkušenosti s párováním trakčních tramvajových motorů. Problém párování přišel s přestavováním tramvají na elektronickou výzbroj v městě Liberec v podhorské oblasti, kde se v zimě vyskytuje sněhová pokrývka. Problémem je, že na mokřích nebo zasněžených kolejích dochází k prokluzu tramvajových kol, což je další důvod pro párování motorů.

Pracoviště pro testování trakčních motorů bylo implementováno v libereckém tramvajovém depu v roce 2015.

Potvrdilo se, že testování stejnosměrných trakčních motorů na principu základní teorie stejnosměrného stroje je přínosné.

Výstupy z 3D matematických modelů ukazují, že různé vlastnosti magnetických materiálů mají velký vliv na rozběhovou křivku, čímž vznikají rozdíly mezi otáčkami při zatížení v rámci jednotlivých motorů. Prokázalo se, že je opodstatněné testovat stejnosměrné trakční motory na konstantní zátěži.

Další výzkum by se měl zaměřit jha rotoru vyrobených z různých magnetických materiálů a jejich kombinace se jhy satoru. Tento postup by měl v budoucnu usnadnit párování motorů, které v tuto chvíli není možné spárovat, protože jejich otáčky vycházejí při testování příliš vysoké nebo naopak příliš nízké. Kombinací satorů a rotorů s různými magnetickými vlastnostmi můžeme měnit celkové vlastnosti motoru. Dlouhodobé používání metody párování ukazuje, že velmi staré motory mohou být stále používány i s moderním řízením.

Literatura

- [1] Ferková Ž., Richter A.: 3D EM modelling of DC traction motors for pairing of motors in tram undercarriages, SPEEDAM Ischia, Italy, 18th – 20th June, 2014, IEEE Catalog Number: CFP1448A-USB ISBN: 978-1-4799-4750-8, 371-374 pg.
- [2] Kubín J., Richter A.: The Problems of DC Tram Traction Motors Testing in Real Practice, EDPE 2013, 28-30, Dubrovnik, Chorvatsko, ISBN 978-953-56937-8-9, ISSN 1339-3944,
- [3] Kubín J., Richter A.: The Energy Consumption Measurement of Trams in Liberec City, EDPE 2011, 28-30 September, The High Tatras, Slovakia
- [4] Novák M., Ferková Ž., "Analysis of tram DC traction motors pairing," 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), Varna, Bulgaria, 2016, pp. 631-636. doi: 10.1109/EPEPEMC.2016.7752068,
- [5] Diblík M., Černohorský J., "Advanced servo-drive reference-model control application", *Carpathian Control Conference (ICCC) 2012 13th International*, pp. 109-114, 2012. ISBN: 978-145771868-7, DOI: 10.1109/Carpathian CC.2012.6228625

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl pořízen na základě česko – slovenské spolupráce

Příspěvek byl pořízen z finanční podpory Ministerstva školství, mládeže tělovýchovy a sportu a Evropskou unií (Evropský strukturální a investiční fond – Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání) v rámci projektu „Modulární platforma pro autonomní podvozky specializovaných elektrovozidel pro dopravu nákladu a zařízení“ Reg. No. CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_025/0007293.

Výzkum na slovensku uvedený v tomto příspěvku byl podpořen slovenskou agenturou pro výzkum a vývoj z projektu číslo APVV-15-0750.

The Asset Administration Shell of Operator in the Platform of Industry 4.0

Petr Marcon

*Department of Theoretical and
Experimental Electrical Engineering
Brno University of Technology, FEEC
Brno, Czech Republic
marcon@feec.vutbr.cz*

Tizian Schröder

*Institut für Automatisierungstechnik
Otto von Guericke-Universität
Magdeburg
Magdeburg, Germany
tizian.schroeder@ovgu.de*

Tomas Benesl

*Department of Control and
Instrumentation
Brno University of Technology, FEEC
Brno, Czech Republic
xbenes23@vutbr.cz*

Christian Diedrich

*Institut für Automatisierungstechnik
Otto von Guericke-Universität
Magdeburg
Magdeburg, Germany
christian.diedrich@ovgu.de*

Alexander Belyaev

*Institut für Automatisierungstechnik
Otto von Guericke-Universität
Magdeburg
Magdeburg, Germany
alexander.belyaev@ovgu.de*

Zdenek Bradac

*Department of Control and
Instrumentation
Brno University of Technology, FEEC
Brno, Czech Republic
bradac@feec.vutbr.cz*

Frantisek Zezulka

*Department of Control and
Instrumentation
Brno University of Technology, FEEC
Brno, Czech Republic
zezulka@feec.vutbr.cz*

Jakub Arm

*Department of Control and
Instrumentation
Brno University of Technology, FEEC
Brno, Czech Republic
xarmja00@vutbr.cz*

Ivo Vesely

*Department of Control and
Instrumentation
Brno University of Technology, FEEC
Brno, Czech Republic
veselyi@feec.vutbr.cz*

Abstract—We discuss the Asset Administration Shell (AAS) concept of Industry 4.0 (I4.0), characterizing the current status of industrial automation and outlining the advantages of more deeply digitized manufacturing where the AAS is employed. In the proposed analysis, the basic subjects are apply complemented with possible submodels and standards of the Asset Administration Shell (identification, communication, engineering, configuration, safety, security, life cycle status, energy efficiency, condition monitoring, and examples of AAS-based applications). An exemplary interaction pattern directed towards the domain, or specific submodels in the AAS, is also introduced in the given context. Further, the authors propose a specific digital example of an operator using a smart jacket.

Keywords—asset administration shell, industry 4.0, MQTT, OPC UA, RAMI 4.0

I. INTRODUCTION

In the European interpretation, the Internet of Things (IoT) is segmented into the CIoT (Commercial Internet of Things) and the IIoT (Industrial Internet of Things). The CIoT abbreviation is not used frequently, and the IoT represents the Internet of all things. In American technical terminology, however, the IoT covers the entire set of concepts subsumed under Industry 4.0 (I4.0) within the European approach.

The most significant recent achievement has been materialized through the European-made definition of the Asset Administration Shell (AAS) chapter of I4.0. The AAS is an item that stands out among all the Industry 4.0 notions: it creates an interface between the physical and the virtual production steps, embodying a virtual digital and active representation of an I4.0 component in the I4.0 system.

The Industry 4.0 component is a model for describing in more detail the properties of cyber-physical systems, namely, real objects in a production environment networked with

virtual objects and processes. Hardware and software components in production environments, from production systems and machines to internal machine modules, become Industry 4.0-capable by satisfying such properties [1].

Any production component in the I4.0 environment has to have an administration shell. The structure of the AAS is then expected to satisfy the requirements of different production aspects and has to enable the functionality of I4.0 components from all basic perspectives, including the market, construction, power, function, positioning, security, communication ability, and understandability domains.

This article characterizes the basic structure and properties of the AAS, aiming to outline the benefits of the AAS together with the differences between the current state of things (things) and things with the AAS.

II. MODELS OF INDUSTRY 4.0

The fundamental model of I4.0 exploits RAMI 4.0 (the Reference Architecture Model Industry 4.0, Fig. 1), a tool designed by the BITCOM, VDMA, and ZVEI corporations and associations. These subjects decided to develop a 3D model to represent all the diverse manually interconnected features of the technic-economic properties. The SGAM model (the Smart Grid Architecture Model), formed to foster communication in renewable energy sources' networks, appeared to embody an appropriate model for Industry 4.0 applications as well [2-3]. As a matter of fact, RAMI 4.0 is actually a small modification of the SGAM framework [4-6].

As both the SGAM and the RAMI 4.0 bodies are entered into by approximately fifteen industrial branches, RAMI 4.0 is structured to facilitate being viewed from different perspectives and aspects. The layers in the vertical axis thus represent the various viewpoints associated with the individual aspects (those of the relevant market, functions,

information, communication, and integration abilities of the components) [7,8].

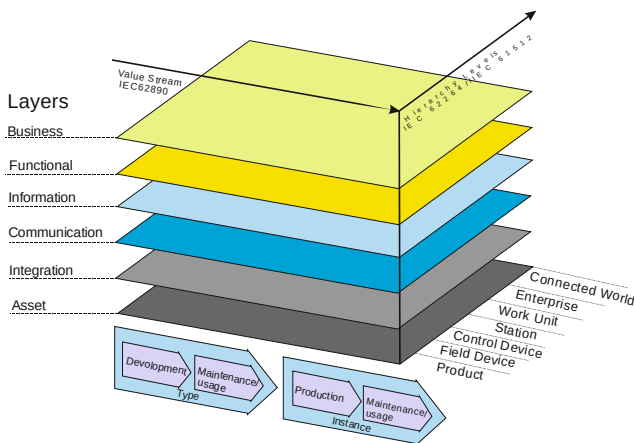


Fig. 1. The RAMI 4.0 model [5], inspired by ZVEI, VDI/VDE [1].

In modern engineering, a very important criterion consists jointly in product life cycle and the related value stream. The feature is displayed on the left-hand horizontal axis in the above image. The set of items expressed comprises, for example, constant data acquisition throughout the entire life cycle. By extension, even with a completely digitized development cycle, the market chain still offers a large potential for improving the products, machines, and other layers of the I4.0 architecture. This viewpoint matches well the IEC 62890 draft standard.

The other corresponding model axis (the right-hand one at the horizontal level) indicates the positions of component functions in I4.0, defining and assigning the functionalities involved. The axis respects the IEC 6224 and 61512 standards; however, these are intended for the specification of components at positions applicable to one enterprise or manufacturing unit only. Thus, the highest level on the right-hand horizontal axis is the connected environment.

A second essential model for the purposes of I4.0, developed by BITCOM, VDMA, and ZVEI last year, is the I4.0 components model (Fig. 2).

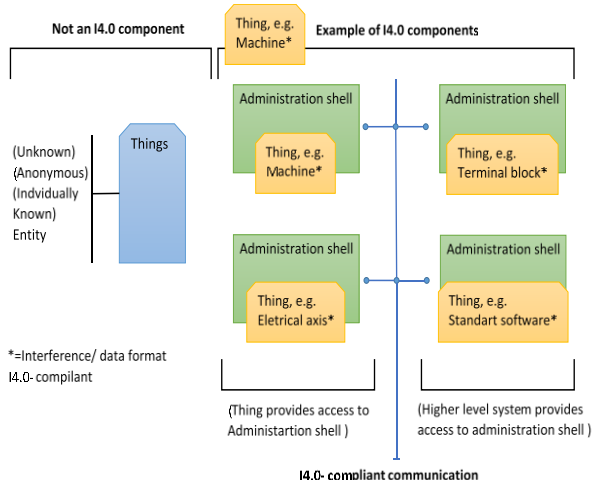


Fig. 2. The Asset Administration Shell [6], inspired by VDI/VDE [9].

This framework is intended to help producers and system integrators to create HW and SW components for I4.0, and it embodies the first and only (as of July 2016) specific model based on RAMI 4.0. Significantly, the concept allows refined description of relevant cyber-physical features and enables us to characterize the communication between virtual and cyber-physical objects and processes [9], [10]. Within manufacturing of the future, the HW and SW components will be capable of executing the requested tasks by means of the implemented features specified in the I4.0 components model.

The most critical feature in the discussed context is the ability of the virtual objects and processes to communicate with their real counterparts during manufacturing; this model then specifies the conforming communication. The corresponding physical realization rests in that a component of the I4.0 system utilizes an electronic container (shell) of secured data during the entire life cycle; the data are available to all entities of the technical production chain. The model therefore arises from the standardized, secure, and safe real-time communication of all components in the production cycle. The electronic data container (shell) and the global Industry 4.0 component model are visualized in Fig. 3, which also displays a diagram of the AAS as a crucial I4.0 component (Fig. 3).

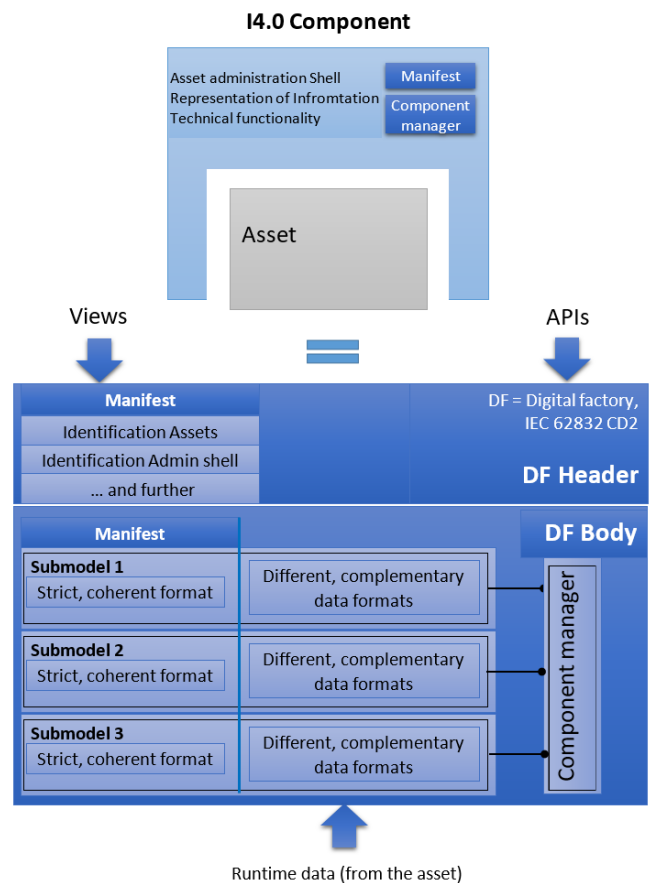


Fig. 3. The Asset Administration Shell, inspired by [9].

III. ASSET ADMINISTRATION SHELL

The AAS creates an interface between the physical and virtual production steps; the framework is the virtual digital and active representation of an I4.0 component in the I4.0

system, more information you can find in literature [1] and [5].

As already pointed out above, any production component in the I4.0 environment needs an administration shell. The structure of the AAS is then expected to satisfy the requirements of different production aspects and has to enable the functionality of I4.0 components from all basic perspectives, including the market, construction, power, function, positioning, security, communication ability, and understandability domains.

The AAS is composed of a body and a header; the header contains identifying details regarding the asset administration shell and the represented asset, while the body comprises a certain number of submodels for an asset-specific characterization of the asset administration shell.

As is obvious from Fig. 3, the AAS accommodates a series of submodels. These represent different aspects of the asset concerned; thus, for example, they may contain a description relating to the safety or security but also could outline various process capabilities, such as drilling or installation. Possible submodels of the AAS are indicated in Fig. 4.

Generally, the aim is to standardize only one submodel for each aspect. Such a scenario will enable us to search for, e.g., a welding machine via seeking the AAS containing “welding” with relevant properties. A second submodel in the example, e.g., “energy efficiency”, could ensure that the welding station will save electricity when idling.

Each submodel contains a structured quantity of properties which can refer to data and functions. A standardized format based on the IEC 61360 is required for the properties; the data and functions may be available in various complementary formats.

Administration Shell IEC TR 62794 & IEC 62832 Digital factory	
Submodels	Standards
Identification	ISO 29005 or URI unique ID
Communication	IEC 61784 Fieldbus profiles
Engineering	IEC 61360/ISO13584 Standard data elem.; IEC 61987 Data structures and elements; Ecl@ss database with product classes
Configuration	IEC 61804 EDDL; IEC 62453 FDT
Safety (SIL)	EN ISO 13849; EN/IEC 61508 Functional safety discrete; EN/IEC 61511 Functional safety process; EN/IEC 62061 Safety of machinery
Security	IEC 62443 Network and system security
Lifecycle status	IEC 62890 Lifecycle
Energy Efficiency	ISO/IEC 20140-5
Condition monitoring	VDMA 24582 Condition monitoring
Examples of AAS usage	Drilling, Milling, Deep drawing, Clamping, Welding, Painting, Mounting, Inspecting, Printing, Validating ...

Fig. 4. Possible AAS submodels, inspired by [11].

The properties of all the submodels therefore result in a constantly readable directory of the key information, or, by another definition, the manifest of the asset administration shell and thus also of the I4.0 components. To enable binding semantics, the asset administration shells, assets, submodels, and properties must be clearly identified. The permitted global identifiers are the ISO 29002 – 5 (e.g., eCl@ss and the

IEC Common Data Dictionary) and URIs (Unique Resource Identifiers, e.g., for ontologies).

Figure 5 shows how an interaction pattern is directed towards the domain-specific submodels in the asset administration shell; the process is illustrated on a possible example from a discrete manufacturing procedure.

As regards the language for I4.0, Fig. 6 presents an approach to the item from the sub-working standardization group [5].

In a component of I4.0, such purposes are facilitated by the interaction manager, the tool responsible for the processing of the interaction patterns in the network. A domain-independent basic ontology then safeguards the connection with the domain-specific submodels in the AAS.

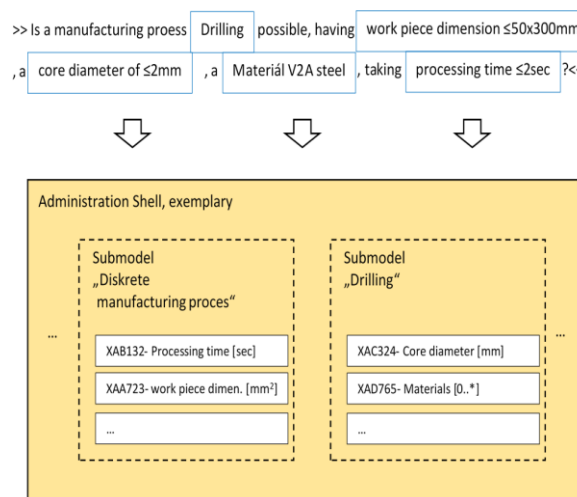


Fig. 5. An interaction pattern directed towards the domain-specific submodels in the AAS, inspired by ZVEI [5].

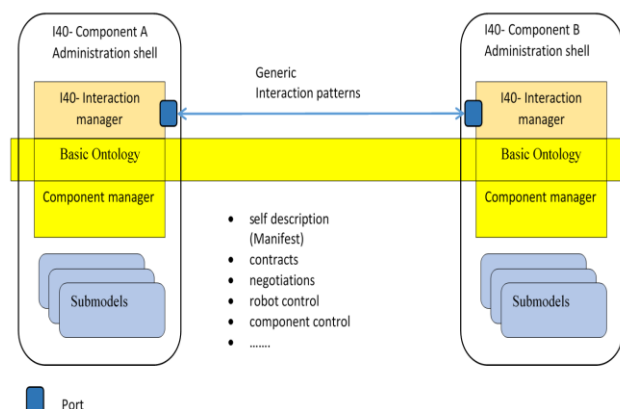


Fig. 6. An approach to the topic “Languages of I4.0” (Source: prof. Diedrich, Platform Industrie 4.0 Working Group 1, Ontology Sub-Working Group).

IV. OPERATOR ASSET ADMINISTRATION SHELL

As mentioned earlier, every production element (e.g., a product, a machine, or control systems) has its own AAS in the context of I4.0. The question, however, is how to implement an operator AAS.

In this paper, we use the example of an operator AAS represented by a Human-Machine Interface (HMI); for demonstration purposes, we also attached a smart-jacket to this AAS. Figure 7 shows the block diagram of an operator AAS and the communication interface with other AASs in a manufacturing process.

The HMI includes information about the operator and also values from the smart jacket sensors. A major component of the AAS, then, is the NodeRED programming tool, which can run on, for example, a Raspberry PI. NodeRED comprises three significant elements: a) an OPC UA bridge to facilitate data conversion from string or MQTT messages into an OPC UA message ; b) an OPC UA client to communicate information to other AASs, such as an AAS or MES service and transport units, in the production area; and c) an OPC UA server to receive information for visualizing the Graphical User Interface (GUI).

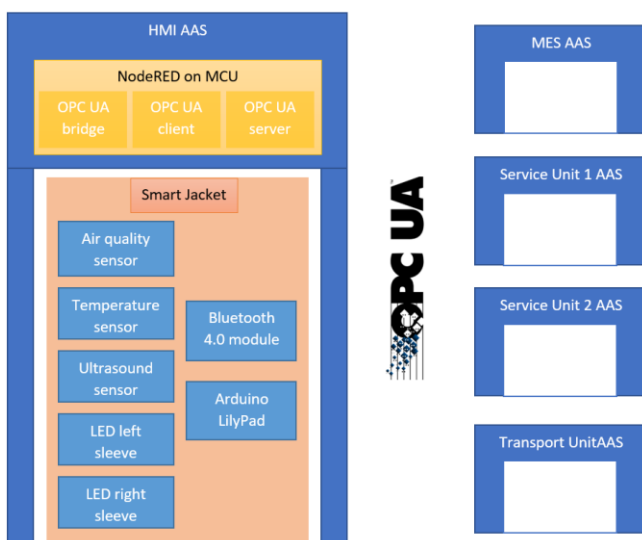


Fig. 7. A smart jacket operator represented via an HMI.

A. Properties of the Smart Jacket

Based on the scenario and intention to control and monitor important industrial parameters at a shop floor, the smart maintenance jacket is integrated with a use case. To preserve worker or operator safety on the industry shop floor, the item is configured with an Arduino LilyPad and sensors (Fig. 8), [12] and [13]. The primary functionality and components of the jacket are explained below.

The central part of the smart maintenance Jacket consists in an Arduino Lilypad with a SparkFun bluetooth module (BlueSMiRF). The Lilypad is suitable for smart wearable things (e-textile projects) because of its size and weight. The Lilypad model configured in the jacket utilizes an ATmega168 microcontroller, which has 14 analogue and digital I/Os.

The BlueSMiRF is the latest Bluetooth 4 wireless serial cable replacement by SparkFun Electronics. The modems work as a serial (RX/TX) pipe: any serial stream from 2,400 to 115,200bps can be passed seamlessly from our Arduino.

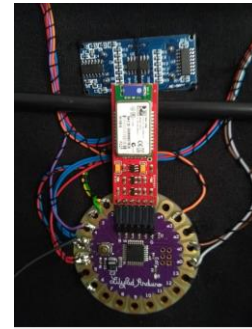


Fig. 8. An Arduino LilyPad with a bluetooth and an ultrasonic modules.

An MQ-135 air quality sensor (Fig. 9) detects NH₃, NO_x, alcohol, benzene, smoke, or CO₂ and ensures air quality analysis. This sensor is then configured with the smart maintenance jacket, with the aim to prevent breathing at a polluted area or processing plant.



Fig. 9. An MQ-135 air quality sensor.

Figure 10 (left) shows an HC-SR-04 ultrasonic sensor. This small module is a cheap solution to measure distance up to 4-5 meters via ultrasound.

In order to avoid hazardous situations at the shop floor (heavy manufacturing plants), this ultrasonic sensor warns the bearer quickly with a buzzer located at the back side of the jacket neck.

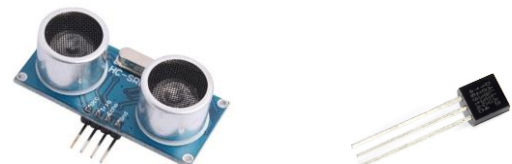


Fig. 10. Left: an HC-SR-04 ultrasonic sensor; right: a DS18B20 1-wire temperature sensor.

For the temperature measurement, we used a DS18B20 1-Wire digital temperature sensor by Maxim IC, Fig. 10 (right). The device reports degrees in Celsius between -55°C and 125°C at 9 to 12-bit precision, with a resolution of $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Each sensor has a unique 64-bit serial number etched into its body; this allows a large number of sensors to be used on one data bus.

The smart jacket contains an RGB LED strip (five diodes) on the left and right sleeves. If the MQ-135 sensor recognizes impaired air quality, the operator's right sleeve flashes yellow. If distance sensor detects a problem nearby, both sleeves blink red and the buzzer produces an intermittent tone. Similarly, if a fault in the manufacturing process is found, the left sleeve will flash red and the right one green. The operator then identifies the GUI where the malfunction occurred.

B. NodeRED on an MCU

Figure 11 displays a block diagram representing the algorithms implemented in the NodeRED programming environment.

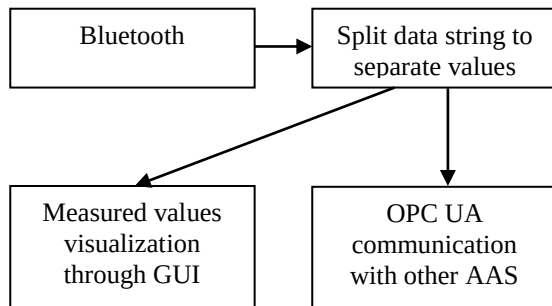


Fig. 11. A DS18B20 1-wire temperature sensor.

The serial data are received via a Bluetooth module. We obtain one string consisting of the temperature value, distance value, and air quality. The next step is to split the data into separate variables to be publishable via the GUI. Figure 12 presents the current and daily data of the measured values in charts. In addition to the actual visualization, the measured data can be sent to the OPC UA server [14]. To execute this operation, we use the node OPC UA IIoT Write.

The Write node facilitates sending the data to the OPC UA server: It handles single and multiple data requests. All write requests will produce an array of *StatusCodes* for writing in the server.



Fig. 12. The Graphical User Interface: the value measured by the smart jacket.

V. CONCLUSION

The article summarizes the basics of the Asset Administration Shell and its application in I4.0. In this context, the frameworks of the Industry 4.0 component model and the Asset Administration Shell are demonstrated as the key factors to allow the interconnection of individual production components. The related bidding and quotation processes, together with the communication between two assets, are exemplified in Fig. 4. The German approach to

developing and implementing I4.0 principles into different case studies is employed throughout the presentation. In chapter IV, an AAS suitable for an operator wearing a smart jacket serviced via an HMI is characterized, together with the relevant implementation. The measured values in Fig. 12 are displayed through the GUI.

ACKNOWLEDGMENT

The authors acknowledge financial support from the Technology Agency of the Czech Republic (TF04000074 - Digital Representation of Assets as a Configurable AAS for OT and IT Production Systems) The research was also supported by the Ministry of Education, Youth and Sports under project No. CZ.02.2.69/0.0/0.0/16_027/0008371 - "International mobility of researchers at the Brno University of Technology".

REFERENCES

- [1] ZVEI, VDI/VDE, *Industrie 4.0. Technical Assets*, Status Report, 2016.
- [2] P. Marcon, Z. Szabo, I. Vesely, F. Zezulka, O. Sajdl, Z. Roubal, P. Dohnal. "A Real Model of a Micro-Grid to Improve Network Stability," *Appl. Sci.* Vol. 7, No. 8, 757, 2017.
- [3] J. Kolarik and Z. Slanina, "Fuzzy control application in swarm robotics cars," 18th International Carpathian Control Conference (ICCC), Sinaia, pp. 327-331, 2017.
- [4] M. Mikolajek, V. Otevrel, J. Koziolek and Z. Slanina, "Data Trends in Industry Automation Using .NET Framework," *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 48, No. 4, pp. 418-423, 2015.
- [5] ZVEI, Examples of Assets Administration Shell for Industrie 4.0 Components- Basic Part, 2017
- [6] F. Zezulka, P. Marcon, I. Vesely, and O. Sajdl, "Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon," *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, No. 25, pp. 8-12, 2016.
- [7] Ch. Manzei, L. Schleupner, R. Heinze, "Industrie 4.0 im internationalen Kontext," VDE Verl. GmbH, Beuth Verlag, Berlin, 2016.
- [8] Industrie 4.0, Open Automation, Special Issue to the Hannover Industriemesse 2016, VDE Verlag, pp. 2 – 4., 2016.
- [9] VDI/VDE, "Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik - Status report," Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0), 2015.
- [10] T. Bangemann, M. Riedl, M. Thron and C. Diedrich, "Integration of classical components into industrial cyber-physical systems," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 104, No. 5, pp. 947-959, 2016.
- [11] ZVEI, *Beziehungen zwischen I4.0-Komponenten-Verbundkomponenten und intelligente Production*. Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente SG Modelle und Standards. 2017.
- [12] J. Schubert, V. Helmut, G. Joost, K. Bredies, "Smart maintenance jacket," project documentation, july 2016.
- [13] D. R. Zalavadiya, "Concept and Demonstrator of a Monitoring and Controlling Application in the context of Industry 4.0: Industrial and IoT equipment Integration using oneM2M," master degree thesis, IFAT OVGU Magdeburg, 2018.
- [14] OPC UA Foundation, OPC UA: Interoperability for Industrie 4.0 and the Internet of Things New Edition v8, 2018.
- [15] Unified Automation, Online Reference Documentation, retrieved from url <http://documentation.unified-automation.com/index.html>, 2018.

Detektor mimoriadnych udalostí v cestnom tuneli

Detection of road tunnel incidents

Rastislav Pirník
Katedra riadiacich a informačných systémov
Fakulta elektrotechniky a informačných technológií
Žilina, Slovensko
rastislav.pirnik@fel.uniza.sk

Abstrakt—Príspevok porovnáva dva detekčné systémy mimoriadnych udalostí v cestnom tuneli a predstavuje možnosti radarového systému pri mapovaní aktuálnej situácie pri požiari v tuneli.

Kľúčové slová—PLC, radar, videodetekcia, CRS tunela.

Abstract — The paper compares two road tunnel incident detection systems and presents the possibilities of the radar system for mapping the current situation in a tunnel fire.

Keywords — PLC, radar, Video Detection, CCS tunel.

I. ÚVOD

Pre správnu a predovšetkým bezpečnú prevádzku tunela je nutné zabezpečiť bezporuchovú činnosť a vzájomnú súčinnosť všetkých technologických celkov. Medzi jednotlivými celkami tunelového systému existujú vzájomné funkčné väzby, ktoré sú realizované ich priamym prepojením, alebo prepojením prostredníctvom centrálného riadiaceho systému (CRS) tunela. Členenie technologického vybavenia tunela je znázornený na obr. 1, kde sú vyznačené väzby konkrétnej technológie k CRS.

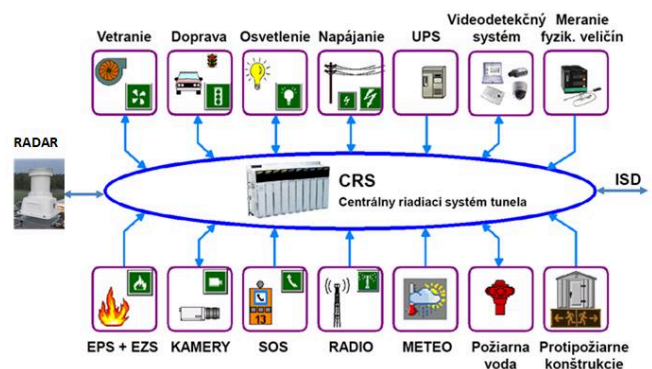
Povinnosť vybaviť cestný tunel konkrétnym technologickým vybavením ukladá priamo legislatíva Slovenskej republiky Nariadením vlády č. 344 z 24. mája 2006 o minimálnych bezpečnostných požiadavkách na tunely v cestnej sieti. Tento dokument reflektuje požiadavky Smernice Európskeho parlamentu a Rady 2004/54/ES z 29. apríla 2004 o minimálnych bezpečnostných požiadavkách na tunely v transeurópskej cestnej sieti. Zároveň kategorizuje cestné tunely o dĺžke nad 500 m z pohľadu:

- Dĺžky tunela.
- Počtu tunelových rúr.
- Počtu jazdných pruhov.
- Geometrie prierezu.
- Vertikálneho a horizontálneho trasovania.
- Druhu konštrukcie.
- Jednosmernej alebo obojsmernej premávky.

- Intenzity premávky na jednu rúru (vrátane časového rozloženia).
- Rizika kongescie (dennej alebo sezónnej).
- Prístupového času pre pohotovostné služby.
- Prítomnosti a podielu ťažkých nákladných vozidiel.
- Prítomnosti, podielu a druhu prepravy nebezpečného tovaru.
- Charakteristiky prístupových ciest.
- Šírky jazdného pruhu.
- Aspektov vzťahujúce sa na rýchlosť.
- Geografického a meteorologického prostredia.

do šiestich skupín:

- a) kategória TA;
- b) kategória TB;
- c) kategória TC-H; d) kategória TC;
- e) kategória TD-H a f) kategória TD.



Obrázok 1. Delenie technologického vybavenia tunela s už navrhovaným radarovým systémom

II. VIDEODETEKCIA VERZUS RADAR

Je to systém, ktorý na základe inteligentnej analýzy obrazu z kamier kamerového dohľadu v reálnom čase umožňuje automaticky upozorniť obsluhu na mimoriadnu

udalost' v sledovanej oblasti a tak rýchlejšie, operatívnejšie a účinnnejšie reagovať na aktuálny priebeh prevádzky v jazdných prúdoch tunelových rúr, alebo na diaľniciach.

Systém automatickej detekcie incidentov (AID) založený na kamerovom princípe je vždy súčasťou analógového alebo digitálneho video detekčného systému dohľadu v tunelových rúrach. Inteligentnou analýzou obrazu AID sú vybavené buď priamo kamery určené pre monitorovanie dopravy inštalované v tunelových rúrach, alebo obraz – stream z kamier je privedený a vyhodnocovaný v samostatných zariadeniach - moduloch pre AID.

Systémom AID musí byť vybavená každá kamera, resp. so systémom AID musí byť spojená každá kamera v tunelovej rúre určená na sledovanie dopravy. Výstup AID musí byť implementovaný do CRS tunela a jej vizualizácie. Na základe voľne konfigurovateľných oblastí musí systém umožniť sledovanie a vyhodnocovanie mimoriadnych udalostí v doprave ako:

- Stojace vozidlo.
- Vozidlo v protismere.
- Náhlý pokles rýchlosti dopravného prúdu.
- Sledovanie dopravy: normálna, hustá, spomalená, zápcha, doprava stop and go.
- Dym v tuneli.
- Chodec.
- Vypadnutý objekt na vozovke (napr. stratený náklad, trosky a pod.).

Počet falošných poplachov za deň nesmie presiahnuť počet tri a rýchlosť identifikácie incidentu, maximálna prístupná doba do vyhlásenia udalosti od vzniku náhle vznikajúcej udalosti musí prebehnúť do 10 sekúnd. [4][6][9]

V poslednej dobe sa systémy AID založené na kamerovom systéme úspešne nahrádzajú radarovými systémami ako je aj systém ClearWay pre automatickú detekciu mimoriadnych incidentov v doprave. Detektory tvoria radarové zariadenia (obr. 2) a systém poskytuje spoľahlivé a presné sledovanie vozidiel a rýchlu detekciu mimoriadnych incidentov na cestách, mostoch aj v cestných tuneloch. Takýmto spôsobom zvyšuje bezpečnosť a znižuje dopravné zápchy.



Obrázok 2. Radar od firmy NAVTECH použitý v systéme ClearWay

Výhodou tohto systému je najmä jeho schopnosť spoľahlivo pracovať a detegovať v podmienkach ako je:

- Hmla.
- Dážď.
- Sneh.
- Tma.
- Dym a horúce plyny.
- Priame oslnenie / osvetlenie zariadenia.

Dokáže detegovať širokú škálu incidentov ako sú:

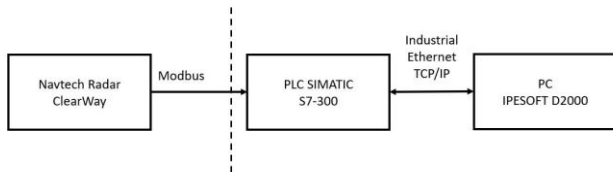
- Detekcia zastaveného vozidla.
- Detekcia pomalého alebo rýchleho vozidla.
- Detekcia vozidla idúceho do protismery.
- Detekcia chodcov alebo zvierat.
- Detekcia prekážok na vozovke [1][2].

Hlavná výhoda systému je nízka početnosť falošných alarmov, čiastočne overená experimentom v diplomovej práci [3], kde sme dosahovali priemerne jeden falošný alarm na senzor a deň. Ďalej jeho rýchla časová odozva, presné sledovanie vozidiel a chodcov s presnosťou detekcie na 25cm pričom detekcia incidentu sa vykonala do 10 sekúnd od jeho vzniku. Rozmiestnenie samotných detektorov sa určuje tak aby sa vzájomne prekrývali a od seba majú byť vzdialené 500m pričom dosah radaru je max 1000 metrov. Ak radarový snímač v mieste udalosti zlyhá, úsek je sledovaný susednými radarovými senzormi. Systém ClearWay zároveň sleduje parametre dopravného toku ako rýchlosť vozidla, priemerná rýchlosť, umožňuje klasifikovať vozidlá podľa veľkosti, detegovať smer pohybu vozidla, detegovať medzery medzi vozidlami a následne vytvárať štatistiky [4][5][6].

A. Realizácia systému AID založeného na radarovom detektore

Pri realizácii testovacej sme vychádzali z blokovej schémy implementácie radarového systému do riadenia

tunela na obrázku 1. Samotný tok informácií (alarmov) v skúšobnej konfigurácii znázorňuje obr. 3.

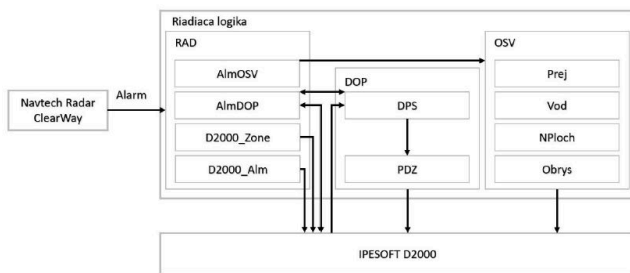


Obrázok 3. Radar od firmy NAVTECH použitý v systéme ClearWay

Samotné riadiace PLC je prepojené so systémom vizualizácie prostredníctvom komunikačnej priemyselnej siete Industrial Ethernet. Vizualizačný systém D2000 využíva natívny komunikačný protokol SIMATIC S7 ISO on TCP. Tento protokol umožňuje jednoduché pripojenie k PLC automatu a zber dát len prostredníctvom adresy dátového bloku a adresy danej premennej.

Radarový systém pracoval ako samostatná technológia, ktorej signály boli privedené do simulačného systému CRS pre potreby vizualizácie. Pod signálmi rozumieme jednotlivé alarmy a správy o stave dopravy. CRS následne komunikovala s radarovým systémom v zmysle potvrdzovania vybraných alarmov, ktoré boli nakonfigurované ako alarmy vyžadujúce potvrdenie operátorom.

Aplikačné programové vybavenie riadiaceho automatu (APV) je vytvorené vo vývojovom prostredí Step 7 a programovaný jazykom Function Block Diagram (FBD). Štruktúra programu je logicky členená podľa troch technologických celkov, ktoré sú dotknuté činnosťou radaru. Ide o samotné spracúvanie radarových signálov, riadenie osvetlenia a riadenie dopravy. Na obr. 4 je znázornená bloková schéma so spomenutými celkami a aj ich jednotlivé časti. V blokovej schéme je naznačená väzba na Clearway systém, vizualizáciu a komunikácie medzi blokmi.



Obr. 4. Konfigurácia v programe Step 7

Blok RAD je určený na spracovanie alarmov z radarového systému a ich preloženie pre ďalšie technológie do formy, s ktorou môžu ďalej pracovať. Tento blok obsahuje tieto funkčné bloky:

- AlmOSV – Slúži na vygenerovanie signálov do riadenia osvetlenia na základe alarmov z radarového systému a princípov zachytených v tabuľke tunelových reflexov, kde je uvedené ako na dané alarmy reaguje osvetlenie tunela.

- AlmDOP – Tento blok pri príchode alarmu z radarového systému posielal do vizualizácie výzvu na zmenu dopravnoprevádzkového stavu podľa matice tunelových reflexov, ak už tento stav alebo stav s väčším obmedzením nie je aktívny. Následne môže operátor zmenu stavu potvrdiť alebo odmietnuť. Na túto akciu má stanovaný čas a ak do uplynutia času nezareaguje vykonávajú sa zmeny automaticky. Po akcii operátora alebo vypršaní času dáva tento blok ďalej príkaz do bloku riadenia dopravy, konkrétne DPS, na zmenu dopravnoprevádzkového stavu.

- D2000_Zone – Slúži na generovanie signálov do vizualizácie pre grafické znázornenie zón v tuneli kde sú detegované alarmy.

- D2000_Alm – Generuje signály do vizualizácie, kde sú spracúvané ako alarmy a zobrazujú sa v alarmovom okne.

Blok DOP slúži na riadenie dopravnoprevádzkového stavu, technológie dopravy, čo zahŕňa premenné dopravné značky PDZ a cestnú svetelnú signalizáciu CSS.

- DPS – Na základe manuálnej voľby DPS vo vizualizácii alebo automatických signálov z bloku RAD nastavuje aktuálny dopravnoprevádzkový stav v danej tunelovej rúre. Aktuálny DPS ďalej posielal do bloku PDZ a do vizualizácie kde je aj indikovaný.

- PDZ – Pri prijatí signálu z bloku DPS o zmene dopravnoprevádzkového stavu nastaví premenné dopravné značky a cestnú svetelnú signalizáciu do stavu, aký im definuje daný DPS:

Blok OSV riadi osvetlenie v danej tunelovej rúre len na základe alarmov z radarového systému. Pri vzniku alarmu sa osvetlenie rozsvieti podľa matice tunelových reflexov a pri zániku alarmového hlásenia sa po 10 sekundách vráti do základného stavu.

- Prej – Riadi prejazdové osvetlenie v danej tunelovej rúre.

- Vod – Riadi vodiace osvetlenie v danej tunelovej rúre.

- NPloch – Riadi osvetlenie nášľapných plôch pred vstupom do priečného prepojenia.

- Obrys – Riadi obrysové osvetlenie vstupu do priečného prepojenia.

Samotná vizualizácia dopravných incidentov bola spracovaná v súlade s technickými požiadavkami TP 07/2015 CENTRÁLNY RIADIACI SYSTÉM A VIZUALIZÁCIA-TUNELY, ktoré definujú spôsob zobrazovania, signalizácie a ovládania technologických a dopravných systémov pre riadenie tunelov v Slovenskej republike. Pre účely prezentácie integrovania radarového systému bola vytvorená jedna grafická schéma riadenia dopravy a technológie.

Vo vizualizácii bolo vytvorených 35 alarmov. Tridsaťštyri je priamo generovaných z radarového systému a tridsiaty piaty je alarm sledovania samotnej komunikácie medzi zariadením a CRS s čím je operátor ihneď oboznámený. Zoznam vytvorených alarmov v prostredí CNF D2000 je na obr. 5.

Príklad vizualizácie chodca v tunelovej rúre v zóne č. 4 je na obr. 6.

D2000@CNF (STANDARD/x64) - DP - User: user (Current number of tags = 173) - [Editable objects]

System Object Application settings Open objects Help

☐ Remove AM name Maska:

Object name	Object description
COMM	Chyba komunikácie s CRS
LTR_RAD_NZ1_Alm_ZV	Zastavené vozidlo LTR núdzový záživ 1
LTR_RAD_NZ2_Alm_ZV	Zastavené vozidlo LTR núdzový záživ 2
LTR_RAD_Z1_Alm_OS	Osoba v LTR zóna 1
LTR_RAD_Z1_Alm_PR	Prekážka na vozovke LTR zóna 1
LTR_RAD_Z1_Alm_PS	Vozidlo v protismere LTR zóna 1
LTR_RAD_Z1_Alm_PV	Pomalé vozidlo LTR zóna 1
LTR_RAD_Z1_Alm_ZV	Zastavené vozidlo LTR zóna 1
LTR_RAD_Z2_Alm_OS	Osoba v LTR zóna 2
LTR_RAD_Z2_Alm_PR	Prekážka na vozovke LTR zóna 2
LTR_RAD_Z2_Alm_PS	Vozidlo v protismere LTR zóna 2
LTR_RAD_Z2_Alm_PV	Pomalé vozidlo LTR zóna 2
LTR_RAD_Z2_Alm_ZV	Zastavené vozidlo LTR zóna 2
LTR_RAD_Z3_Alm_OS	Osoba v LTR zóna 3
LTR_RAD_Z3_Alm_PR	Prekážka na vozovke LTR zóna 3
LTR_RAD_Z3_Alm_PS	Vozidlo v protismere LTR zóna 3
LTR_RAD_Z3_Alm_PV	Pomalé vozidlo LTR zóna 3
LTR_RAD_Z3_Alm_ZV	Zastavené vozidlo LTR zóna 3
PTR_RAD_NZ1_Alm_ZV	Zastavené vozidlo PTR núdzový záživ 1
PTR_RAD_NZ2_Alm_ZV	Zastavené vozidlo PTR núdzový záživ 2
PTR_RAD_Z1_Alm_OS	Osoba v PTR zóna 1
PTR_RAD_Z1_Alm_PR	Prekážka na vozovke PTR zóna 1
PTR_RAD_Z1_Alm_PS	Vozidlo v protismere PTR zóna 1
PTR_RAD_Z1_Alm_PV	Pomalé vozidlo PTR zóna 1
PTR_RAD_Z1_Alm_ZV	Zastavené vozidlo PTR zóna 1
PTR_RAD_Z2_Alm_OS	Osoba v PTR zóna 2
PTR_RAD_Z2_Alm_PR	Prekážka na vozovke PTR zóna 2
PTR_RAD_Z2_Alm_PS	Vozidlo v protismere PTR zóna 2
PTR_RAD_Z2_Alm_PV	Pomalé vozidlo PTR zóna 2
PTR_RAD_Z2_Alm_ZV	Zastavené vozidlo PTR zóna 2
PTR_RAD_Z3_Alm_OS	Osoba v PTR zóna 3
PTR_RAD_Z3_Alm_PR	Prekážka na vozovke PTR zóna 3
PTR_RAD_Z3_Alm_PS	Vozidlo v protismere PTR zóna 3
PTR_RAD_Z3_Alm_PV	Pomalé vozidlo PTR zóna 3
PTR_RAD_Z3_Alm_ZV	Zastavené vozidlo PTR zóna 3

Obrázok 5. Zoznam alarmov.



Obrázok 6. Príklad vizualizácie pri detegovaní chodca v zóne 4 [1]

III. ZÁVER

Tradičné technológie detekcie incidentov v doprave, ako sú kamerové systémy s videoanalýzou obrazu, sa stávajú pri nepriaznivých poveternostných a svetelných podmienkach rýchlo neúčinné. Detekcia incidentov v doprave pomocou kamerového systému s video analýzou obrazu je silno závislá od aktuálnej opacity v danom priestore. To čo kamera nevidí, to nemôže detegovať a správne vyhodnotiť.

Systémy založené na radarových snímačoch dokážu pracovať a správne vyhodnocovať situáciu bez ohľadu na aktuálnu viditeľnosť. Pri výskyte požiaru a zadymení tunelovej rúry kamery na rozdiel od radarov nedokážu snímať čo sa v tunelovej rúre práve deje. Táto výhoda predurčuje použitie radarového systému AID aj pri zásahoch

záchranných zložiek hlavne pri požiaroch, kedy na základe dát z radarového systému vieme určiť či a kde sa nachádzajú vozidlá a osoby v tuneli napriek zlej viditeľnosti.

Pre vyššiu bezpečnosť pri takýchto stavoch by mohlo mať redundantné použitie oboch technológií veľký prínos hlavne z pohľadu bezpečnej a efektívnej navigácie záchranných zložiek v kritických situáciách.

Pod'akovanie:

Tento príspevok vznikol s podporou projektu APVV-17-0014, Smart tunel: telematická podpora pri mimoriadnych udalostiach v dopravnom tuneli.

LITERATÚRA:

- [1] NavtechRadar – Clearway [online]. [18.03.2019]. dostupné na internete <https://navtechradar.com/solutions/clearway/>
- [2] Automatic incident detection [online]. [18.03.2019]. dostupné na internete <https://navtechradar.com/features/automatic-incident-detection/>
- [3] Snopka J. Detekcia mimoriadnych dopravných stavov v diaľničnom tuneli radarovým systémom. Diplomová práca. Fakulta elektrotechniky a informačných technológií. Žilina 2019
- [4] Count and classify [online]. [18.03.2019]. dostupné na internete <<https://navtechradar.com/features/count-classify/>>
- [5] Traffic flow behaviour analysis [online]. [18.03.2019]. dostupné na internete <https://navtechradar.com/features/traffic-flow-behaviour-analysis/>
- [6] Data recording [online]. [18.03.2019]. dostupné na internete <<https://navtechradar.com/features/data-recording>>

Koncept letních kybernetických soustředění na KKY FAV ZČU

Miloš Železný

Katedra kybernetiky, Fakulta aplikovaných věd

Západočeská univerzita v Plzni

Plzeň, Česká republika

zelezny@kky.zcu.cz

Abstrakt—Tento příspěvek popisuje jeden z možných způsobů propagace kybernetiky a technického vzdělávání obecně u cílové skupiny potenciálních uchazečů o studium na vysoké škole. Počet studentů nastupujících do studijních programů v oblasti technického vzdělávání v posledním desetiletí významně poklesl. Tento jev se ještě významněji projevil u studijních programů zaměřených na kybernetiku a u univerzit mimo Prahu a Brno. Přitom poptávka po absolventech s kybernetickým zaměřením je u průmyslových podniků vysoká.

Článek představuje koncept letních kybernetických soustředění na katedře kybernetiky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni. Cílem je především propagace pojmu „kybernetika“ a motivace uchazečů k jejímu studiu. Prostředkem je uspořádání letního kybernetického soustředění, v rámci kterého si uchazeči osvojí základní kybernetické pojmy jako je zpětná vazba.

Klíčová slova—technické vzdělávání, střední školy, základní školy

I. ÚVOD

Rozvíjející se průmyslová výroba a nástup Průmyslu 4.0 vyžaduje dostatek kvalifikovaných odborníků. Přitom demografický vývoj v posledním desetiletí působí spíše proti této potřebě. Ve věkové skupině uchazečů o vysoké školy došlo k přibližně třetinovému poklesu. Zároveň klesá zájem o technické obory. Tyto faktory způsobily, že kvalifikovaných odborníků je nedostatek, firmy zaměstnávají studenty před absolčováním, což způsobuje další propad v počtech absolventů.

Absolventy studijních programů v oblasti kybernetiky jistě můžeme považovat za dostatečně kvalifikované odborníky. V jejich profilu absolventa je pro případné zaměstnavatele velmi zajímavý mix znalostí a dovedností, který obsahuje dostatečný základ v oblasti informatiky, ale především matematiky a jejího využití v kybernetice (robotice, automatizaci apod.) Přitom zájemců o tyto obory je typicky méně, než například o obory v oblasti informatiky.

Vycházejí z předpokladu, že současná mládež má dostatek příležitostí se seznámit s výpočetní technikou (typicky v rámci vyučovaných předmětů typu IKT - Informatika a komunikační technika) a také z volnočasových činností a používání informačních technologií při hře, ale pojem kybernetika je pro ni neznámý, stanoveným cílem je zvýšení povědomí o kybernetice u cílové skupiny a motivace k zájmu o její studium. Přitom vše musí být podáno zábavnou formou, aby uvedená činnost byla pro cílovou skupinu dostatečně atraktivní.

II. KONCEPT „KYBERNETIKA HROU“

Z naposledy zmíněného aspektu vychází koncept, který lze nazvat „kybernetika hrou“. Základem konceptu je hra, při níž zvítězí ten, kdo dokáže lépe aplikovat kybernetické principy, například jednoduché zpětné vazby. Pro hru je třeba vytvořit rámec, který bude motivovat k soutěživosti s ostatními účastníky.

Tento rámec samozřejmě závisí na časové dotaci akce. V tomto příspěvku vycházíme z návrhu týdenního letního kybernetického soustředění, provozovaného formou příměstského tábora. Časová dotace je tedy 5x cca 5-8 hodin v po sobě jdoucích dnech. To umožňuje rámec ve formě „celotáborové hry“. Hru je tedy třeba rozdělit na co nejvíce etap (minimálně dvě denně), ideálně se závěrečným finálovým závodem. Pro ostatní formy (např. celoroční kroužek s dotací 2h týdně apod. je třeba parametry hry náležitě upravit).

Jako vhodný prostředek se ukázaly různé robotické stavebnice, založené na platformě Arduino. Je samozřejmě řada dalších platforem, pro pokročilé je možné pracovat s Raspberry Pi, ale i místo Arduina lze použít některý z mikrokontrolérů obdobné úrovně. Robotické stavebnice jsou založeny na kolovém nebo pásovém podvozku. Kromě mikrokontrolérů a motorů s řadiči je třeba vybavit model různými senzory. Jako základ používáme ultrazvukový senzor vzdálenosti a optický senzor detekce čáry. Již s takto jednoduchými senzory lze realizovat soutěže, založené na využití zpětné vazby.

III. TEORETICKÁ PŘÍPRAVA

Do teoretické přípravy spadá objasnění základů práce s Arduinem (funkce, rozložení pinů, ovládání), základy programování a základy zpětné vazby. Z psychologického hlediska, s vědomím si hlavního cíle atraktivnosti a motivace je nutné teoretickou přípravu minimalizovat na nejnútnejší, vybrat co nejjednodušší programovací prostředí a navíc ji vhodně prostrádat s praktickými činnostmi. Ze zkušeností vyplývá, že první den je nutné, aby si účastníci „sáhli“ na robota, a aby s ním popojeli, i když to je zatím bez automatizace.

Jako programovací prostředí se nám osvědčila platforma Scratch. Grafické programování je pro mladší účastníky snazší na pochopení, přitom umožňuje vysvětlit základy algoritmizace (např. větvení, smyčka), které jsou důležitější, než konkrétní implementace v nějakém programovacím jazyce.

Kromě toho Scratch umožňuje na začátku použít počítačovou hru (resp. její vytvoření) jako motivaci k přijetí

vysvětlovaných principů programování. Typicky tedy zahajujeme Scratchem a první hra je vytvoření jednoduché počítačové hry na tomto základě. Teoretické poznatky jsou pak dávkovány v průběhu soustředění dle aktuální potřeby a posloupnost her je navržena tak, aby na sebe úlohy (soutěže) navazovaly a každá další vyžadovala o trochu více teorie.

IV. HARDWARE

A. Podvozek

V průběhu dosud pořádaných ročníků našeho kybernetického letního soustředění jsme vyzkoušeli několik různých platforem robotických stavebnic, které jsou nabízeny na světovém trhu.

Jako úplně první jsme vyzkoušeli platformu pásového podvozku Tank-02, nabízeného například na snailshop.cz. Tank již obsahuje motory a převodovky (od firmy Tamiya), je doplněn o přídatnou desku, vybaven Arduinem, řadiči motorů a senzory, případně další nadstandardní výbavou. Tank je nutné na začátku nejdříve smontovat (včetně převodovek) a jednotlivé součásti správně pospojovat. Z tohoto hlediska je platforma velmi vhodná, neboť umožňuje uvědomit si i fyzické propojení. Při větších počtech účastníků však začíná selhávat celý oživovací proces na nedostatku lektorů řešících problémy při zapojení.

Další vhodnou platformou je či spíše byl Tadpole (pulec) amerického autora, který si říká Chris the Carpenter. Jedná se o malou kolovou platformu, obsluhovanou nano verzí nějakého mikrokontroléru. Tadpole byl náročný na sestavení a navíc se přestal prodávat, jinak umožňoval zajímavé aplikace, například spouštěcí tužka uprostřed mezi koly ve středu otáčení, umožňující „psát“ po papíře.

Druhý ročník našeho kybernetického soustředění byl postaven na „zápasnických“ miniplatformách Zumo. Zápas jsme s nimi nepořádali, ale mají poměrně dobrý senzor na čáru. Je však docela malý a proto jsme u této platformy nezástali.

Zkoušeli jsme naopak i větší platformu Thumper, konkrétně v šestikolové verzi, avšak v podstatě celé soustředění zabralo oživení. S lepší přípravou před akcí by to byla zajímavá volba pro zkušenější účastníky.

Jako nejzajímavější platformu pro naše účely jsme nakonec vyhodnotili kolovou platformu mBot firmy Makeblock čínského autora Jasena Wanga. Robot se prodává v podstatě sestavený, má vlastní mikrokontrolérovou desku založenou na Arduinu, ale obsahující připojení motorů i senzorů. Navíc programovací prostředí je založené na Scratchi. Při větších počtech účastníků je to zatím nejlepší varianta. Pro vracející se účastníky jsme začali používat pásovou bratrskou platformu mBot Ranger.

B. Mikrokontrolér

Pro naše kybernetické letní soustředění jsme zvolili platformu Arduino. Robotické stavebnice, které neměly vlastní implementaci mikrokontroléru, jsme vybavovali Arduinem Uno rev. 3, s výjimkou Tadpolu, který umožňoval použít pouze Arduino Nano. mBoty a Rangery, u kterých jsme skončili, jsou vybaveny vlastní implementací mikrokontroléru.

V. PRŮBĚH SOUSTŘEDĚNÍ

Jak již bylo výše uvedeno, po zahájení je jako první představen programovací jazyk Scratch, první hrou je vytvoření jednoduché počítačové hry. Následuje seznámení s mBotem, vybalení, první soutěž s mBotem je založena na dálkovém ovládní. Ovladač je součástí a základní program je v mBotu nahraný.

Pokračování soutěží jde v duchu hravosti, čili kvantita soutěží je upřednostňována nad rychlým postupem v osvojování znalostí. Nejprve úlohy slouží na osvojení si programování mBota - jízda na přesnou vzdálenost, zatočení o přesný úhel (např. 4x 90 stupňů apod.) Dále následují úlohy už založené na využití zpětné vazby - práce s ultrazvukovým senzorem vzdálenosti, bumpéry (mikrospínače) a optickými senzory čáry.

Závěrečné soutěže jsou pořádány poslední den odpoledne, přizvání jsou rodiče, rodinní příslušníci i kamarádi, kteří vytvoří obecnostvo a na závěr je „celotáborová hra“ vyhodnocena.

VI. ZÁVĚR

Cílem tohoto příspěvku nebylo popsat významný výsledek výzkumu ani publikovat výsledky zevrubné analýzy. Cílem bylo informovat o pokusu oslovit žáky základních a středních škol, hravou formou je seznámit s tím, jaký je význam slova kybernetika a motivovat je ke studiu studijního programu v oblasti kybernetiky. Protože Arduino vzniklo v Itálii a je pojmenované po italském Králi Arduinovi, který žil na přelomu 10. a 11. století (zprostředkovaně přes název baru ve městě Ivrea), při názvu letního soustředění jsme zachovali italštinu a nazvali ho Campo Arduino (campo je česky tábor).

Soustředění se poprvé konalo v roce 2013 s návštěvností 16 účastníků, některé ročníky byly podpořeny grantem Magistrátu města Plzně v rámci programu Plzeň - univerzitní město. Ročníky 2018-2020 jsou pořádány jako kemp robotiky ve spolupráci s Plzeňským krajem v rámci projektu Podpora odborného vzdělávání v Plzeňském kraji. Po tyto roky je zvýšena hodinová dotace z 5 na 8 hodin denně. Soustředění se koná v dalších dvou městech a v roce 2019 byl pro velký zájem přidán další běh, celkově se v roce 2019 zúčastní cca 110 účastníků.

Od roku 2018 jsme navíc zavedli vyšší úroveň soustředění, kde již řešíme složitější úlohy založené na platformě Raspberry Pi. Tato vyšší úroveň je zatím navštěvována cca 10 účastníky ročně a dostala název Campo Lampone (zachována italština, lampone je italsky malina).

Věříme, že představené letní kybernetické soustředění pomůže oslovit mladé lidi a motivovat je ke studiu kybernetiky nebo alespoň technických oborů obecně. Zájem o účast je vysoký a meziročně roste, což ukazuje, že se asi podařilo zaplnit díru na trhu. Na druhou stranu výsledky se projeví až za delší dobu, protože největší návštěvnost je někde kolem 7.-8. třídy, což znamená, že první statisticky významnější výsledky budou u maturitního ročníku 2021.

Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií
Ústav mechatroniky a technické informatiky

SEKEL 2019

Mezinárodní setkání učitelů elektrotechniky

9.-11. září 2019, Harrachov

Problémy nastavení Preisachova modelu k modelování vlastností transformátorových plechů

Problems of setting Preisach model for modeling of transformer sheet properties

1st Jakub Eichler*Institute of Mechatronics and Computer Engineering (MTI)**Technical University of Liberec*

Liberec, Czech Republic

jakub.eichler@tul.cz

Abstrakt—Tento dokument popisuje problémy, které komplikují použití Preisachova modelu pro modelování magnetických vlastností materiálů založených na železe.

Klíčová slova—Preisachův model, magneticky měkké oceli

Abstract—This document describes problems that complicate the use of the Preisach model for modeling the magnetic properties of iron-based materials.

Keywords—Preisach model, soft magnetic iron-based materials

I. ÚVOD

Preisachův model, je model který podle studie polského matematika Krasnoselskiho, je schopen modelovat obecné hysterezní vlastnosti. V literatuře se ovšem nevyskytuje žádné regulérní použití pro modelování vlastností magneticky měkkých ocelí. U magneticky měkkých ocelí existuje celá řada problémů, se kterými je spojen problém identifikace parametru modelu. Jediné řešení, které se v literatuře nachází, je metoda odhadu parametru modelu pomocí numerické optimalizační úlohy.

II. PRINCIP MODELU

První přístup E. Preisacha byl zcela intuitivní a založen na znalostech vlastností magnetických materiálů. Preisach svůj model založil na elementárních částicích, označujeme je jako hysterony. Tyto částice mají obdélníkovou hysterezní smyčku a dvě překlápěcí úrovně, o nichž platí, že překlápěcí úroveň do kladné saturace, je větší nebo rovna překlápěcí úrovni do záporné saturace [2]. Všechny částice modelu, rozložíme-li je do plochy, kde souřadnicemi jsou právě překlápěcí úrovně a omezíme-li tyto hodnoty nějakým maximem a minimem, dostaneme plochu trojúhelníku. Každá z částic v daném Preisachově trojúhelníku se na výsledné výstupní veličině podílí jinak, tzn. má nějakou váhu. Matematicky je tento model popsán

$$y(t) = \iint_{PT} \mu(\alpha, \beta) \gamma(\alpha, \beta) M(\alpha, \beta, u) d\alpha, d\beta, \quad (1)$$

kde $\gamma(\alpha, \beta)$ jsou jednotlivé hysterony, operátor $M(\alpha, \beta, u)$ je operátor, která na základě vstupu u a jeho předešlých

extrémů, určuje „překlopení“ hysteronů do dané saturace. Funkce $\mu(\alpha, \beta)$ určuje jakou měrou se jednotlivé hysterony podílejí na celkové hysterezní smyčce daného materiálu.

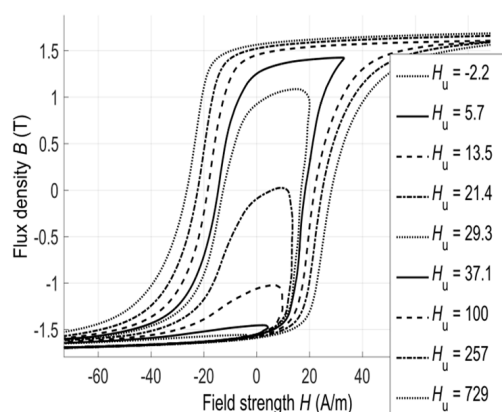
Z popisu (1) je patrné, že jediným parametrem, který určuje výsledný tvar hysterezní smyčky, je funkce $\mu(\alpha, \beta)$. Tato váhová funkce je určována různými metodami, ovšem jediné systematické řešení je použití některých metod využívajících reverzních křivek.

III. VÁHOVÁ FUNKCE

Váhová funkce je jediným parametrem, který ovlivňuje tvar hysterezní smyčky. V literatuře je odvozeno [3], že váhová funkce je druhou derivací magnetizace odpovídající Ewerettovi funkce v Preisachově trojúhelníku. Váhová funkce je dána

$$\mu(\alpha, \beta) = \frac{d^2 M(\alpha, \beta)}{2d\alpha, d\beta}. \quad (2)$$

IV. MĚŘENÍ FORC

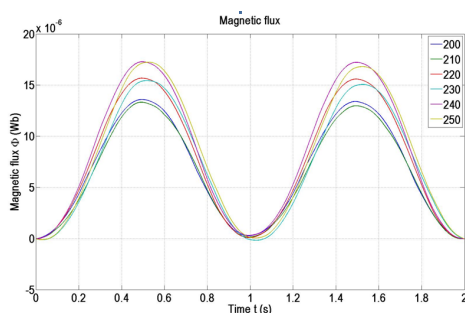


Obr. 1. Detail strmé části smyček FORC

Pro určení magnetizace v ploše Preisachova trojúhelníku se nejčastěji používá metoda FORC, která je založena na minoritních hysterezních smyčkách, které vždy vycházejí ze saturovaného stavu. Ze saturovaného stavu je smyčka

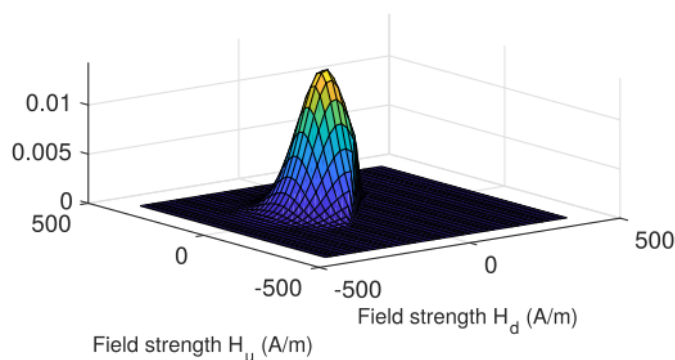
tvořena monotónním růstem (výchozí saturace je záporná), při dosažení určité maximální hodnoty dojde k monotónnímu poklesu. Klesající (reverzní) část smyčky je použita k vytvoření plochy magnetizace v Preisachově trojúhelníku. Z důvodu přehlednosti je na obrázku 1 zobrazena část sady měření FORC, kde H_u je maximum dosažené intenzity na dané smyčce.

Pro každou další smyčku je použito vyšší maximum intenzity. Vlivem nedostatečné saturace zde nastává problém, že maxima odezvy (magnetické indukce) nerostou monotónně, ale maxima odezvy jsou „napřeskáčku“, viz obrázek 2, kde čísla v popisu, jsou čísla měření, přičemž postupně mezi jednotlivými čísly jsou nárůsty cca 0,8 A/m.



Obr. 2. Nerovnoměrný růst indukce

Tento efekt a vztah (2), jež obsahuje dvě derivace komplikují určení váhové funkce, pomocí metod založených na vratných křivkách. Obecně by měla váhová funkce být hladká s jedním maximem, příkladem jejího tvaru může být obrázek 3.

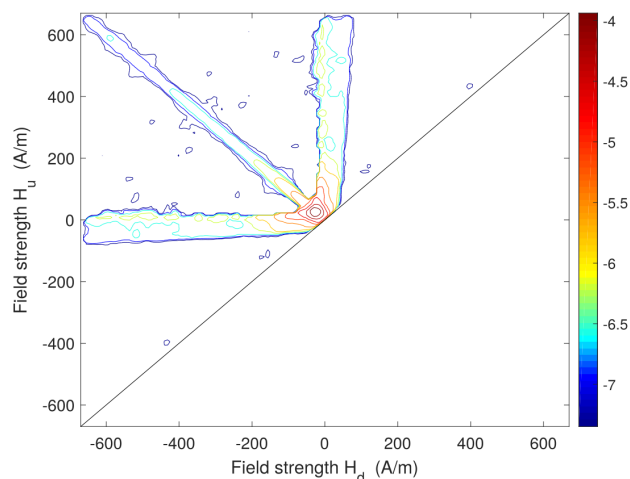


Obr. 3. Váhová funkce - předpoklad

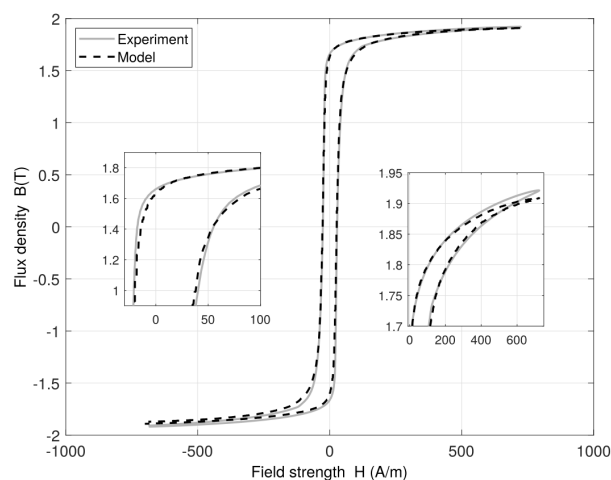
Vlivem přeskoků smyček, magnetické viskozity a barkhausenova šumu, je přímá derivace nepoužitelná. Z tohoto důvodu je váhová funkce počítána přes savitzky-golay filtr. Výsledek použití tohoto filtru je na obrázku 2. Z konturového grafu je vidět, že i přes filtrovanou derivaci, není váhová funkce hladká a obsahuje dvě postranní ramena.

ZÁVĚR

Přesto, že magnetické materiály na bázi železa jsou zatíženy mnoha fyzikálními vlastnostmi, které komplikují nalezení váhové funkce Preisachova modelu, se podařilo získat váhovou funkci, jež vede k dobré shodě modelu s



Obr. 4. Reálná váhová funkce transformátorového plechu



Obr. 5. porovnání modelu a experimentu

experimentálními daty. Jelikož je tento postup komplikovaný a zdoluhavý, je jednodušší použití metod odhadu popsaného v [1].

LITERATURA

- [1] FÜZI, J.: *Analytical Approximation of Preisach Distribution Functions*. dostupné online z <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1198473>.
- [2] BERTOTTI, G. MAYERGOYZ.: *The Science of Hysteresis*. Boston: Academic, 2006. ISBN 0-12-480874-3.
- [3] Eichler, J. and Novák, M. and Košek, M. *Implementation of the first order reversal curve method for identification of weight function in Preisach model for ferromagnetics*, ELEKTRO 2016 - 11th International Conference, Proceedings, 2016, p.602-607, doi=10.1109/ELEKTRO.2016.7512149,

Automatizovaný merací stend pre elektrické servopohony

Automated measurement test-bench for electrical servodrives

1st Jozef Ivan
Dept. of Electrotechnics and
Mechatronics
Technical University of Košice
Košice, Slovakia
jozef.ivan.3@student.tuke.sk

2nd Viktor Šlapák
Dept. of Electrotechnics and
Mechatronics
Technical University of Košice
Košice, Slovakia
viktor.slapak@tuke.sk

3rd František Ďurovský
Dept. of Electrotechnics and
Mechatronics
Technical University of Košice
Košice, Slovakia
frantisek.durovsky@tuke.sk

Abstrakt— Článok opisuje automatizovaný merací stend vyvinutý na meranie presných prevodičiek a aktuátorov. V článku je uvedená koncepcia stendu, riadenie meraní prostredníctvom grafickej aplikácie a opis meracích metód. Výsledky meraní sú dokumentované nameranými priebehmi.

Kľúčová slova—servopohon, presná prevodovka, presnosť polohovania

Abstract—The paper describes automated measurement test-bench, developed for measurement of precise transmissions and actuators. A concept of the test-bench, a measurement control using graphical user interface and measurement methods are presented. The results are documented by measured waveforms.

Keywords—servodrive, precise gear, position accuracy

I. ÚVOD

Súčasťou mnohých priemyselných výrobných zariadení, robotických aplikácií či medicínskej techniky sú servopohony, ktoré využívajú synchrónne motory s permanentnými magnetmi (PMSM) spojené s prevodovkou. V aplikáciách, kde sa vyžaduje vysoká presnosť polohovania, sa používajú harmonické alebo cykloidné prevodovky. Ak je potrebný väčší prevod alebo moment, ako sa dá dosiahnuť s uvedenou prevodovkou, používa sa predstupeň s planétovou prevodovkou [1].

Harmonické a cykloidné prevodovky patria medzi tzv. bezvôľové prevodovky, ktorých presnosť je lepšia ako 60 arcsec. Okrem toho majú vysoký prevodový pomer a pri zachovaní malých rozmerov dokážu prenášať vysoké záťažové momenty.

Výhodou harmonických prevodoviek je ich konštrukčná jednoduchosť s malým počtom komponentov, jednoduchá realizácia vysokých prevodových pomerov a možnosť použitia dutých hriadeľov (tzv. hollow-shaft) s veľkými vnútornými priermi. Oproti tomu cykloidné prevodovky sa vyznačujú veľkou torznou tuhosťou a možnosťou zaťaženia veľkými klopnými momentmi.

Aj keď sa jedná o presné prevodovky, pružnosť materiálu a nepresnosti vo výrobe spôsobujú skrútenie výstupnej

prírubby prevodovky voči jej vstupu vplyvom záťažového momentu. Ďalšou nepresnosťou je tzv. chyba uhlového prenosu. Na určenie výslednej presnosti systému s uvedenou prevodovkou je nutné vykonať niekoľko meraní: meranie torznej tuhosti, meranie chyby uhlového prenosu a meranie opakovateľnej presnosti [2].

Spomenuté merania sa vykonávajú na meracích stoliciach s použitím veľmi presných snímačov polohy a momentu. Zaťažovanie môže byť zabezpečené mechanickou záťažou v podobe ramena so závažím, kde sa využíva gravitácia, alebo druhým pohonom pôsobiacim proti zaťažovanému.

Na meranie aktuátorov s presnými prevodovkami, či už pre potreby vývoja servomeničov, ich riadiacich štruktúr, ako aj dlhodobých skúšok vyvinutých prototypov, bol navrhnutý automatizovaný merací stend. V článku je opísaná konštrukcia stendu a jeho riadenia, vrátane popisu jednotlivých meraní s ukázkami nameraných výsledkov. V závere sú uvedené možnosti ďalšieho rozšírenia a využitia stendu.

II. KONŠTRUKCIA A RIADENIE MERACIEHO STENDU

Merací stend umožňuje meranie rôznych typov a veľkostí presných prevodoviek alebo aktuátorov s presnými prevodovkami s výstupným momentom do 2000 Nm. Hoci sa primárne sa stend používa v konfigurácii pre meranie a zaťažovanie pomocou zaťažovacieho pohonu, jeho modulárna konštrukcia umožňuje aj merania so závažím na ramene v zvislej alebo vodorovnej polohe. Náčrt konštrukcie stendu je na Obr. 1, kde na ľavej strane je zaťažovací pohon a na pravej strane testovaný pohon. Na fotografii na Obr. 2 je vidno hlavné časti meracieho stendu vrátane snímačov.

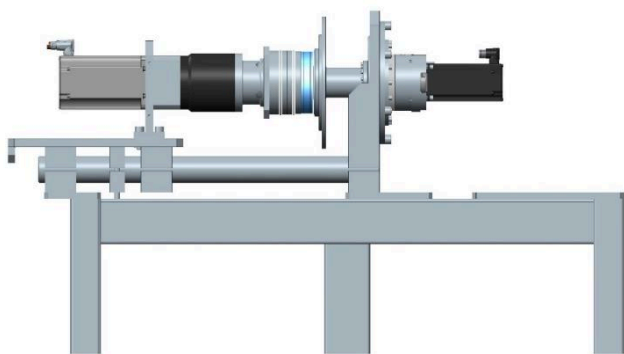
Stend je osadený snímačom momentu s pružnou spojkou, presným optickým snímačom výstupnej polohy a snímačmi teploty typu Pt1000.

Riadenie pohonov využíva servomeniče ACOPOS firmy B&R, pričom rozvádzač je osadený až piatimi servomeničmi rôznych výkonov. Servomeniče navyše umožňujú manuálnu voľbu napájacieho napätia (3 x 400 V alebo 1 x 230 V) pomocou ovládacích prvkov na rozvádzači. Vďaka tomu je možné riadiť a merať aktuátory s rôznymi výkonmi a pracovnými napätiami, príp. súčasne riadiť merania na

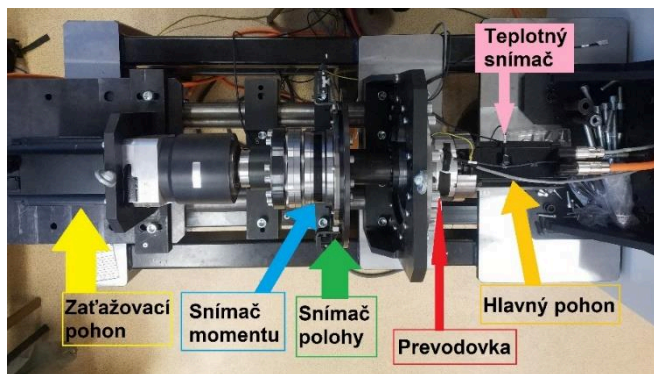
dvoch meracích stendoch. Parametre meracieho stendu, riadiaceho rozvádzača a parametre snímačov sú uvedené v Tab. 1.

Riadenie servomeničov zabezpečuje PLC, v ktorom je naprogramovaná hlavná riadiaca štruktúra pre všetky merania. PLC umožňuje riadiť všetkých 5 osí (pohonov) tak, že pri každom meraní je možnosť voľby, ktorá os bude v danom meraní zaťažovacia a ktorá testovaná, resp. ktorá os bude pracovať ako brzda.

Nastavenie meraní a ich spustenie je možné cez dotykovú obrazovku PLC ako aj z nadradeného systému, ktorým je meracia ústredňa NI PXI. Komunikácia s PLC prebieha cez ethernet s použitím protokolu TCP/IP. Meracia ústredňa



Obr. 1 Merací stend - bočný pohľad



Obr. 2 Merací stend - pohľad zhora

TABLE I. PARAMETRE MERACIEHO STENDU

Zaťažovací motor	
Menovitý výkon	3,6 kW
Menovitý moment	11,6 Nm
Menovité otáčky	3000 rpm
Zaťažovacia prevodovka	
Prevodový pomer	50
Menovitý výstupný moment	445 Nm
Snímač momentu	
Menovitý moment	2000 Nm
Trieda presnosti	0,1 %
Snímač polohy	
Počet impulzov na otáčku	40000
Interpolácia	200
Rozlíšenie	8000000 ppr
Presnosť	1 arcsec

zároveň spracúva a zaznamenáva údaje zo všetkých snímačov, k čomu využíva multifunkčnú vstupno-výstupnú kartu s digitálnymi aj analógovými vstupmi a výstupmi.

Na jednoduchú obsluhu meraní bola pre PXI vytvorená obslužná aplikácia s grafickým rozhraním, ktorá zabezpečuje komunikáciu, monitorovanie, zber dát, vyhodnotenie meraní a generovanie výstupných protokolov vo formáte pdf. Merané dáta sú taktiež ukladané vo formáte TDMS pre ich prípadnú neskoršiu analýzu.

III. ZAŤAŽOVANIE PODĽA REŽIMOV S1 A S3

Zaťažovanie testovaného pohonu slúži na meranie oteplenia pohonu a testy životnosti. Meranie vykonáva dlhodobý záznam teplôt, momentov a rýchlosti, a zároveň monitoruje prekročenie užívateľom nastavených teplotných limitov. V prípade ich prekročenia je meranie automaticky zastavené.

Meranie teploty sa dá robiť naraz až v šiestich bodoch meracieho stendu. Typicky sú merané teploty zaťažovacieho motora, testovanej prevodovky, v rôznych bodoch na povrchu testovaného motora, teplota príruby a teplota okolia. Získané údaje umožňujú neskoršie modelovanie oteplenia či overenie parametrov pohonu.

Pri meraní zaťažovania podľa režimu S1 a S3 je potrebné vybrať osi pre zaťažovanie a zadať pracovný cyklus, t.j. výstupnú rýchlosť, dobu zaťažovania, čas chodu a čas pokoja, zrýchlenie a záťažový moment. Obrazovka pre riadenie merania je na Obr. 3.

Zaťažovanie je možné realizovať aj s jednou osou, ktorá zabezpečuje zaťažovanie meraného pohonu, pričom meraný pohon môže byť napájaný nezávislým servomeničom. Takto je možné testovať aj prototypy pohonov, meničov alebo rôznych riadiacich štruktúr.

IV. MERANIE CHYBY UHLOVÉHO PRENOSU

Chyba uhlového prenosu (ATE – z angl. Angular Transmission Error) je rozdiel medzi polohou výstupnej a vstupnej príruby, prepočítanej na výstup cez prevodový pomer podľa (1):

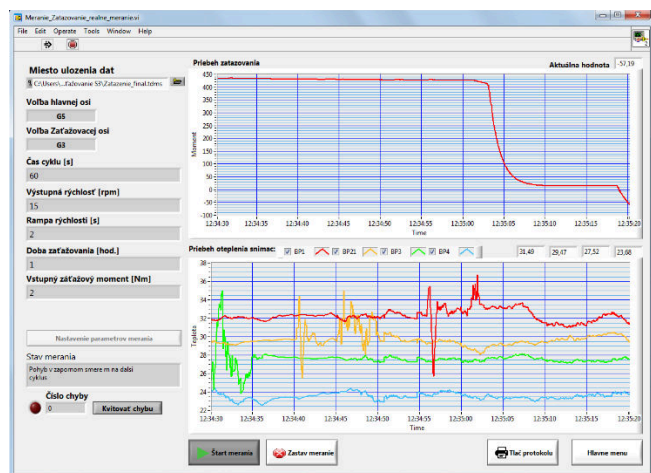
$$\varphi_{ATE} = \varphi_{out} - \frac{\varphi_{in}}{i}, \quad (1)$$

kde φ_{out} je poloha výstupnej príruby, φ_{in} je vstupná poloha a i je prevodový pomer meranej prevodovky.

Chybu uhlového prenosu spôsobujú nepresnosti pri výrobe jednotlivých komponentov v prevodovke a dokumentuje očakávané zvlnenie rýchlosti pri riadení a presnosť polohovania.

Chyba uhlového prenosu prevodovky sa meria pri pomalejšej rýchlosti pri záťaži rovnej 3 % menovitého momentu. Meranie by malo prebiehať aspoň tak dlho, aby sa všetky rotačné komponenty otočili aspoň o jednu otáčku.

Meranie ATE vyžaduje okrem snímania výstupnej polohy a momentu aj snímanie vstupnej polohy. Vzhľadom na to, že merací stend (resp. merané aktuátory) neumožňuje použiť osobitný snímač na vstupe, bolo nutné pomocou elektronického rozhrania rozdeliť signál zo snímača polohy na strane motora tak pre potreby riadenia pohonu pomocou servomeniča, ako aj snímania polohy v meracej ústredni.



Obr. 3 Ovládacia obrazovka režimu zaťažovania

Meranie ATE je možné uskutočniť aj so záťažou na výstupe, čím je možné odmerať aj správanie sa systému v danom pracovnom bode. Medzi parametre merania, zadávané užívateľom tak patrí okrem výberu osí, výstupnej rýchlosti a zrýchlenia a počtu výstupných otáčok aj zaťažovací moment. Ovládacia obrazovka k meraniu ATE (Obr. 4) po spustení merania zobrazuje polohu zo vstupného a výstupného snímača, aktuálnu chybu uhlového prenosu a aktuálny zaťažovací moment. Výsledkom merania je závislosť chyby uhlového prenosu od polohy výstupu (Obr. 5).

Z nameraného priebehu vyplýva, že ATE má periodický priebeh a súvisí s presnosťou výroby jednotlivých komponentov prevodovky. Pri riadení pohonu sa potom ATE prejavuje ako chyba polohovania pri polohovej regulácii a zvlnenie rýchlosti pri rýchlostnej regulácii.

V. MERANIE TORZNEJ TUHOSTI

Meranie torznej tuhosti prebieha pri zabrzdennom vstupe prevodovky, resp. pri zabrzdennom testovanom pohone zo strany vstupu. Výstup je následne postupne zaťažovaný až na hodnotu menovitého momentu. Nasleduje znižovanie momentu na nulu a plynulý prechod na zaťažovanie v opačnom smere. Po dosiahnutí plnej záťaže v zápornom smere sa opäť plynule mení záťaž cez nulovú až na menovitú hodnotu v kladnom smere. Meranie sa uskutočňuje pre viacero polôh podľa zadaných parametrov.

Ovládacia obrazovka (Obr. 6) umožňuje zadať zaťažovací moment, rýchlosť, akou bude moment rásť a počet meraných polôh. Počas merania je zobrazovaná a zaznamenávaná poloha výstupu, výstupný moment a teplota pre prípad preťažovania pohonov alebo pri oteplení pri viacnásobnom meraní.

Výsledkom merania torznej tuhosti je závislosť výstupnej polohy od zaťažovacieho momentu, tzv. hysteréza krivka (Obr. 7). Z jej priebehu je možné vyčítať nepresnosť polohovania pri danom zaťažovacom momente a mŕtvý chod prevodovky (LM – z angl. lost motion), ktorý je definovaná ako rozdiel polôh pri 3% menovitého zaťažovacieho momentu v oboch smeroch. Pri určení LM sa uvažuje priemerná hodnota skrútenia výstupu.

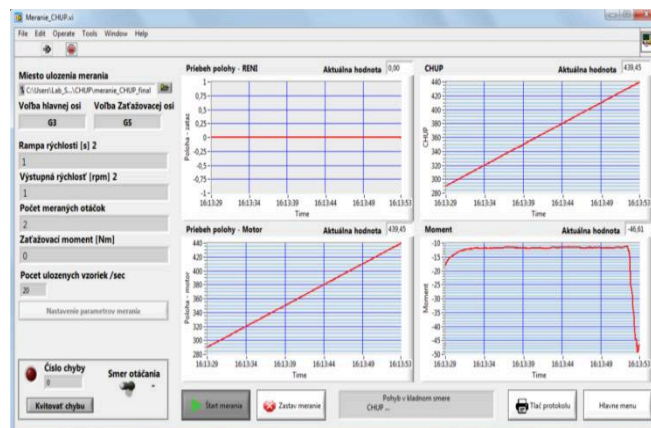
VI. MERANIE OPAKOVATEĽNEJ PRESNOSTI

Meranie opakovateľnej presnosti je vykonávané podľa normy [3], kde je predpísané meranie pre rotačné osi a ich štatistické vyhodnotenie. Norma vyžaduje meranie pri polohovaní v 5 rôznych polohách v rámci jednej otáčky, pričom každá poloha musí byť dosiahnutá aspoň 5 krát z oboch strán.

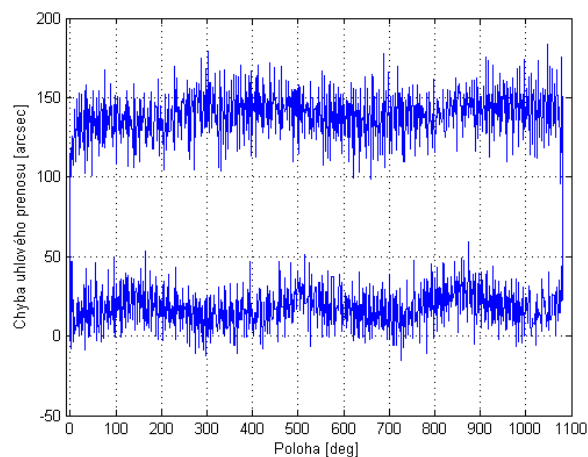
Počas merania sa opäť snímá výstupná poloha, zaťažovací moment a monitoruje sa teplota. Pri vyhodnotení sa sleduje rozdiel medzi žiadanou polohou výstupu a skutočnou polohou. Štatistickým vyhodnotením sa následne získajú hodnoty jednosmerných a dvojsmerných systematických odchýlok, priemerná dvojsmerná polohová odchýlka a necitlivosť v osi.

Užívateľská aplikácia umožňuje používateľovi zadať počet polôh, počet meraných otáčok a cyklov. Pri použití väčšieho počtu meraných polôh tak umožňuje zvýšiť presnosť merania.

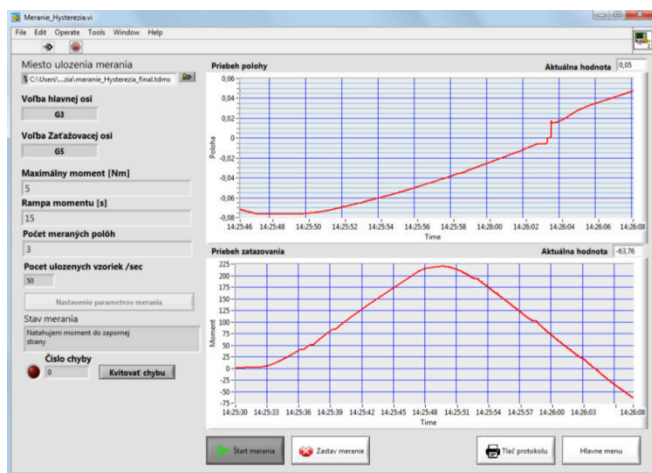
Výsledná presnosť polohovania a teda aj merania však nezávisí len od vlastností meraného pohonu, ale je ovplyvnená riadiacou štruktúrou, nastavením regulácie či použitým vstupným snímačom. Zvýšenie presnosti polohovania je možné dosiahnuť použitím výstupného snímača alebo kompenzáciou chyby uhlového prenosu a torzného skrútenia v riadení pohonu [4].



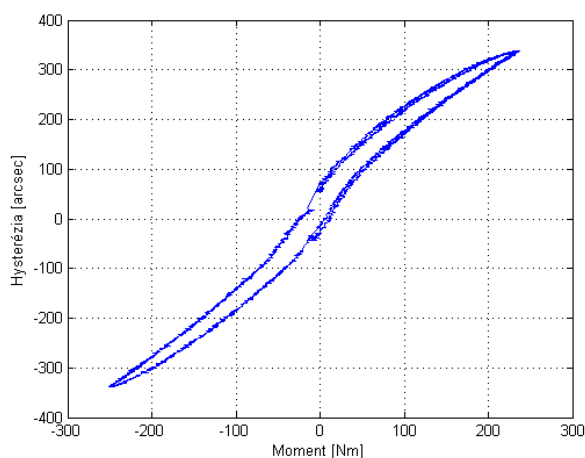
Obr. 4 Ovládacia obrazovka pre meranie chyby uhlového prenosu



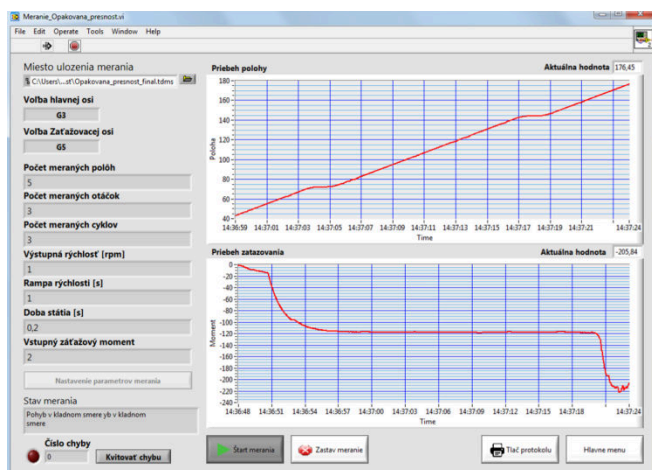
Obr. 5 Meranie chyby uhlového prenosu



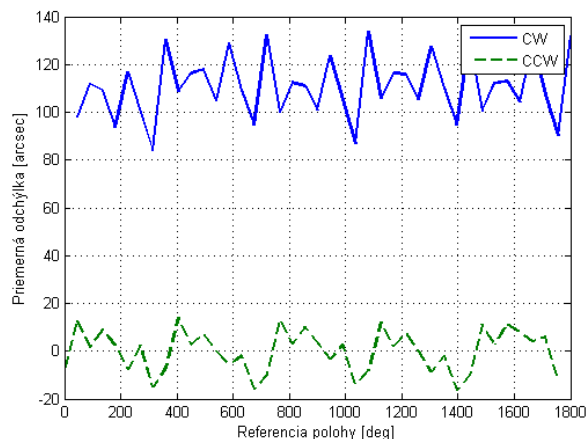
Obr. 6 Ovládacia obrazovka merania torzného skrútenia



Obr. 7 Meranie torzného skrútenia - hysterézie



Obr. 8 Ovládacia obrazovka pre meranie opakovateľnej presnosti



Obr. 9 Meranie opakovateľnej presnosti - priemerné polohové odchýlky pre oba smery

VII. ZÁVER

Opísaný merací stend je schopný vykonávať kvalitatívne merania servopohonov s presnou prevodovkou zamerané na najčastejšie vyžadované parametre. Zároveň umožňuje dlhodobé zaťažovanie pohonov s monitorovaním parametrov. Dlhodobým zaťažovaním servopohonov je tak možné overiť stabilitu parametrov pohonu či pracovnú teplotu. Do budúcnosti je naplánovaná realizácia dynamickej emulácie záťaží, ktorá by dokázala priblížiť reálne zaťaženie meraného servopohonu v konkrétnych aplikáciách.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe Zmluvy č. APVV-15-0750.

LITERATÚRA

- [1] Pham, AD., Ahn, HJ., "High precision reducers for industrial robots driving 4th Industrial Revolution: State of arts, analysis, design, performance evaluation and perspective," Int. J. of Precis. Eng. and Manuf. Green Tech. (2018) 5: 519. <https://doi.org/10.1007/s40684-018-0058-x>
- [2] M. Hric, F. Durovsky, V. Fedak, "Vplyv nelinearit cykloidnej prevodovky na presnosť polohovania" in ATP Journal, vol.9/2012, pp. 42-44, 2012.
- [3] Norma ČSN ISO 230-2.
- [4] Iwasaki, M.; Yamamoto, M.; Hirai, H.; Okitsu, Y.; Sasaki, K.; Yajima, T., "Modeling and compensation for angular transmission error of harmonic drive gears in high precision positioning," Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on , vol., no., pp.662,667, 14- 17 July 2009.

Vyšetrovanie vlastnosti päť-fázového indukčného motora pri trojfázovom napájaní

Exploring properties of five-phase induction motor in free-phase supply

Ján Kaňuch

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky

Technická Univerzita v Košiciach

Košice, Slovensko

jan.kanuch@tuke.sk

Abstrakt — Príspevok sa zaoberá prevádzkovými stavmi päťfázového indukčného stroja v prípade trojfázového napájania. Elektrické stroje so zvýšeným počtom fáz sa používajú predovšetkým z dôvodu ich bezpečnosti a spoľahlivosti v porovnaní s trojfázovými indukčnými strojmi. Ďalšie fázy v porovnaní so štandardnými trojfázovými motormi umožňujú vytvorenie rotujúceho toku aj v poruchových podmienkach. Riadenie meniča bezprostredne po poruche musí zabezpečiť prevádzku indukčného stroja.

KLúčové slova — Viacfázový indukčný stroj, päťfázový indukčný motor, trojfázové napájanie

Abstract—The paper deals with operation states of five-phase induction motor in case three-phase supply. Electrical machines with increased number of phases are being used primarily because of their safety and reliability comparing with three-phase induction machines. The additional phases compared to standard three-phase motors allow the creation of a rotating flux even in fault conditions. The control of inverter in post-fault situation must ensure operation of the induction machine.

Keywords — Multiphase induction machine, five-phase induction motor, three-phase supply

I. ÚVOD

Viacfázové elektrické pohony sú navrhované pre aplikácie s premenlivými otáčkami, kde je možné lepšie využiť ich niektoré výhody (napr. nižšie zvlnenie krútiaceho momentu, vyššia celková spoľahlivosť celého pohonného systému, lepšie rozdelenie výkonu na fázu a pod.) [1]. V porovnaní s trojfázovými pohonmi je ale najzaujímavejšou vlastnosťou viacfázových pohonov tzv. poruchová odolnosť, čo umožňuje to, aby pri poruche napr. jednej fázy či už motora (rotor s kľetkou nakrátko) alebo meniča, pohon fungoval v obmedzenom režime aj po vzniku poruchy [2-5].

Vinutie statora vo viacfázovom stroji vytvára magnetické pole s nižším obsahom priestorovo-harmonických zložiek, takže účinnosť je vyššia ako v trojfázovom stroji. Viacfázové stroje sú menej citlivé ako trojfázové vyššie harmonické zložky, ktoré produkujú pulzujúce momenty pri párných násobkoch základnej napájacej frekvencie stroja [6].

Ďalšou výhodou viacfázového motora je zlepšenie momentovej charakteristiky hlavne pri nízkych rýchlostiach, kde nastáva násobné zvýšenie krútiaceho momentu oproti trojfázovému indukčnému motoru [7].

Viacfázové motory majú taktiež nižšiu pulzáciu krútiaceho momentu a znížený prúd na fázu bez zvýšenia napätia na fázu. Viacfázové indukčné motory sú tiež zaujímavé ako realizovateľné alternatívne riešenia náhrady trojfázového indukčného motora pre hybridné elektrické vozidlá, pre aplikácie v lietadlách a pre lodné pohony [8-13]. Päť fáz je najmenší počet fáz viacfázového motora, ktorý sa bežne používa.

II. MATEMATICKÝ POPIS 5-FÁZOVÉHO INDUKČNÉHO MOTORA

Napäťové rovnice jednotlivých fáz (u_A až u_E) päťfázového indukčného stroja sú nasledovné:

$$\begin{aligned} u_A &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t) \\ u_B &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t - 2\pi/5) \\ u_C &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t - 4\pi/5) \\ u_D &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t + 4\pi/5) \\ u_E &= \sqrt{2} \cdot U \cdot \cos(\omega t + 2\pi/5) \end{aligned} \quad (1)$$

kde U je fázové napájacie napätie motora (rms).

Pre päťfázový indukčný motor môžeme vytvoriť matematický model v ľubovoľnej rovine d-q-x-y-0 [6]. Prvé dve zložky (d-q) predstavujú magnetické toky, výkon a krútiaci moment stroja a zvyšné zložky (x-y) generujú straty v stroji. Jediný dôvod, prečo sa používa aj nulová zložka je zobrazenie invariantnosti výkonu v systéme. Transformačná matica (2) pre stator je nasledovná:

$$A_s = \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \alpha) & \cos(\theta_s - 2\alpha) & \cos(\theta_s + 2\alpha) & \cos(\theta_s + \alpha) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \alpha) & -\sin(\theta_s - 2\alpha) & -\sin(\theta_s + 2\alpha) & -\sin(\theta_s + \alpha) \\ 1 & \cos(2\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(2\alpha) \\ 0 & \sin(2\alpha) & \sin(4\alpha) & -\sin(4\alpha) & -\sin(2\alpha) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

kde θ_s je fázový posun osi d vzhľadom na magnetickú os fázy „A” a uhol $\alpha = 2\pi / 5$.

Transformácia premenných rotora (3) sa vykonáva s použitím rovnakej transformačnej matice ako pri statore, pričom uhol θ_s je nahradený uhlom β :

$$A_R = \sqrt{\frac{2}{5}} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\beta) & \cos(\beta-\alpha) & \cos(\beta-2\alpha) & \cos(\beta+2\alpha) & \cos(\beta+\alpha) \\ -\sin(\beta) & -\sin(\beta-\alpha) & -\sin(\beta-2\alpha) & -\sin(\beta+2\alpha) & -\sin(\beta+\alpha) \\ 1 & \cos(2\alpha) & \cos(4\alpha) & \cos(2\alpha) & \cos(2\alpha) \\ 0 & \sin(2\alpha) & \sin(4\alpha) & -\sin(4\alpha) & -\sin(2\alpha) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

kde β je fázový posun osi d vzhľadom na magnetickú os rotora.

Transformačné uhly pre statorové a rotorové veličiny súvisia s ľubovoľnou rýchlosťou zvolenej spoločnej súradnicovej sústavy:

$$\theta_s = \int \omega_a \cdot dt \quad (4)$$

$$\beta = \theta_s - \theta = \int (\omega_a - \omega) \cdot dt \quad (5)$$

kde ω je okamžitá elektrická uhlová rýchlosť otáčania rotora.

Za predpokladu, že rovnice stroja sú transformované do súradnicovej sústavy otáčajúcej sa uhlovou rýchlosťou ω_a , model päťfázového indukčného stroja môžeme popísať nasledujúcimi napäťovými rovnicami pre stator:

$$\begin{aligned} u_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} - \omega_a \cdot \psi_{qs} + p \cdot \psi_{ds} \\ u_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \omega_a \cdot \psi_{ds} + p \cdot \psi_{qs} \\ u_{xs} &= R_s \cdot i_{xs} + p \cdot \psi_{xs} \\ u_{ys} &= R_s \cdot i_{ys} + p \cdot \psi_{ys} \\ u_{0s} &= R_s \cdot i_{0s} + p \cdot \psi_{0s} \end{aligned} \quad (6)$$

Pre rotor stroja môžeme napísať nasledujúce napäťové rovnice:

$$\begin{aligned} u_{dr} &= R_r \cdot i_{dr} - (\omega_a - \omega) \cdot \psi_{qr} + p \cdot \psi_{dr} \\ u_{qr} &= R_r \cdot i_{qr} + (\omega_a - \omega) \cdot \psi_{dr} + p \cdot \psi_{qr} \\ u_{xr} &= R_r \cdot i_{xr} + p \cdot \psi_{xr} \\ u_{yr} &= R_r \cdot i_{yr} + p \cdot \psi_{yr} \\ u_{0r} &= R_r \cdot i_{0r} + p \cdot \psi_{0r} \end{aligned} \quad (7)$$

Rovnice pre magnetické toky v statore stroja sú nasledujúce:

$$\begin{aligned} \psi_{ds} &= (L_{1s} + L_m) \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\ \psi_{qs} &= (L_{1s} + L_m) \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\ \psi_{xs} &= L_{1s} \cdot i_{xs} \\ \psi_{ys} &= L_{1s} \cdot i_{ys} \\ \psi_{0s} &= L_{1s} \cdot i_{0s} \end{aligned} \quad (8)$$

Podobne, pre magnetické toky v rotore stroja platia tieto rovnice:

$$\begin{aligned} \psi_{dr} &= (L_{1r} + L_m) \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \\ \psi_{qr} &= (L_{1r} + L_m) \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \\ \psi_{xr} &= L_{1r} \cdot i_{xr} \\ \psi_{yr} &= L_{1r} \cdot i_{yr} \\ \psi_{0r} &= L_{1r} \cdot i_{0r} \end{aligned} \quad (9)$$

V rovniciach (6) - (9) indexy s a r určujú premenné resp. parametre statora a rotora. Symboly R a L znamenajú odpor a indukčnosť a symboly u , i označujú napätie, prúd a ψ magnetický tok.

V rovniciach (8) a (9) je $L_m = (5/2)M$, kde M je maximálna hodnota vzájomnej indukčnosti statora voči rotoru v modeli motora.

Z vyššie uvedených rovníc (6) - (9) sa môže určiť krútiaci moment motora a rýchlosť rotora ako:

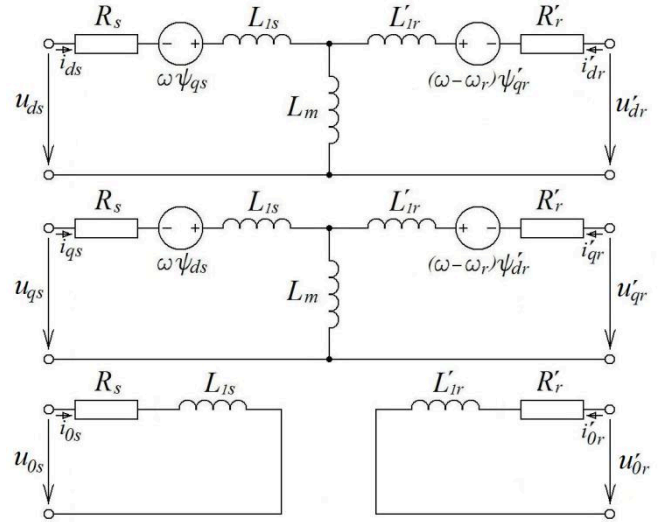
$$T_e = \frac{5}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} + \psi_{qs} \cdot i_{ds}), \quad (10)$$

$$T_e = \frac{5}{2} \cdot P \cdot M \cdot (i_{dr} \cdot i_{qs} + i_{ds} \cdot i_{qr}), \quad (11)$$

$$\omega = \frac{P}{2 \cdot J} \cdot \int (T_e - T_L), \quad (12)$$

kde P je počet pólov, J je moment zotrvačnosti, T_L je záťažný moment motora, T_e je elektromechanický moment a ω je uhlová rýchlosť rotora.

Náhradná schéma päťfázového indukčného motora v d-q-0 súradnicovom systéme je znázornená na obr.1.



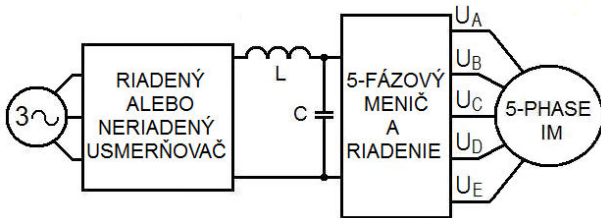
Obr. 1. Náhradná schéma päťfázového indukčného motora v súradnicovom systéme d-q-0

Model v ustálenom stave a náhradná schéma päťfázového indukčného motora sú vhodné pre modelovanie vlastností stroja v ustálenom stave.

III. POHON S PÄTFÁZOVÝM INDUKČNÝM MOTOROM

Pohonný systém sa skladá z päťfázového indukčného stroja, päťfázového meniča s PWM riadením výstupného

napätia, LC filtra a vstupného usmerňovača. Trojfázové striedavé napätie sa usmerňuje na jednosmerné buď neriadeným alebo riadeným usmerňovačom. Zvlnenie jednosmerného napätia sa odstráni pomocou LC filtra na vstupe DC-AC meniča. Výstupné napätie meniča napája jednotlivé satorové vinutia päťfázového indukčného stroja. Úplná bloková schéma pohonu s päťfázovým indukčným motorom je znázornená na obr. 2.

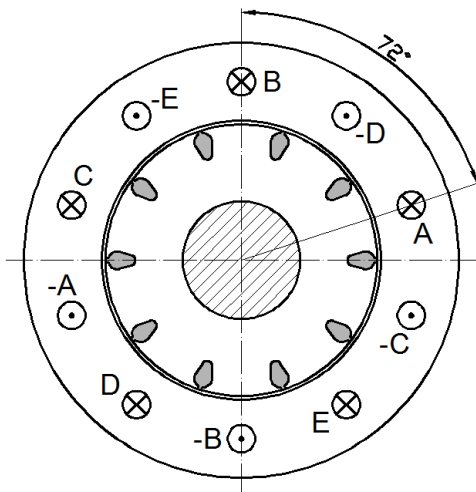


Obr. 2. Bloková schéma pohonu s päťfázovým indukčným motorom

IV. MERANIE PÄTFÁZOVÉHO INDUKČNÉHO MOTORA PŘI TROJFÁZOVOM NAPÁJANÍ

Podobne ako trojfázový indukčný motor pracuje päťfázový indukčný motor, keď je na vinutie statora privádzané päťfázové napájanie striedavým napätím (resp. prúdom), ktoré je priestorovo a časovo posunuté o 72° elektrických. Rotujúce magnetické pole sa otáča synchronnou rýchlosťou. V rotore (kľetka nakrátko) sa indukuje EMF a v dôsledku toho prúd v rotore vytvára vlastné magnetické pole. Vzájomným pôsobením týchto dvoch magnetických polí (statora a rotora) sa vytvára krútiaci moment [12].

Vinutie statora päťfázového stroja je navrhnuté tak, že priestorový posun medzi dvomi po sebe nasledujúcimi fázami statora je 72 stupňov (v prípade symetrického stroja), ako je znázornené na obr. 3 [6].



Obr. 3. Rez elektromagnetickým obvodom 5-fázového indukčného motora s koncentrovaným vinutím

Vlastné meranie bolo realizované na päťfázovom indukčnom motore, ktorého nominálne parametre sú uvedené v tabuľke I.

Pri meraní päťfázového indukčného stroja v stave bez zaťaženia je motor pripojený na trojfázové symetrické napájacie napätie 100 V (RMS) s fázovým posunom 120°

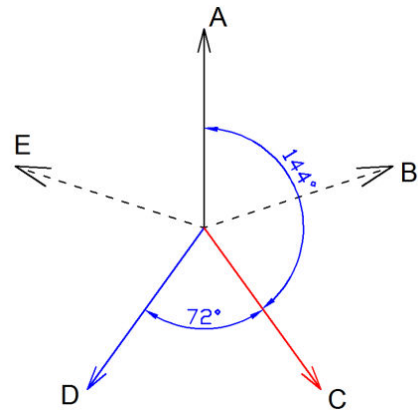
a frekvenciou 50 Hz. Satorové vinutie stroja je zapojené do hviezdy.

TABUĽKA I. NOMINÁLNE PARAMETRE PÄTFÁZOVÉHO INDUKČNÉHO MOTORA

Parameter	Hodnota
Nominálny výkon	1500 W
Nominálne napätie	230 V
Nominálny prúd	6.2 A
Nominálny moment	5.0 N.m
Nominálne otáčky	2860 rpm
Počet pólov	2

A. Trojfázové napájanie - fázy A, C a D

Ak je napájacie napätie trojfázové a napájame ním napr. fázy A, C a D, tak päťfázový indukčný stroj pracuje ako nevyvážený trojfázový indukčný stroj, kde dve susedné fázy sú fázovo posunuté o 72° a tretia fáza je fázovo posunutá o 144° elektrických (obr. 4).

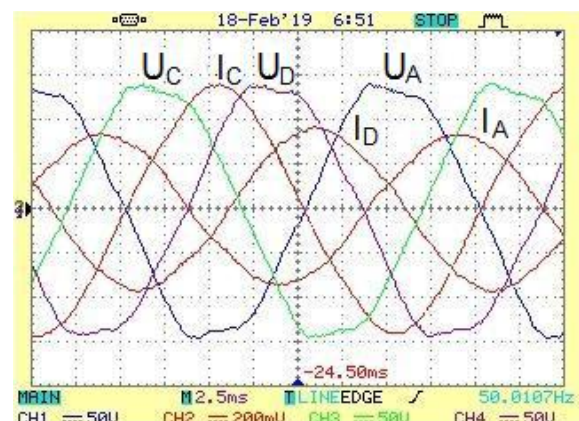


Obr. 4. Trojfázové napájanie päťfázového indukčného stroja (fázy A, C a D)

Namerané veličiny motora (napätia, prúdy a účinníky jednotlivých fáz) sú uvedené v tabuľke II.

TABUĽKA II. NAMERANÉ VELIČINY MOTORA (FÁZY A, C, D)

Fáza	Napätie [V]	Prúd [A]	Účinník
A	100,4	2,319	0,423
C	101,6	3,729	0,469
D	100,5	2,395	0,719



Obr. 5. Namerané priebehy napätí a prúdov v jednotlivých fázach A, C a D

Na obrázku 5 sú zobrazené priebehy napätí a prúdov v jednotlivých fázach päťfázového indukčného stroja pri rýchlosti otáčania naprázdno 1004,8 ot/min. Keď je päťfázový indukčný stroj pripojený k trojfázovému symetrickému napájaciemu napätiu, rýchlosť otáčania sa znižuje (v porovnaní s päťfázovým napájaním, ako je to uvedené v [14]).

Frekvenčná analýza fázových napätí je uvedená v tabuľke III. Frekvenčná analýza fázových prúdov je uvedená v tabuľke IV.

TABUĽKA III. Frekvenčná analýza fázových napätí (U_A , U_C a U_D)

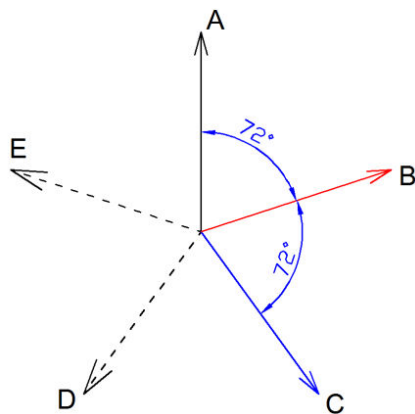
Č. harm.	U_A [%H01]	U_C [%H01]	U_D [%H01]
3	3,4	3,2	3,2
5	3,9	3,4	3,9
7	0,9	1,1	0,8
9	0,2	0,3	0,3

TABUĽKA IV. Frekvenčná analýza fázových prúdov (I_A , I_C a I_D)

Č. harm.	I_A [%H01]	I_C [%H01]	I_D [%H01]
3	2,0	3,2	1,9
5	2,0	1,3	2,0
7	0,2	0,3	-

B. Trojfázové napájanie - fázy A, B a C

Pri meraní s trojfázovým napájacím napätím fáz A, B a C tiež pracuje päťfázový indukčný stroj ako nevyvážený trojfázový indukčný stroj, pričom tri susedné napájacie fázy sú posunuté o 72° elektrických (obr. 6).



Obr. 6. Trojfázové napájanie päťfázového indukčného stroja (fázy A, B a C)

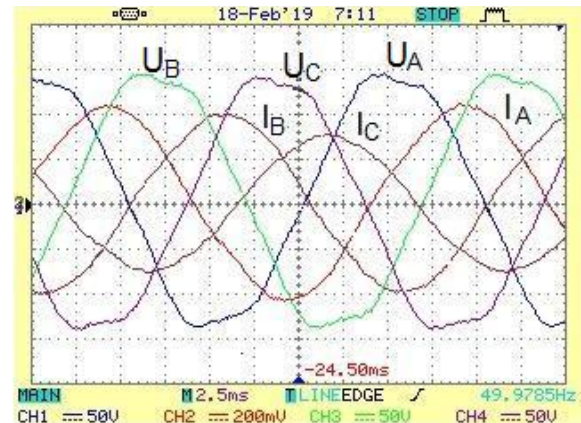
Pre dané trojfázové napájanie (fázy A, B a C) mení päťfázový indukčný stroj smer otáčania. Rýchlosť otáčania je v tomto prípade 990,6 ot/min.

Namerané veličiny motora pri tomto napájaní (napätia, prúdy a účinníky jednotlivých fáz) sú uvedené v tabuľke III.

TABUĽKA III. NAMERANÉ VELIČINY MOTORA (FÁZY A, B, C)

Fáza	Napätie [V]	Prúd [A]	Účinník
A	100,3	2,934	0,375
B	101,3	2,703	0,391
C	100,8	2,101	0,588

Obrázok 7 zobrazuje priebehy napätia a prúdov v jednotlivých fázach päťfázového indukčného stroja pre napájané fázy A, B a C.



Obr. 7. Namerané priebehy napätí a prúdov v jednotlivých fázach A, B a C

Frekvenčná analýza fázových napätí je uvedená v tabuľke V. Frekvenčná analýza fázových prúdov je uvedená v tabuľke VI.

TABUĽKA V. Frekvenčná analýza fázových napätí (U_A , U_B a U_C)

Č. harm.	U_A [%H01]	U_B [%H01]	U_C [%H01]
3	3,7	3,6	0,3
5	4,1	1,4	-
7	0,8	0,2	-

TABUĽKA IV. Frekvenčná analýza fázových prúdov (I_A , I_B a I_C)

Č. harm.	I_A [%H01]	I_B [%H01]	I_C [%H01]
3	3,5	2,0	1,5
5	1,4	1,4	2,3
7	0,2	0,3	-

V. ZÁVER

Výhody a nevýhody pohonu s päťfázovým indukčným motorom sú nasledovné:

- Hlavnou výhodou používania päťfázového indukčného stroja na pohon je možnosť spoľahlivej a správnej funkcie (aj keď v obmedzenej prevádzke) aj pri čiastočnej poruche stroja. Päťfázový indukčný stroj môže pracovať s jednou alebo dvoma prerušenými fázami, čo dáva pohonu tzv. „vysokú odolnosť“ voči poruchám. V týchto konkrétnych špecifických prípadoch sú odpojené len „chybné“ fázy, zatiaľ čo ostatné fázy pracujú ako v normálnych pracovných podmienkach.

- Vo všetkých týchto poruchových stavoch je ale potrebná správna stratégia regulácie napätia a prúdu zvyšných fáz, aby sa obmedzilo zvlnenie krútiaceho momentu, čo môže byť predpísaná požiadavka vo viacerých aplikáciách.

- Na napájanie a reguláciu indukčného stroja je ale nevyhnutný päťfázový menič s pomerne zložitou možnosťou automatickej regulácie v poruchovom stave indukčného motora.

Pohon s pětifázovým indukčným strojom má svoje použitie v aplikáciách kritických z hľadiska bezpečnosti, ktoré vyžadujú vysokú odolnosť voči poruchám a zabezpečenie vysokej spoľahlivosti pohonného systému. Pětifázový indukčný stroj možno využiť v pohonoch pre výťahy, elektrické lode, hybridné vozidlá, čerpadlá, ventiláciu v banských (resp. podzemných) prevádzkach, kompresory, elektrické lietadlá a pod. Hlavne v námorných aplikáciách je predpoklad vysokej využiteľnosti [15]. Čo je podstatné, tak pri vyššom počte fáz je výkon motora

rozdelený na jednotlivé fázy, čím sa znižujú hodnoty prúdového zaťaženia meniča na jednu fázu, čo je veľmi žiadané v aplikáciách stredného napätia [16].

Po stručnom úvode a matematickom opise pětifázového indukčného stroja tento článok prezentuje úvodné merania pětifázového indukčného stroja v prípade trojfázového napájania pri znížených fázových napätiach. Ďalšie merania (v stave bez zaťaženia a aj pri zaťažení stroja) budú realizované po dokončení výroby pětifázového meniča.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-16-0270 a taktiež na základe zmluvy č. APVV-16-0206.

LITERATÚRA

- [1] E. Levi, "Multiphase electric machines for variable-speed applications", in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 5, pp. 1893–1909, May 2008.
- [2] J. R. Fu and T. A. Lipo, "Disturbance free operation of a multiphase current regulated motor drive with an opened phase", in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 5, pp. 1267–1274, 1994.
- [3] A. Tani, M. Mengoni, L. Zarri, G. Serra and D. Casadei, "Control of Multi-Phase Induction Motors with an Odd Number of Phases Under Open-Circuit Phase Faults", in IEEE Transactions on Power Electronics, DOI: 10.1109/TPEL.2011. 2140334.
- [4] L. Schreier, J. Bendl and M. Chomat, "Operation of five-phase induction motor after loss of one phase of feeding source." in Electrical Engineering, vol. 99, no. 1, pp. 9–18, 2017.
- [5] L. Schreier, J. Bendl and M. Chomat, "Comparison of Selected Properties of Three- and Fivephase Induction Motors.", in Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, nr. 88, pp. 168–174, 2010.
- [6] E. Levi, E. Bojoi, F. Profumo, H. Toliyat and S. Williamson, "Multiphase induction motor drives – a technology status review", in IET Electric Power Applications, vol. 1, no. 4, pp. 489–516, 2007.
- [7] S. R. Vinchurkar and P. A. Pothi, "Comparison between Three Phase and Five Phase Induction Motor by using Converter". in International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication, vol. 3, no. 7, pp. 5007–5013, 2015.
- [8] P. Drozdowski, "Multiphase cage induction motors for controlled drives". in Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, no. 93, pp. 7–12, 2011.
- [9] K. Pieńkowski, "Analiza i sterowanie wielofazowego silnika indukcyjnego klatkowego." in Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, no. 65, pp. 305–319, 2011.
- [10] J. Listwan, and K. Pieńkowski, "Analiza układów sterowania wektorowego wielofazowym silnikiem indukcyjnym." in Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, no. 3, pp. 235–240, 2014.
- [11] J. Listwan and K. Pieńkowski, "Analysis of sliding-mode control of multi-phase induction motor." in Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, no. 4, pp. 107–112, 2015.
- [12] M. Barcaro, N. Bianchi, E. Fornasiero and F. Magnussen, "Experimental comparison between two fault-tolerant fractional-slot multiphase motor drives." in Proc. ISIE, pp. 2160–2165, 2010.
- [13] E. Levi, M. Jones, S. N. Vukosavic and H. A. Toliyat, "Steady-state modeling of series-connected five-phase and six-phase two-motor drives." in IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 44, no. 5, Sep./Oct. 2008.
- [14] M. Muteba and D. V. Nicolae, "Fault-tolerance of five-phase induction machines with mixed stator winding layouts: Torque ripple analysis.", in IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), Publisher: IEEE, pp. 308–314, 2015.
- [15] C. Heising, M. Oettmeier, V. Bartelt, J. Fang, V. Staudt and A. Steimel, "Simulation of asymmetric faults of a five-phase induction machine used in naval applications.", in 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Publisher: IEEE, pp. 1298–1203, 2009.
- [16] K. S. Aher and A. G. Thosar, "Modeling and Simulation of Five Phase Induction Motor using MATLAB/Simulink.", in Journal of Engineering Research and Applications, vol. 6, no. 5, part 7, pp. 1–8, 2016.

Bezpečnostní obvody strojních zařízení

Safety circuits of machinery

Tomáš Mlčák
Katedra elektrotechniky
VŠB – Technická univerzita Ostrava
Česká republika
Tomas.mlcak@vsb.cz

Roman Hrbáč
Katedra elektrotechniky
VŠB – Technická univerzita Ostrava
Česká republika
Roman.hrbac@vsb.cz

Stanislav Zajaczek
Katedra elektrotechniky
VŠB – Technická univerzita Ostrava
Česká republika
Stanislav.zajaczek@vsb.cz

Abstrakt—Tento článek demonstruje vzorovou aplikaci bezpečnostních obvodů strojního zařízení. Je zde ukázán návrh model stanoviště, ověřeny bezpečnostní funkce navrženého modelu v rámci praktické realizace a uvedení do provozu. Následně je vypracováno zhodnocení a potvrzení celkové bezpečnosti a případný návrh na jejich zdokonalení.

Klíčová slova—bezpečnostní technika strojů, bezpečnostní modul.

Abstract— This article demonstrates the exemplary application of machinery safety circuits. There is shown the design of the habitat model, verified the safety functions of the proposed model within the practical implementation and commissioning. Subsequently, the evaluation and confirmation of the overall safety and possible proposal for their improvement are elaborated.

Keywords— safety machinery, security module.

I. ÚVOD (NADPIS I)

Článek popisuje návrh a realizaci laboratorního stanoviště s využitím moderních systémů bezpečnostních obvodů. Toto stanoviště bude simulovat v dnešní době velice důležitou část moderního strojního zařízení, a to je funkční bezpečnost strojních zařízení. Postup stanovení úrovně vlastností PL podle normy ČSN EN ISO 13849-1 a úrovně integrity SIL dle ČSN EN 62061 pro návrh laboratorního modelu. V závěru je ověření navrženého modelu v rámci praktické realizace a uvedení do provozu. Následně je vypracováno zhodnocení a potvrzení celkové bezpečnosti s případnou možností jejich zdokonalení. Podkladem pro realizaci projektu jsou normy ČSN EN 61508-1, ČSN EN ISO 13849-1 a ČSN EN 62061.

II. LABORATORNÍ PANEL

Laboratorní panel simuluje výrobní linku se strukturou pro balírnou láhví s vysokorychlostní rotační linkou a průmyslovým robotem. Celá pracovní linka ve stanici č.1, kde jsou láhve posouvány po dopravním páse s rotačním etiketovacím automatem a následně v druhé části buňky jsou odebírány a baleny robotem. Start stanice je startován z centrálního řídicího systému. Práce ve stanici č.1 je doplňování etiket láhví do rotační linky s etiketovacím automatem jednou za hodinu, dále případné odstraňování provozních poruch a chyb balícího robota cca jednou za dvě hodiny.

Celá pracovní linka je umístěna za pevným oplocením a jako ochrana jsou vybrány dveře s blokováním, kde jsou použity elektrické bezpečnostní zámky s vyhodnocením stavu. Doba uvedení do klidu v případě určitého nebezpečného pohybu je dostatečně krátká k tomu, aby se stroj zastavil ještě dříve, než se operátor dostane k pohyblivé se části. Nouzová vypínací tlačítka jsou v dosahu na obou stranách buňky v blízkosti dveří. V případě vstupu pro doplňování etiket, drobného seřízení etiketovacího automatu, dá bezpečnostní systém povel provoznímu automatu na snížení otáček na povolenou mez a poté je vstup umožněn. V případě zvýšení otáček nad limit dojde k odstavení linky. Nenadálý rozběh robotu je považován za situaci, při níž může dojít k vážnému zranění. [1]

A. Popis laboratorního modelu

Laboratorní model tvoří samonosně stojící panel z hliníkového profilu, kde základní nosnou plochu pro komponenty tvoří ocelový plech. Rozložení jednotlivých komponent jsem částečně přizpůsobil rozmístění jednotlivých zařízení ve výrobní buňce. Fotografie modelu je na obr. 38. Schéma a software je příložen v příloze. Pro bezpečnostní obvody jsem použil komponenty firmy Pilz. Laboratorní panel je napájen 1f ~230V 50Hz/ TN-S, pro napájení samotného bezpečnostního obvodu je použito 24VDC z instalovaných zdrojů, čímž je napájen celý model bezpečnostního systému. First,.

B. Blokové schéma

V blokovém schématu je vyznačeno napojení jednotlivých bezpečnostních prvků tlutou barvou a tyto prvky budou sloužit pro splnění požadované bezpečnostní funkce. Červenou barvou je připojena technologie. The s.

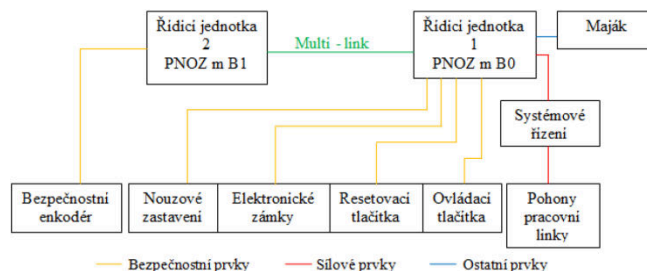


Fig. 1. Blokové schéma laboratorního panelu

III. URČENÍ RIZIKA PANELU

Musíme počítat s tím, že neočekávaný rozběh robota může způsobit vážné zranění nebo smrt operátorovi linky. Dále předpokládáme, že operátor nemá možnost se vyhnout zranění, neboť robot se pohybuje velice rychle.

Kategorie 1 - řízené zastavení bezpečnostním vypnutím, tj. zastavení pohybu stroje jakmile řídící systém přijme povel k zastavení, přičemž výkonové části stroje zůstanou během procesu zastavování pod napětím.

Dle popisu principu funkce zařízení v bodě 3.1 jsme zvolili parametry následovně:

$$h_{op} = 24 \text{ h za den}$$

$$d_{op} = 261 \text{ dnů za rok}$$

$$t_{cyklu} = 3600 \text{ s za cyklus}$$

$$K = \text{je počet sekund za hodinu; } K = 3600 \text{ s.h}^{-1}$$

$$n_{op1} = \frac{d_{op} \times h_{op} \times 3600 \text{ s/h}}{t_{cyklu}} = \frac{261 \times 24 \times 3600}{3600} = 6\,264 \frac{\text{cyklu}}{\text{rok}} \quad (2)$$

Celkový počet cyklů zařízení za rok je 6 264 cyklů.

Robotická linka

TAB.1 – URČENÍ ÚROVNĚ SIL PANELU ROBOTICKÁ LINKA URČENÍ SIL (ÚROVEŇ INTEGRITY BEZPEČNOSTI) DLE NORMY ČSN EN 62061

Následky	Závažnost Se	Class Cl					Četnost a doba Fr	Pravděpodobnost výskytu nebez. Pr	Vyhodnocení se Ar
		3-4	5-7	8-10	11-13	14-15			
Smrt, ztráta oka nebo paže	5	SIL 2	SIL 2	SIL 2	SIL 3	SIL 3	< 1 hodina	Velmi vysoká	
Třvalé, ztráta prstu	3		OM	SIL 1	SIL 2	SIL 2	> 1 h – < 1 den	Pravděpodobná	
Přechodné, lékařská péče	2			OM	SIL 1	SIL 2	> 1 den – < 2 týd.	Možná	Nemožná
Přechodné, první pomoc	1				OM	SIL 1	> 2 týd. – < 1 rok	Výjimečná	Možná
							> 1 rok	Zanedbatelná	Pravděpodobná

$$Cl = Fr + Pr + Ar = 5 + 5 + 5 \Rightarrow Cl = 15 + Se = 4$$

- odpovídá SIL3

Určení úrovně vlastností (PL - Performance Level) dle normy ČSN EN ISO 13849 [3].

$$\text{Hodnota PLr} = e \text{ (S2, F2, P2)}$$

A. Určení hodnoty PFHD u jednotlivých prvků

Pro určení výsledné požadované hodnoty SIL u bezpečnostních funkcí provedu výpočet pravděpodobnosti selhání všech subsystému (bezpečnostních prvků). Následně určím dosažitelnou mez jednotlivých subsystémů SILCL. Poté součtem pravděpodobnosti jednotlivých subsystémů vyhodnotím výslednou úroveň SIL dané bezpečnostní funkce. Určení hodnoty PFHD u některých prvků jsou definovány výrobcem v datových listech bezpečnostních prvků.

1) Nouzový stop sg2c elektronického zámku

Stejně parametry platí pro dvoukanálové zapojení tlačítka nouzového zastavení s použitím diagnostických funkcí v bezpečnostním relé. Pro zapojení je použita architektura D. Uvažujeme zde počet operací 1 za hodinu. Hodnota citlivosti pro společné poruchy β je zvolena dle normy 0,1. Diagnostické pokrytí DC v rámci použitých diagnostických funkcí je zvoleno 90 %. Vstupy bezpečnostního prvku jsou neustále kontrolovány testovacími pulzy bezpečnostního systému.

$$\lambda_{DE-s2gc} = 0,1 \cdot \frac{C}{B_{10D}} = 0,1 \cdot \frac{1}{75\,000} = 1,33 \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

kde:

λ_{De} intenzita nebezpečných poruch prvku subsystému

C počet operací za danou dobu

B_{10D} počet operací

$$\lambda_{DssE-s2gc} = (1 - \beta)^2 \cdot [\lambda_{De}^2 \cdot 2 \cdot DC] \cdot \frac{T_2}{2} + \{[\lambda_{De}^2 \cdot (1 - DC)] \cdot T_1\} + \beta \cdot \lambda_{De} =$$

$$= (1 - 0,1)^2 \cdot [(1,33 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 2 \cdot 0,9] \cdot \frac{1}{2} + \{[(1,33 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (1 - 0,9)] \cdot 175\,200\} + 0,1 \cdot 1,33 \cdot 10^{-6} = 4,44 \cdot 10^{-8}$$

kde:

λ_{De} intenzita nebezpečných poruch prvku subsystému

λ_{Dss} intenzita nebezpečných poruch prvku subsystému

T_2 diagnostický zkušební interval $T_2 = \frac{1}{C}$

T_1 interval kontrolní zkoušky nebo doba života

β citlivost na společné poruchy

DC diagnostické pokrytí prvku

$$PFH_{DE-s2gc} = \lambda_{DssE-s2gc} \cdot 1h = 4,44 \cdot 10^{-8} \cdot 1 = 4,44 \cdot 10^{-8}$$

kde:

PFH_{DssD} střední pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu

2) Nouzový stop PIT es Set3s-5ns

Pro dvoukanálové zapojení tlačítka nouzového zastavení s použitím diagnostických funkcí v bezpečnostním relé je použita architektura D. Uvažujeme zde počet operací 1 za hodinu. Hodnota citlivosti pro společné poruchy β je zvolena dle normy 0,1. Diagnostické pokrytí DC v rámci použitých diagnostických funkcí je zvoleno 90 %. Vstupy bezpečnostního prvku jsou neustále kontrolovány testovacími pulzy bezpečnostního systému.

Intenzita nebezpečných poruch prvků subsystému

$$\lambda_{DEstop} = 0,1 \cdot \frac{C}{B_{10D}} = 0,1 \cdot \frac{1}{181\,500} = 5,509 \cdot 10^{-7} \quad (4)$$

$$\lambda_{DEstop} = (1 - \beta)^2 \cdot [\lambda_{De}^2 \cdot 2 \cdot DC] \cdot \frac{T_2}{2} + \{[\lambda_{De}^2 \cdot (1 - DC)] \cdot T_1\} + \beta \cdot \lambda_{De} =$$

$$= (1 - 0,1)^2 \cdot [(5,509 \cdot 10^{-7})^2 \cdot 2 \cdot 0,9] \cdot \frac{1}{2} + \{[(5,509 \cdot 10^{-7})^2 \cdot (1 - 0,9)] \cdot 175\,200\} + 0,1 \cdot 5,509 \cdot 10^{-7} = 5,63 \cdot 10^{-8}$$

střední pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu

$$PFH_{DE-stop} = \lambda_{DE-stop} \cdot 1h = 5,63 \cdot 10^{-8} \cdot 1 = 5,63 \cdot 10^{-8}$$

3) Stykač ABB ISBL137082R1122

Pro dvoukanálový výstup charakteristiky zapojení D jsou použity dva stykače v seriovém zapojení. Dle normy ČSN EN 62061 byla zvolena citlivost na společnou poruchu $\beta = 0,1$. Cyklus spínání je 1 x za hodinu.

$$\lambda_{Stykač 1} = 0,1 \cdot \frac{C}{B_{10D}} = 0,1 \cdot \frac{1}{1\,300\,000} = 7,692 \cdot 10^{-8} \quad (5)$$

$$\lambda_{Stykač 2} = 0,1 \cdot \frac{C}{B_{10D}} = 0,1 \cdot \frac{1}{1\,300\,000} = 7,692 \cdot 10^{-8}$$

$$T_1 = \frac{B_{10}}{C} = \frac{1\,300\,000}{1} = 7,692 \cdot 10^{-8}$$

$$\lambda_{D\,Stykač1+2} = (1 - \beta)^2 \cdot \lambda_{Stykač 1} \cdot \lambda_{Stykač 2} \cdot T_1 + \beta \cdot \frac{(\lambda_{Stykač 1} + \lambda_{Stykač 2})}{2}$$

$$\lambda_{D\,Stykač1+2} = (1 - 0,1)^2 \cdot 7,692 \cdot 10^{-8} \cdot 7,692 \cdot 10^{-8} \cdot 7,692 \cdot 10^{-8} + 0,1 \cdot \frac{(7,692 \cdot 10^{-8} + 7,692 \cdot 10^{-8})}{2} = 1,39 \cdot 10^{-8}$$

$$PFH_{D\,Stykač1+2} = \lambda_{D\,Stykač1+2} \cdot 1h = 1,39 \cdot 10^{-8} = 1,39 \cdot 10^{-8}$$

Kde:

PFH_{DssD} střední pravděpodobnost nebezpečné poruchy za hodinu

4) *Bezpečnostní relé PNOZ m B0*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 9,55 \cdot 10^{-10}$$

5) *Bezpečnostní relé PNOZ m B1*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 4,9 \cdot 10^{-10}$$

6) *Rozšiřující modul PNOZ EF 4DI4DO*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 3,34 \cdot 10^{-10}$$

7) *PNOZ EF Multi link*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 8,82 \cdot 10^{-9}$$

8) *PNOZ EF PDP*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 5,35 \cdot 10^{-9}$$

9) *PNOZ PDP67*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 1,94 \cdot 10^{-9}$$

10) *PNOZ EF MM1*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 5,35 \cdot 10^{-9}$$

11) *Bezpečnostní enkodér*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 1,94 \cdot 10^{-9}$$

12) *Bezpečnostní zámek zajištění s2gc*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 3,8 \cdot 10^{-10}$$

13) *Bezpečnostní zámek OSSD s2gc*

Hodnota je zvolená z katalogu.

$$PFHD = 2,08 \cdot 10^{-9}$$

B. *Určení hodnoty SIL pro navržené diagnostické funkce*

Výsledné hodnoty SIL pro bezpečnostní funkci, jsem určil jako součet všech hodnot PFHD u použitých prvků v dané bezpečnostní funkci

1) *Použitá funkce v E – stopu s2gc na panelu*

$$PFH_{D\,E-stop\,s2gc} + PFH_{D\,PNOZ\,m\,B0} + PFH_{D\,Stykač\,1+2} = PFH_{D\,B_funkce\,1}$$

$$4,44 \cdot 10^{-8} + 9,55 \cdot 10^{-10} + 1,39 \cdot 10^{-8} = 5,93 \cdot 10^{-8} \rightarrow SIL3 = PLe$$

2) *Použitá funkce v OSSD s2gc na panelu*

$$PFH_{D\,OSSD\,s2gc} + PFH_{D\,PNOZ\,m\,B0} + PFH_{D\,PNOZ\,m\,B1} + PFH_{D\,EF\,MM1} + PFH_{D\,Multi-linkPDP} + PFH_{D\,Stykač\,1+2} = PFH_{D\,B_funkce\,2}$$

$$2,08 \cdot 10^{-9} + 9,55 \cdot 10^{-10} + 4,9 \cdot 10^{-10} + 8,82 \cdot 10^{-9} + 3,37 \cdot 10^{-10} + 1,39 \cdot 10^{-8} = 2,66 \cdot 10^{-8} \rightarrow SIL3 = PLe$$

3) *Použitá funkce v solenoid – E - stop s2gc na panelu*

$$PFH_{D\,OSSD\,s2gc} + PFH_{D\,PNOZ\,m\,B0} + PFH_{D\,PNOZ\,m\,B1} + PFH_{D\,EF\,MM1} + PFH_{D\,Multi-linkPDP} + PFH_{D\,8DI4DO} + PFH_{D\,sg2c\,solenoid} = PFH_{D\,B_funkce\,3}$$

$$2,08 \cdot 10^{-9} + 9,55 \cdot 10^{-10} + 4,9 \cdot 10^{-10} + 8,82 \cdot 10^{-9} + 3,37 \cdot 10^{-10} + 3,80 \cdot 10^{-10} = 1,35 \cdot 10^{-8} \rightarrow SIL3 = PLe$$

4) *Použitá funkce v E – stopu na panelu*

$$PFH_{D\,E-stop\,PiTes} + PFH_{D\,PDP67} + PFH_{D\,Multi-linkPDP} + PFH_{D\,PNOZ\,m\,B0} + PFH_{D\,Stykač\,1+2} = PFH_{D\,B_funkce\,4}$$

$$5,63 \cdot 10^{-8} + 1,94 \cdot 10^{-9} + 5,35 \cdot 10^{-9} + 9,55 \cdot 10^{-10} + 1,39 \cdot 10^{-8} = 7,84 \cdot 10^{-8} \rightarrow SIL3 = PLe$$

5) *Použitá funkce v elektrického zámku SL0.5 na panelu*

$$PFH_{D\,PSEN\,SL0.5} + PFH_{D\,PNOZ\,m\,B0} + PFH_{D\,PNOZ\,m\,B1} + PFH_{D\,Multi-linkPDP} + PFH_{D\,4DI4DO} + PFH_{D\,EF\,MM1} + PFH_{D\,Stykač\,1+2} = PFH_{D\,B_funkce\,5}$$

$$5,37 \cdot 10^{-9} + 9,55 \cdot 10^{-10} + 4,9 \cdot 10^{-10} + 8,82 \cdot 10^{-9} + 3,37 \cdot 10^{-10} + 5,35 \cdot 10^{-9} + 1,39 \cdot 10^{-8} = 2,15 \cdot 10^{-8} \rightarrow SIL3 = PLe$$

6) *Použitá funkce v encoderu na panelu*

$$PFH_{D \text{ Encoder}} + PFH_{D \text{ PNOZ m B0}} + PFH_{D \text{ PNOZ m B1}} + PFH_{D \text{ EF MM1}} + PFH_{D \text{ Multi-linkPDP}} = PFH_{D \text{ B_funkce 6}}$$

$$1,7 \cdot 10^{-8} + 9,55 \cdot 10^{-10} + 4,19 \cdot 10^{-10} + 8,82 \cdot 10^{-9} + 3,37 \cdot 10^{-10} + 1,39 \cdot 10^{-8} = 4,15 \cdot 10^{-8} \rightarrow SIL3 = PL_e$$

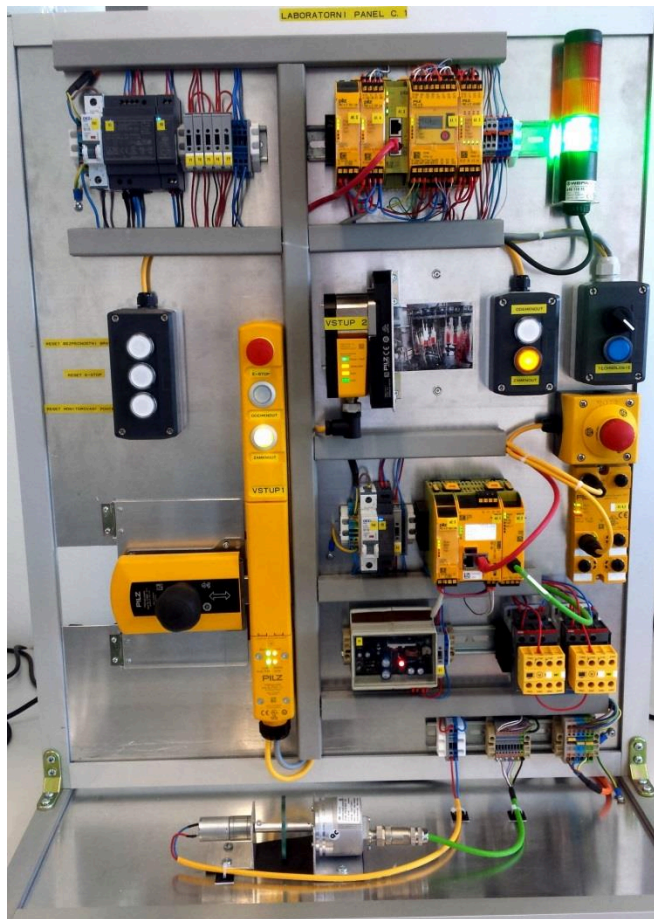


Fig. 2. Fotodokumentace vyrobeného laboratorního panelu

IV. ZÁVĚR

Ověřený návrh pomocí pravděpodobností a výpočtového nástroje odpovídá požadavků SIL3 požadovaném při analýze rizika. Po sestavení laboratorního modelu bylo nutno zařízení oživit a naprogramovat.

U bezpečnostního programu jsou použity funkční bloky přímo přizpůsobené pro funkční bezpečnost od firmy Pilz. Použitím těchto bloků je dosaženo požadované správné funkce bezpečnostní části. Při testování hotového modelu byla ověřena správná funkce navržené bezpečnostní logiky. Při aktivaci jednoho z bezpečnostních prvků dojde k řízenému zastavení a odpojení motoru, pomocí bezpečnostních funkcí měniče SS1 a STO.

Pomocí resetovacího tlačítka je splněna požadovaná bezpečnostní funkce a při deaktivaci bezpečnostního prvku uvolněním tlačítka nouzového zastavení nedojde k samovolnému spuštění stroje. Stroj je možno ovládat až po stisku resetovacího tlačítka, které uvede zařízení do provozního stavu s ohledem na jiný aktivní bezpečnostní prvek. Navržením správné bezpečnostní funkce nedojde ke spuštění laboratorního bezpečnostního modelu v nebezpečných situacích zjištěných při diagnostice rizika.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory Institucionálního Rozvojového Projektu RPP-TO - 1a číslo 59 s názvem „Návrh a realizace základního stanoviště bezpečnostních obvodů“.

ODKAZY

- [1] https://library.e.abb.com/public/efb3781390c4499686c1e5f1244db08f/ABB_Prirucka_bezpecnosti_-_20Katalog%20JokabSafety.pdf

LITERATURA

- [2] ČSN EN 62061 - Bezpečnost strojních zařízení - Funkční bezpečnost elektrických, elektronických a programovatelných elektronických řídicích systémů souvisejících s bezpečností
- [3] ČSN EN ISO 13849-1 Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 1: Obecné zásady pro konstrukci
- [4] ČSN EN ISO 13849-2 Bezpečnost strojních zařízení - Bezpečnostní části ovládacích systémů - Část 2: Ověřování platnosti

Aktivity Univerzity Pardubice v rámci Centra kompetence drážních vozidel

Activities of the University of Pardubice in the Competence Center of Railway Vehicles

Jaroslav Novák

*Dopravní fakulta Jana Pernera
Univerzita Pardubice
Pardubice, ČR
e-mail: jaroslav.novak@upce.cz*

Václav Lenoch

*Dopravní fakulta Jana Pernera
Univerzita Pardubice
Pardubice, ČR
e-mail: vaclav.lenoch@upce.cz*

Ladislav Mlynařík

*Dopravní fakulta Jana Pernera
Univerzita Pardubice
Pardubice, ČR
e-mail: ladislav.mlynarik@upce.cz*

Ondřej Sadílek

*Dopravní fakulta Jana Pernera
Univerzita Pardubice
Pardubice, ČR
e-mail: ondrej.sadilek@upce.cz*

Abstrakt—Příspěvek prezentuje hlavní aktivity Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice v Centru kompetence drážních vozidel v oblasti elektrotechnických systémů. Jedná se o výzkum vlastností trakčních akumulátorů, simulační modelování pro využití dvouzdrojových vozidel s napájením z troleje a z akumulátoru a výzkum napájení drážních vozidel z alternativních zdrojů.

Klíčová slova — drážní vozidlo, trakční akumulátor, alternativní zdroj, trakční pohon

Abstract—This paper presents the main activities of University of Pardubice, Transport faculty in the Competence center of railway vehicles in the field of railway vehicles electrical systems. This research is oriented mainly on traction battery use, simulation modelling of two – source vehicles with power supply from the line and battery and research of railway vehicles with alternative supply.

Keywords — railway vehicle, traction accumulator, alternative supply, traction drive

I. ÚVOD

V letech 2012 až 2019 je řešen projekt Centrum kompetence drážních vozidel podpořený TAČR. Jedná se o prestižní projekt v oblasti drážní techniky, do kterého je zapojena převážná část českých firem působících v oblasti drážní techniky a většina vysokoškolských pracovišť zabývajících se touto problematikou a to jak z hlediska mechanické, tak i elektrické části vozidel. Jedním z významně zapojených vysokoškolských pracovišť je Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzity Pardubice. Na tomto pracovišti se v rámci projektu řeší problémy vztahující se k mechanické stavbě vozidel, k materiálovým tématům i problematika elektrických a elektronických systémů drážních vozidel. Posledně jmenovaná problematika je řešena na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací

techniky v dopravě. Zde jsou nebo byla v rámci projektu řešena tato témata:

- Výpočetní a simulační práce v oblasti hybridních posunovacích lokomotiv se spalovacím motorem
- Řízení a řídicí systémy trakce na speciálních drážních vozidlech s hydrostatickým a elektrickým přenosem výkonu
- Implementace legislativy pro SW v drážních aplikacích
- Elektromechanické interakce trakčního elektromotoru a převodovky
- Simulační výpočty ověřující využití drážních dvouzdrojových vozidel s napájením z troleje a z akumulátoru v podmínkách ČR
- Výzkum v oblasti využití trakčních akumulátorů na drážních vozidlech
- Výzkum alternativního napájení drážních vozidel

Některé výsledky výzkumu v první oblasti jsou prezentovány například v [1]. Výsledky výzkumu v druhé a třetí oblasti byly publikovány například v [2] a [3]. Výsledky výzkumu ve čtvrté jmenované oblasti byly publikovány v [4]. Některé výsledky výzkumu ve třech posledních jmenovaných oblastech jsou uvedeny v následujících odstavcích.

II. DVOUZDROJOVÁ DRÁŽNÍ VOZIDLA

Přední světoví výrobci kolejových vozidel (Siemens, Bombardier, Stadler) v současnosti finalizují přípravu drážních dvouzdrojových vozidel s kombinovaným

napájením z troleje a z akumulátorů jako techniku, která začne v regionální osobní dopravě nahrazovat vozidla se spalovacími motory. V rámci Centra kompetence drážních vozidel je na Univerzitě Pardubice na simulační úrovni věnována této technice pozornost již od roku 2012. V současnosti byly provedeny předprojektční práce na doplnění akumulátorové výzbroje na elektrickou příměstskou jednotku i ve firmě ŠKODA TRANSPORTATION (jedna z řešitelských organizací projektu), ale realizace je nejistá.

Výhody dvouzdrojových jednotek pro regionální osobní dopravu jsou zřejmé:

- Čistý a komfortní elektrický provoz i na neelektrifikovaných tratích
- Eliminace přestupů a zkrácení jízdních dob
- Připravená nabíjecí infrastruktura v podobě sítě elektrifikovaných tratí
- Eliminace nutnosti nabíjecích časů – akumulátory jsou nabíjeny v té části trasy, kdy vozidlo jede po elektrifikované trati
- Snížení provozních nákladů, nižší nároky na údržbu
- Vyšší zhodnocení investic do nové elektrifikace tratí – rozšíří se možnosti elektrického provozu i na neelektrifikovaných tratích v okolí tratě elektrifikované

Na Univerzitě Pardubice byla prováděna řada simulačních výpočtů jízdy dvouzdrojového vozidla v konkrétních trasách v železniční síti v ČR s cílem ověřit použitelnost tohoto typu vozidla a vyčíslit energetickou náročnost a provozní úspory. Při výpočtech byly respektovány reálné parametry trati a vozidla a jeho pohonného řetězce. Parametry vozidla se mírně obměňovaly, ale v zásadě vycházely z parametrů reálných elektrických vozidel obdobné kategorie. Parametry vozidla se ustálily převážně na těchto hodnotách:

Vozů	2
Počet náprav/motorů	8/4
Trakční výkon	1500 kW
Počet sedadel	120 až 150
Hmotnost	110 t
Maximální rychlost	160 km/h
Napájecí systém	25 kV, 50 Hz a AKU
Kapacita akumulátoru	600 kWh
Hmotnost akumulátoru	4 t
Životnost akumulátoru	min. 4 roky

Výstupem simulačních výpočtů na přibližně 20 trasách v ČR byly časové průběhy rychlosti, tažné a brzdné síly, trakčního výkonu, zrychlení, odebraná energie z troleje a z akumulátoru, aktuální kapacita akumulátoru, vypočtený jízdní řád.

Na obr. 1 je pro ilustraci znázorněna část výsledků simulačních výpočtů pro trať Havlíčkův Brod – Jihlava – Telč – Slavonice – průběhy výkonu, proudu a napětí

akumulátorové baterie, energie odebrané z troleje a z akumulátoru.

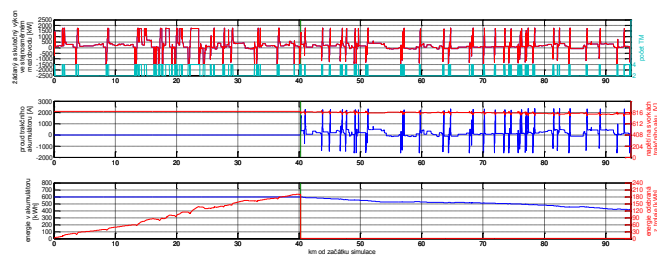


Fig. 1. Příklady výsledků simulačních výpočtů

Z obr. 1 je zejména zřejmý nárůst hodnoty odebrané energie z troleje při jízdě na elektrifikovaném úseku trati, kde se zároveň nabíjí akumulátor a pokles energie v akumulátoru při jízdě po neelektrifikovaném úseku.

traťový km		jméno zastávky	příjezd	odjezd
0	I	H.Brod	11:0	11:12
3.76	I	Mírovka	11:6	11:6
8.707	I	Šlapanov	11:10.8	11:12
13.57	I	Kamenná	11:15.6	11:16.2
17.306	I	Dobronín	11:19.2	11:21
19.949	I	Střítež	11:22.2	11:22.8
22.246	I	J.Bosch	11:25.2	11:25.2
25.605	I	Jihlava	11:28.2	11:29.4
27.702	I	Jihlava m.	11:31.8	11:33
29.007	I	St.Hory	11:34.2	11:34.2
33.206	I	Rantířov	11:39	11:40.2
36.577	I	Dvorce	11:43.2	11:43.2
40.236	I	Kostelec	11:47.4	11:49.2
40.91	I	Kostelec M.	11:48.6	11:48.6
43.752	I	Salavice	11:52.8	11:52.8
45.003	I	Jezdovice	11:55.2	11:55.2
47.642	I	Trest	11:59.4	11:60
49.084	I	Trest m.	12:1.8	12:1.8
51.148	I	Hodice	12:5.4	12:5.4
56.848	I	Sedlejev	12:12.6	12:13.8
59.696	I	Mysliboř	12:16.8	12:16.8
63.539	I	Telč	12:22.2	12:23.4
64.57	I	Telč s.m.	12:24	12:24.6
68.162	I	Radkov	12:29.4	12:30
70.162	I	Slaviboř	12:32.4	12:33
71.942	I	V.Pěčín	12:35.4	12:35.4
73.493	I	M.Pěčín	12:37.8	12:38.4
76.038	I	Dačice	12:42.6	12:43.8
76.978	I	Dačice m.	12:44.4	12:44.4
81.474	I	Urbaneč	12:51.6	12:51.6
84.127	I	Peč.	12:55.8	12:55.8
86.897	I	D.Bolkov.	12:60	12:60
89.026	I	Mutišov	13:3	13:3
94.041	I	Slavonice	13:11.4	13:11.4

Fig. 2. Vypočtený jízdní řád při jízdě dvouzdrojového vozidla

Na obr. 2 je příklad vypočteného jízdního řádu.

Při posuzování provozních nákladů a jejich porovnání s vozidlem dieslovým srovnatelných parametrů vychází náklady na provoz elektrického vozidla přibližně poloviční. Přesná hodnota je pak závislá na charakteru trati. Do provozních nákladů elektrického vozidla byla započtena cena elektrické energie a cena za opotřebení akumulátorů, do

provozních nákladů dieselového vozidla byla započítávána cena nafty a cena na údržbu spalovacího motoru.

Provedené výzkumné práce prokázaly reálnou použitelnost dvouzdrojových vozidel při současných technologiích trakčních akumulátorů a pohonů při délce neelektrifikovaného úseku do přibližně 100 km. Vezmeme-li v úvahu délky traťových úseků, kde v ČR není ani v budoucnu plánovaná elektrifikace, je tato vzdálenost naprosto dostačující, je dostačující a i pro pokrytí výkonů na desítkách tras v ČR i při současném stavu elektrifikace. Zájem zahraničních výrobců o tyto technologie a nástup elektromobility v silniční dopravě avizují perspektivy těchto vozidel. Například rakouské dráhy počítají, i díky nasazení takovýchto vozidel, se zcela bezemisním provozem kolem roku 2035. Vzhledem k tomu, že v českém prostředí je rozšířen spíše negativní postoj k veškerým novým technologiím elektromobility, bude u nás nástup tohoto typu vozidel jistě znatelně pomalejší.

Další informace o dané problematice lze nalézt například v [5], [6].

III. VÝZKUM V OBLASTI TRAKČNÍCH AKUMULÁTORŮ

Akumulátorová baterie je klíčovým členem vozidel nezávislé elektrické trakce. Velice rychlý rozvoj technologií akumulátorového napájení na bázi článků Li, jejich složitá chemická nelineární struktura a velká poptávka po těchto technologiích jsou příčinou relativně obtížné dostupnosti přesných parametrů akumulátorových článků, které jsou nezbytné pro úspěšný návrh akumulátorového vozidla. Z toho důvodu je běžné, že uživatelé akumulátorových článků si sami řadu vlastností a parametrů proměřují sami. Na Univerzitě Pardubice byly zahájeny aktivity směřující k experimentálnímu zjišťování parametrů a vlastností akumulátorových článků a baterií jednak z důvodu zmapování této problematiky, nedostupné z firemních podkladů, a dále z důvodu co nejvěrohodnější parametrizace modelu akumulátorové baterie v rámci simulačního modelu dvouzdrojového vozidla. Tyto aktivity lze po technické stránce rozčlenit do dvou směrů: laboratorní testování bateriových článků a následná parametrizace jejich obvodového modelu a dále experimentální ověřování účinnosti nabíjení a vybíjení akumulátorové baterie v reálných podmínkách na experimentálním kolejovém vozidle, kterým Univerzita Pardubice disponuje.

Při laboratorních testech byly měřeny tři typy akumulátorových článků: článek LFP 40 Ah, výrobce Winston Battery, článek LFP 100 Ah, výrobce Sinopoly a článek NMC 25 Ah výrobce Kokam. Byla prováděna parametrizace obvodových modelů článků v závislosti na proudu článku, stavu nabití článku, teplotě článku (0°C, 25°C, 40°C, obr. 3) a režimu nabíjení/vybíjení.

Pro parametrizaci článků bylo nutné vybrat vhodný obvodový model. Byl uvažován jednak nejjednodušší model tvořený sériovou kombinací vnitřního zdroje napětí a vnitřního odporu a dále dynamický model 1. řádu podle obr. 4. Uvedený typ dynamického modelu byl zvolen jako kompromis mezi dostatečně reálným zohledněním dynamických vlastností článku a snadnou identifikací parametrů z průběhu přechodových charakteristik. Naměřené průběhy přechodových charakteristik byly v prostředí Matlab proloženy náhradní exponenciálou (obr. 5), jejíž parametry

pak jednoznačně korespondují s odpory a kapacitou v náhradním dynamickém obvodu.



Fig. 3. Pec pro měření článků při zvýšené teplotě s proměřovanými články (zleva 100 Ah, 25 Ah, 40 Ah)

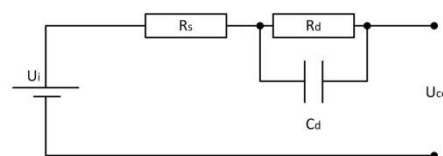


Fig. 4. Náhradní obvod akumulátorového článku 1. řádu

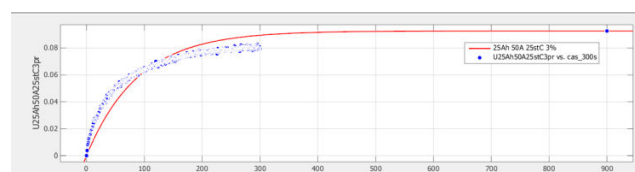


Fig. 5. Proložení přechodové charakteristiky článku exponenciálou

Parametry obvodového modelu článku byly měřeny společně s vybíjecí charakteristikou, tj. závislostí svorkového napětí článku na jeho stavu vybití DOD. V průběhu měření vybíjecí charakteristiky byly generovány skoky proudu, odezvy napětí reprezentovaly přechodové charakteristiky, z nichž byly identifikovány parametry náhradního schématu – obr. 6.

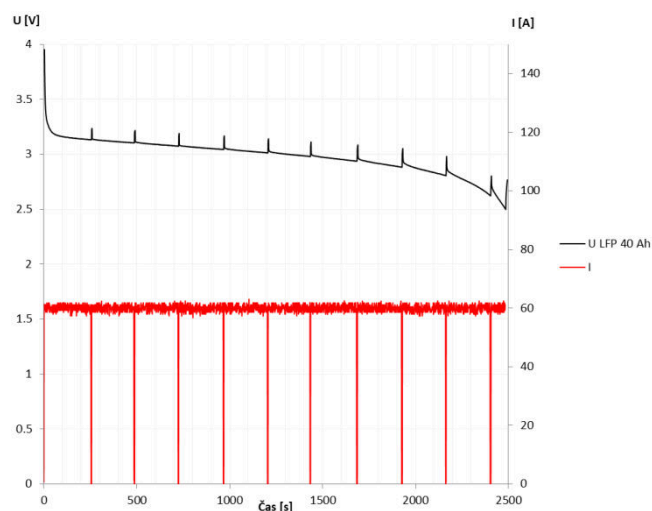


Fig. 6. Průběh napětí (černě) a proudu (červeně) při měření vybíjecí charakteristiky a parametrů článku LFP 40 Ah

Při všech měřeních v nabíjecím i vybíjecím režimu bylo získáno velké množství dat. Pro ilustraci jsou níže uvedeny dvě skupiny závislostí – vybíjecí charakteristiky při různých proudech (obr. 7) a závislosti sériové kapacity na DOD při nabíjení a vybíjení (obr.8).

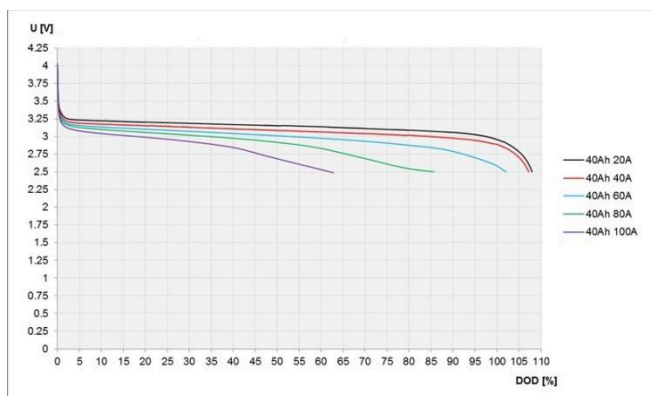


Fig. 7. Vybíjecí charakteristiky článku LFP 40 Ah pro 25°C

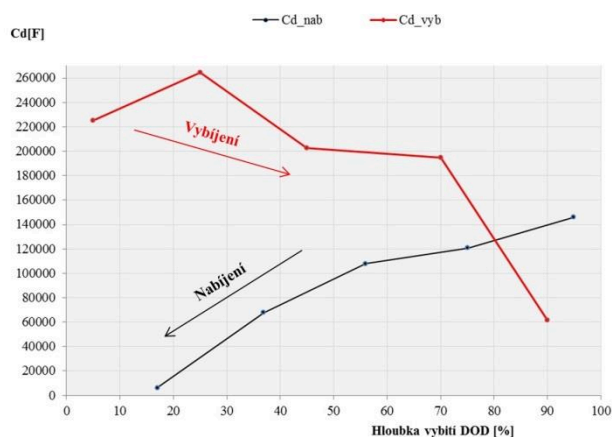


Fig. 8. Závislosti vnitřní kapacity článku na DOD při vybíjení a nabíjení u článku LFP 100 Ah při teplotě 25°C a proudu 100A

Po změření a vyhodnocení laboratorních dat bylo přikročeno ke zobecnění některých závěrů vyplývajících z měření. Výčet nejdůležitějších závěrů je uveden v následujících bodech:

- Parametry obvodových modelů jsou závislé na mnoha faktorech, zejména hloubce vybití DOD, proudu, teplotě, stáří a opotřebenosti článku, změna parametrů se běžně pohybuje v desítkách procent.
- Vlastnosti článků se mohou mírně lišit i u jednotlivých kusů téhož typu v identických podmínkách.
- Projevuje se nestálost parametrů v čase u jednoho kusu článku a to jak v delších časových obdobích, tak i v rámci jednotlivých vybíjecích cyklů.
- Články s nižší kapacitou vykazují vyšší odpory a menší dynamickou kapacitu.
- S rostoucí teplotou klesají vnitřní odpory, naopak výrazný nárůst o desítky až stovky procent se projevuje při teplotách okolo 0°C, kdy je vhodné baterii temperovat – platí pro vybíjení i nabíjení, s klesající teplotou se podstatně snižuje disponibilní kapacita článku.

- S rostoucí teplotou vzrůstá o desítky procent dynamická kapacita.
- Vlastnosti článků určuje především vnitřní teplota, vnější teplota nemusí být, zejména v tepelných přechodných jevech, rozhodující, bez extrémních nároků na čas při měřeních je prakticky nemožné zajistit vnitřní tepelnou stabilizaci. Komerčně dostupné články interními snímači teploty navíc nedisponují.
- Výrazně se odlišují parametry při vybíjení a nabíjení a to včetně trendů závislostí těchto parametrů, při nabíjení se uplatňují vyšší odpory.
- Principiální rozdíly charakterů závislostí parametrů u různých Li technologií článků jsou nevýrazné.
- V případě vybíjecích proudů pod hodnotou 1C lze při teplotě 25°C z některých článků využít energii vyšší, než jmenovitou (například u článku LFP 40Ah lze při vybíjecím proudu 0,2C získat kapacitu až 110% jmenovité hodnoty).

Další skupina měření proběhla na akumulátorových bateriích 25 Ah a 100 Ah (obr. 9), které byly navrženy a realizovány na Univerzitě Pardubice a následně byly instalovány do experimentálního kolejového vozidla Univerzity Pardubice.



Fig. 9. Dvě Li baterie na experimentálním vozidle Univerzity Pardubice (menší baterie – 26 článků NMC25 Ah, větší baterie – 28 využitých článků LFP 100 Ah)

Cílem měření bylo experimentálně ověřit účinnost nabíjení a vybíjení baterie v reálném provozu vozidla a to i v závislosti na vybíjecím výkonu. Změřené účinnosti byly následně porovnány s účinnostmi zjištěnými výpočtem pomocí parametrizovaných modelů článků. Pro určení účinností nabíjení a vybíjení v závislosti na charakteru jízdy a proudového odběru z baterie bylo provedeno 8 testovacích jízd s článkem 25 Ah. Při nejvyšším zatížení byla při jízdě těžké soupravy do stoupání baterie zatěžována velkou část jízdy proudem 4C. V závislosti na charakteru jízdy – vybíjení se celková účinnost nabíjení + vybíjení pohybovala v hodnotách 89% až 93%, přičemž s rostoucím vybíjecím proudem účinnost klesá. Rozdíly mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami účinností činily do 2%. Pro akumulátorovou baterii 100 Ah bylo provedeno jedno měření, výsledná účinnost měla hodnotu 91,7 %. Porovnání výpočetního modelu s měřeným průběhem je zřejmé i z obr. 10, na kterém je naměřený průběh napětí baterie v relaci se dvěma vypočtenými průběhy pro daný jízdní cyklus. Zřejmá

odchylka napětí je dána tím, že výpočet probíhal pro předpoklad baterie složené z totožných článků, ve skutečnosti se však parametry jednotlivých článků liší.

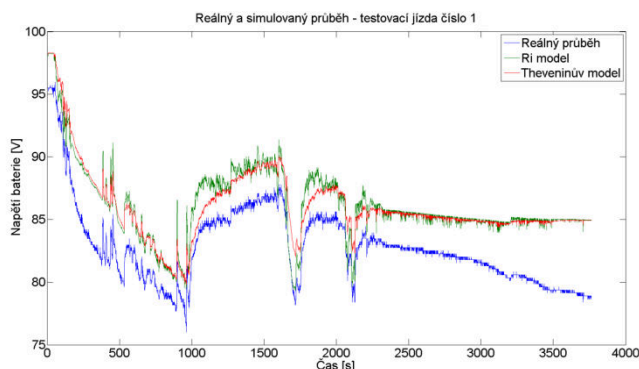


Fig. 10. Reálný a vypočtený průběh svorkového napětí baterie s články Kokam NMC 25Ah

Při srovnávání vlivu nabíjecího proudu na celkovou účinnost nabíjení a vybíjení byla testována jen baterie 25 Ah. Byly srovnávány dva případy – nabíjení ze síťové nabíječky proudem 25 A, tedy 1C a nabíjení z fotovoltaických panelů proudem v rozmezí 2 až 8 A v závislosti na okamžitém osvitu panelů. Vybíjení probíhalo jízdou s vybíjecím proudem až 4C. Při nabíjení proudem 25 A bylo dosaženo celkové účinnosti nabíjení + vybíjení 89,6%, při nabíjení z fotovoltaických panelů byla celková účinnost 91%, s rostoucím nabíjecím proudem tedy účinnost klesá.

Další informace o výsledcích výzkumu na akumulátorových člancích lze nalézt například v [7], [8].

IV. VÝZKUM ALTERNATIVNÍHO NAPÁJENÍ DRÁŽNÍCH VOZIDEL

V oblasti silniční elektromobility jsou v zahraničí připravována vozidla s pomocným fotovoltaickým napájením, která budou mít denní dojezd při čistě solárním napájení až 30 km za den. V rámci Centra kompetence drážních vozidel je na Univerzitě Pardubice rovněž studována možnost fotovoltaického napájení u drážních vozidel v podmínkách ČR a to ve třech úrovních:

1. Studium meteorologických statistik s daty o okamžitém výkonu dopadajícího slunečního záření v různých lokalitách ČR.
2. Experimentální výzkum fotovoltaického napájení drážních vozidel na experimentálním vozidle Univerzity Pardubice s cílem posouzení účinnosti dvou systémů fotovoltaických zdrojů a zhodnocením vlivů působících při jízdě vozidla (částečné zastínění trati, proměnný úhel dopadu slunečních paprsků, vliv proudění vzduchu při jízdě s efektem chlazení panelů).
3. Využití dat z experimentů a meteorologických dat pro simulační výpočty přínosů fotovoltaického napájení na reálných železničních vozidlech v různých regionech v ČR.

Studium možných přínosů fotovoltaického napájení je jedním z posledních zpracovávaných úkolů na Univerzitě Pardubice v rámci projektu. V současnosti se dokončují testy s fotovoltaickým napájením na experimentálním vozidle a začínají se zpracovávat meteorologická data jako příprava k simulačním výpočtům.

Zázemí pro experimenty je na Univerzitě Pardubice vytvořeno především ve formě experimentální soupravy, která se skládá z hnacího akumulátorového vozu a vlečeného vozu. Oby vozy jsou na střeše osazeny fotovoltaickými panely – obr. 11.



Fig. 11. Souprava hnacího (modrý) a vlečeného vozu osazených fotovoltaickými panely

Trakční baterie, jejichž systém byl prezentován v předchozí kapitole, mohou být nabíjeny z panelů přímo díky vhodně navržené relaci napětových hladin, nebo přes měnič, který nastavuje optimální pracovní bod panelů s maximálním výkonem. Specifikace použitých fotovoltaických panelů je následující:

Hnací vůz – 4x hybridní panel VBHN240SJ25 - Panasonic:

Výkon panelu:	240 Wp
Jmenovité napětí panelu:	52,4 V
Maximální proud panelu:	5,85 A
Zapojení panelů na vozidle:	sérioparalelně

Vlečný vůz – 4x SolarFrontier SF160F:

Výkon panelu:	160 Wp
Jmenovité napětí panelu:	110 V
Maximální proud panelu:	2,2 A
Zapojení panelů na vozidle:	paralelně

Schéma začlenění fotovoltaické výzbroje do obvodů vozidla je na obr. 12.

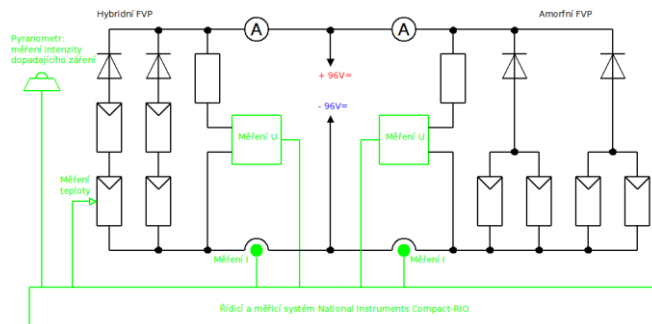


Fig. 12. Začlenění fotovoltaické výzbroje do obvodů vozidla

Na experimentální soupravě byla provedena řada testovacích jízd s měřením výkonu a energie panelů. Na obr 13 je uveden záznam velikosti aktuální elektrické energie získaný

z fotovoltaických panelů v relaci s odebranou energií z akumulátoru.

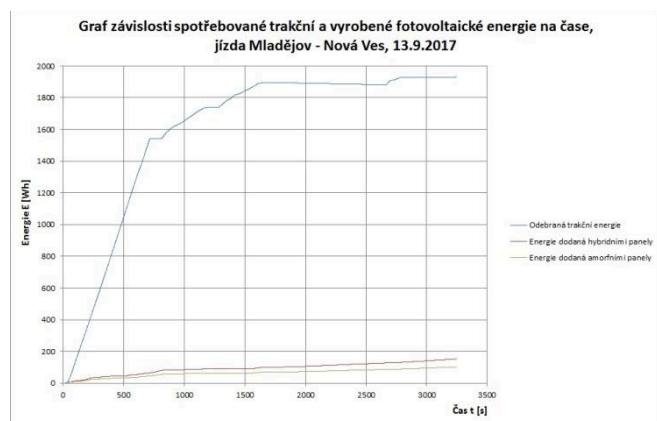


Fig. 13. Příklad výsledků měření energií při testovací jízdě

Z obrázku 13 je zřejmé, že dodávka energie amorfních panelů dosahuje přibližně dvou třetin dodávky energie hybridních panelů, tato nepříznivá vlastnost amorfních panelů je však kompenzována jejich výrazně nižší cenou oproti panelům hybridním (přibližně poloviční). Rozdíl mezi odebranou trakční energií při testovací jízdě a energií dodanou panely je zde relativně velký. To je však do velké míry dáno skutečností, že souprava ve sledované trase překonala převýšení přibližně 60 m, při zpětné jízdě potom dochází ke zlepšení celkové bilance rekuperačním brzděním. K dalším významným experimentálním výsledkům patří zejména tyto skutečnosti:

- Průměrně je v provozu dosahováno účinnosti fotovoltaických panelů v okolí 10% u panelů hybridních, u panelů amorfních o 2 až 3 % méně.
- Nebyly zaznamenány podstatné rozdíly v celkové účinnosti při použití/nepoužití měniče.
- Významný je přínos navýšení účinnosti panelů o jednotky % vlivem jízdy vozidla a jejich ochlazování proudícím vzduchem.
- Velmi dílčí zastínění panelů rapidně snižuje jejich účinnost.
- Průměrný trakční výkon hnacího vozidla je 1 kW, při dobrém osvětlení poskytují panely na tomto voze až 700 W (cca. 6 m² plochy). V tomto příznivém případě je přínos fotopanelů nezanedbatelný.

V dalších krocích budou zapracována meteorologická data a výsledky experimentů do zadání simulačního modelu jízdy reálného vozidla s pomocným fotovoltaickým napájením a na několika tratích budou vyhodnoceny efekty. Z hlediska reálného drážního vozidla, plochy jeho střechy a účinnosti fotovoltaických panelů je z předběžných výpočtů zřejmé, že bude reálné dosáhnout přínosů spíše jen pro příspěvek pro pomocné spotřeby v okolí 10% okamžitého příkonu pomocných spotřeb. Jedná se o užitečný příspěvek v případě bateriově napájených vozidel, s rostoucími cenami energie je navíc v tomto případě zřejmé, že je třeba k problému

přístupovat komplexně a hledat úspory i zefektivňováním hospodaření s energií na straně spotřeb.

Další informace k uvedené problematice jsou uvedeny například v [9].

V. ZÁVĚR

Centrum kompetence drážních vozidel byl rozsáhlý projekt řešící předmětnou problematiku ve velké šíři v oblasti mechanické i elektrické části vozidel. V posledním roce řešení se dokončují dílčí etapy. Na Katedře elektrotechniky, elektroniky a zabezpečovací techniky v dopravě na Univerzitě Pardubice se nyní dokončují práce v oblasti fotovoltaického napájení a v oblasti elektromechanických interakcí elektrických pohonů. Kontinuita výzkumu v prezentovaných oblastech je na katedře zajištěna jednak v rámci projektu MPO TRIO, který je zaměřen na realizaci hybridní posunovací lokomotivy z produkce CZ LOKO a.s. a dále v projektu TAČR Theta 2, kde práce navazují na problematiku dvouzdrojových vozidel s napájením z troleje a z akumulátorů. Celková strategie výzkumu na katedře pak směřuje k čistým dopravním technologiím s elektrickými pohony s podporou využívání obnovitelných zdrojů energie.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za podpory projektu TAČR č. 50680/56/TE520038 - Centrum kompetence drážních vozidel.

LITERATURA

- [1] J. Novák, Z. Mašek, L. Mlynařík: Simulační modely pro návrh pohonných řetězců kolejových vozidel, Sborník z XXXIII. Celostátní konference o elektrických pohonech, Česká elektrotechnická společnost, Plzeň 2013, ISBN 978-80-02-02457-6G.
- [2] Z. Mašek, J. Novák, O. Sadílek, T. Lelek.: Control of diesel-electric AC/DC traction drive of motor truck WŽB 10.1-M. In: Transactions on Electrical Engineering. Vol. 6 (2017), No. 3. K13114 FEE CTU in Prague, Technicka 1902/2, 166 27 Praha 6, Czech Republic: ERGO NOMEN, 2017. ISSN 1805-3386.
- [3] J. Novák, Z. Mašek, V. Lenoch.: Elektronické řízení hydrostatického přenosu výkonu na kolejovém vozidle – 1. a 2. část, Časopis ELEKTRO 2012, roč. 22, č. 12 a 2013, roč. 23, č. 1, vydavatelství FCC Public, ISSN 1210-0889
- [4] J. Novák, V. Lenoch., D. Čermák: Analýza elektromechanických interakcí elektrických strojů v mezních stavech, konference SEKEL 2018, TUKE, Košice, září 2018, ISBN 978 – 80 – 553 – 2740 - 2
- [5] J. Novák, L. Mlynařík, T. Lelek: Možnosti využití kolejových vozidel s kombinovaným napájením v regionální osobní dopravě, časopis ELEKTRO, č. 6/2015, roč. 25, vydavatelství FCC Public, ISSN 1210-0889R..
- [6] J. Novák: Výsledky simulačních výpočtů energetiky a ekonomiky provozu elektrických vozidel se zásobníky energie – sborník z konference DFJP/ČD Vozidla jako prvek konkurenceschopnosti ŽOD, Konstantinovy Lázně, říjen 2014Y.
- [7] J. Novák, O. Sadílek, P. Sýkora.: Lithiové trakční akumulátory pro elektromobilitu, část 1. a 2 Časopis ELEKTRO 2016, roč. 26, č. 11 a 12, vydavatel FCC Public, Praha 2016, ISSN 1210-0889
- [8] J. Novák, O. Sadílek: Parametrizace obvodových modelů lithiových akumulátorů pro elektromobilitu, časopis ELEKTRO, 2018, roč. 28, č. 7, vydavatel FCC Public, Praha 2018, ISSN 1210-0889
- [9] P. Sýkora, J. Novák: Research in Aarea of Photovoltaic Feeding of Light Railway Vehicle, 6th International scientific conference 2015 - University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty. 2015, ISBN 978-80-7395-924-1

Oteplovací zkouška tyristorových spínacích modulů pro centrální kompenzaci účinníku sníženým napětím

Warming test of thyristor switching modules for central power factor compensation with reduced voltage

Miroslav Novák, Pavel Ringelhán
Instit. of Mechatronics and Computer Engineering
Technical University of Liberec
 Liberec, The Czech Republic
 miroslav.novak@tul.cz, pavel.ringelhan@tul.cz

Abstrakt—Příspěvek popisuje ověřovací test aparatury pro oteplovací zkoušku tyristorových modulů určených pro spínání kondenzátorů při kompenzaci účinníku v sítích nn. Uvedeny jsou oscilogramy napětí a proudu při zkoušce sníženým napětím při jmenovitém proudu. Doloženy jsou také termo-snímky klíčových komponent. Testovat je možné pouze některé typy spínačů s vhodnou topologií řídicích obvodů.

Klíčová slova—kompenzace jalového výkonu, tyristorový spínací modul, zkouška jmenovitým proudem

Abstract—The paper contains a verification of the thyristor modules test. The modules are intended for power factor compensation in LV networks. The oscillograms of voltage and current in the reduced voltage test at rated current are given. There are also shown thermo camera images of key components. Only switching module types with appropriate gate controlled circuit topology can be tested.

Keywords—reactive power compensation, thyristor switching module, rated current test

I. ÚVOD

Tyristorové spínací moduly se používají pro rychlou regulaci účinníku v objektech, kde dochází k jeho častým a výrazným změnám. Slouží zde jako náhrada mechanických stykačů. Požadavek na počet sepnutí je velký a životnost standardních stykačů určených pro spínání kompenzačních kondenzátorů nevyhoví.

Topologií zapojení výkonového obvodu kompenzačních spínačů a kondenzátorů je několik a jsou přehledně uvedeny např. ve standardu [1]. Jde především o zapojení s kondenzátory do trojúhelníka, zapojení se spínači do uzemněné hvězdy a spínači v sérii s kondenzátory v trojúhelníku. Prezentovaný tester by měl být schopen testovat samostatné tyristorové spínací moduly určené pro všechny topologie. ČSN EN 60947-1 [3], kapitola 8.3.3.3.4 Oteplení hlavního obvodu, sice umožňuje měření jednofázovým zdrojem se zapojením všech spínačů do série. S tímto uspořádáním ale nejdou testovat topologie spínači zapojenými to hvězdy s vyvedeným středním připojením k nulovému vodiči. Z toho důvodu

musí navrhovaný aparatura obsahovat tři nezávislé zdroje se sériovými impedancemi definujícími zatěžovací proudy.

Myšlenkou testu je snížení mařeného výkonu snížením napětí při proudové zkoušce. Test odpovídá podmínkám ČSN EN 60947-4-3 [2], kapitola 9.3.3.3.4 Oteplení hlavního obvodu. Pro test je třeba napětí nutné ke spolehlivému otevření tyristorů. Bohužel velikost napětí závisí na konstrukci řízení hradla tyristorového modulu. Některé přístroje odebírají napájecí napětí pro budiče hradel tyristorů přímo z výkonového obvodu. Tyto typy nelze při sníženém napětí vůbec testovat.

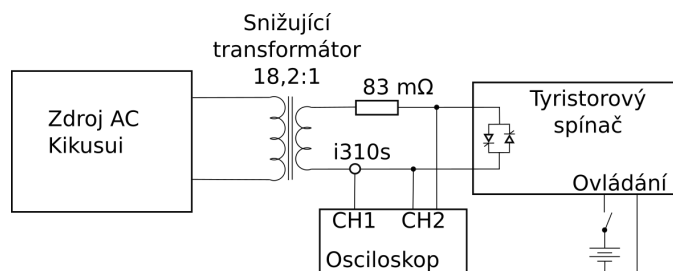
Tento příspěvek shrnuje úvodní ověřovací fázi testu. Pracoviště bylo sestaveno z dostupných komponent v naší laboratoři a není optimalizováno. Pro jednoduchost byly testovány pouze tyristory ve fázi L1. Ostatní výkonové vývody tyristorového modulu nebyly zapojeny. Test lze snadno rozšířit doplněním dalších dvou transformátorů a výkonových rezistorů o dvě fáze.

II. ZAPOJENÍ TESTU

Výkonový obvod je napájen ze sekundáru snižujícího transformátoru přes výkonový odporník, který snižuje velikost proudu při zachování dostatečného napětí potřebného pro zapálení tyristorů, viz obr. 1. Napětí v proudové dráze bylo řízeno programovatelným zdrojem Kikusui na primární straně transformátoru. Při příliš nízkém napětí na výkonových svorkách modulu nedojde vůbec k sepnutí tyristorů, protože napětí nestačí k aktivaci budičů a nasycení hradel hlavních tyristorů. Minimální napětí závisí na konstrukci tyristorového modulu. Pro modul Meandr bylo potřeba min 10 V rms.

Pracovní proud byl snížen sériovým zapojením odporníku 83 mΩ. Podařilo se dosáhnout jmenovitého proudu cca 50 A rms na tyristorech modulu při proudu 3,5 A na primární straně snižujícího transformátoru.

Během testu bylo měřeno napětí na tyristoru běžnou osciloskopickou sondou 10:1 a proud pomocí proudové sondy Fluke i310s.



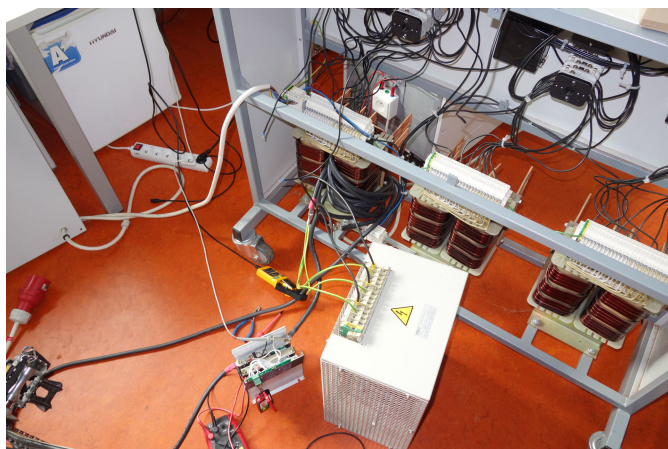
Obr. 1. Zapojení testovacího obvodu.

A. Použité přístroje

- Rozvaděč SVED Liberec — 3f zdroj 3 kA, upraveno rozpojením sekundáru transformátoru L1 a navinutím 10 závitů AWG 2 ($33 \text{ mm}^2 = 100 \text{ A}$) a rozpojení primáru s přivedením napětí na odbočku 400 V
- Napájecí zdroj KIKUSUI PCR2000LA
- Odporník ESHF R-0,5-3 ($0,125/3-0,25/3-0,5/3 \text{ Ohm}$, $3 \times 400 \text{ W}$)
- Osciloskop Siglent SDS 1102X+
- Proudová sonda Fluke i310s - rozsah 300 A
- Baterie $2 \times 9 \text{ V}$ v sérii pro ovládací vstup tyri. modulu
- Termokamera Fluke TiS

B. Testované kusy

- KMB KATKA 80 ST 400
- Meandr MTK-25-50-480



Obr. 2. Zapojení sekundáru transformátoru, tyristorového modulu a odporníku.

III. VÝSLEDKY

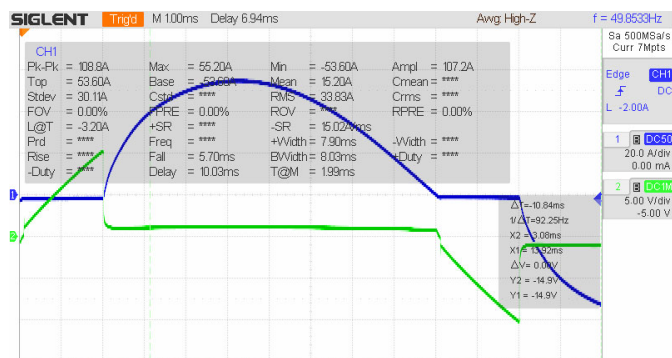
Nastavením napětí zdroje KIKUSUI ($>240 \text{ V}$ připojeného na 400 V odbočku primáru) se podařilo získat dostatečné napětí pro funkci tyristorového modulu. Tyristory spínají každou půlvlnu při cca 10 V , viz obr. 4. Úbytek napětí při jmenovitém proudu na tyristoru je $\Delta U_F = 0,7\text{--}1,1 \text{ V}$. Tyristor se spíná každou půl-periodu znovu. Výstupní proud je zkreslený z důvodu chybějící části vlny.

Napětí naprázdno při testu bylo 11 V rms , tj. amplituda $15,4 \text{ V}$, viz obr. 5. Oři testu lze ověřit spínací a hlavně vypínací proces a zhodnotit kvalitu snubberu. Vypínací proces



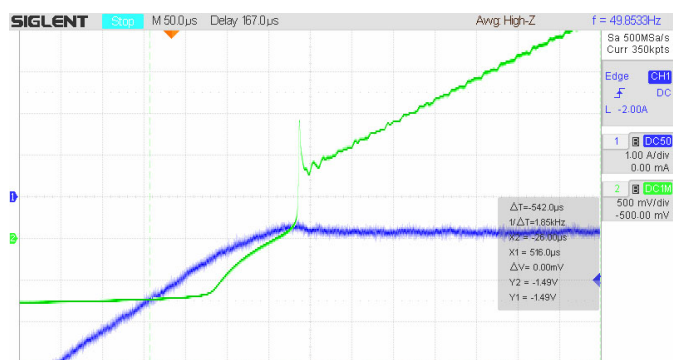
Obr. 3. Připojení zdroje Kikusui k primáru.

je zachycen na obr. 6, kde je patrný okamžik uzavření tyristoru s drobným přeskmitem napětí doprovázeným tlumenou oscilací parazitních prvků obvodu.

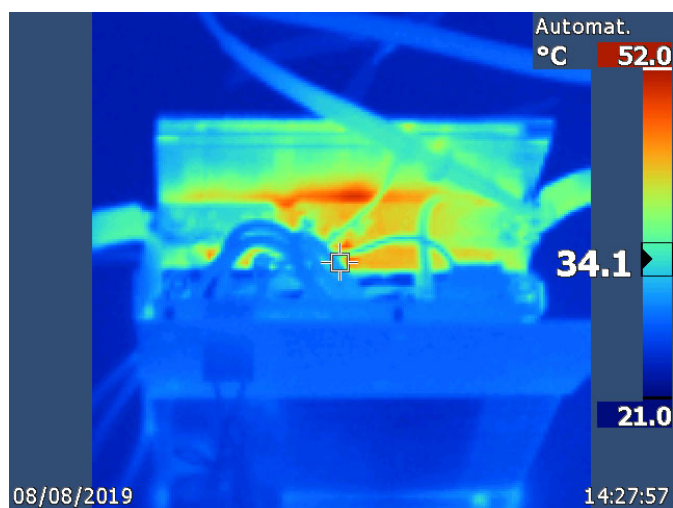
Obr. 4. Oscilogram úbytku napětí a procházejícího proudu na tyristoru — $48,7 \text{ A rms}$.

Obr. 5. Napětí při deaktivovaném tyri. modulu = naprázdno na tyristoru.

Měření oteplení není relevantní při zatížení pouze jedné fáze. Zde je demonstrováno oteplení jednotlivých částí aparatury. Na obr. 7 je záběr na odkrytovaný tyristorový modul. Nejvyšší teplotu má vlastní tyristor — cca $52 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Vyhodnocení snímku je komplikované, protože chladič a proudové dráhy od svorek modulu ke svorkám tyristoru jsou z hliníku, který má nízkou emisivitu. Uvedené snímky z termokamery nejsou kompenzovány na rozdíly emisivity.



Obr. 6. Detail vypínání tyristoru při jmenovité zátěži.



Obr. 7. Termosnímek tyristorového modulu s odklopeným krytem — hliník má nízkou emisivitu, tělo tyristoru a odrazy mají cca 52 °C.

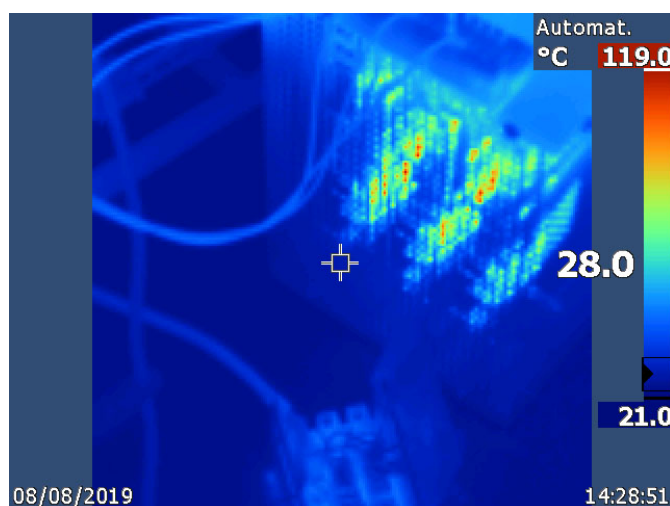
Na obr. 8 je uveden snímek odporníku. Odporník je vinutý na keramických nosičích s perforovaným krytem pro pasivní chlazení. Odporník má zapojenu pouze část odporové dráhy mezi odbočkou 0,25–0,5 Ω. Nejvyšší teplotu na snímku má odporový vodič rezistoru — cca 120 °C. Pokud budeme chtít využít maximálního výkonu snižujících transformátorů bude nutné zatěžovací rezistor navrhnout na vyšší výkon a snížit jeho ohmickou hodnotu na polovinu. Optimální bude provedení s paralelními větvemi, které bude možno odpínat a tím řídit zátěž. Ve spodní části snímku je opět zobrazen tyristorový modul.

Na obr. 9 je zobrazen snižující transformátor s provizorním sekundárním vinutím a propojkami na tři sekce zatěžovacího rezistoru. Teplota sekundárního vinutí nedosahuje ani 40 °C. Vyšší teplotu má propojka provedená vodičem 3 × 4 mm².

Ze termosnímků plyne, že je nutný větší výkon zatěžovacího rezistoru a pečlivé provedení kabeláže.

IV. ZÁVĚR

Oteplovací zkouška při sníženém napětí má hlavní problém v neschopnosti některých budičů hradel sepnout tyristory, viz výše KMB Katka 80. Pokud k sepnutí dojde je test efektivní a na provizorní aparatuře realizovatelný. S použitím retrofitovaných transformátorů je možné dosáhnout proudu 100–120 A, což odpovídá tyristorovým modulům pro spínání



Obr. 8. Odporník je přetížený — bude nutný návrh nového rezistoru.

Obr. 9. Provizorní sekundární vinutí AWG2 = 33,6 mm² je v s nezatíženým oteplením, spojka 2 × 4 mm² je zatížená více.

do 110 kvar při napětí sítě 400 V. Nevýhodou je maření energie do rezistorů (2,5 kW pro testovací proud 50 A).

Pokud bude tester realizován jako retrofit, bude nutné provést nové sekundární transformátorů, navrhnout a objednat zatěžovací rezistory. Dále přepojit primární obvod a ovládání a celé zařízení doplnit měřicí aparaturou. Při realizaci je nutné se držet norem [2], [3]. Zejména požadavků na průřezy a minimální déklu 1 m propojovacích kabelů, teplotu místnosti pro testy a umístění měřicích snímačů teploty.

Zkouška testuje oteplení modulu a jeho částí, teplotní bilanci modulu a případné řízení ventilátoru. Lze změřit úbytek na tyristorech při nominální zátěži a ověřit spínací napětí zapalovacího obvodu hradel tyristorů.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za podpory projektu TAČR TH03010462 Systém pro rychlou kompenzaci jalového výkonu s prvky pro snadnou integraci do provozů s vysokou mírou automatizace.

LITERATURA

- [1] IEEE Standard Definitions and Requirements for Thyristor AC Power Controllers," in IEEE Std 428-1981 , vol., no., pp.1-28, 13 Oct. 1981 doi: 10.1109/IEEESTD.1981.81455 URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=29026&isnumber=1184>.
- [2] ČSN EN 60947-4-3 ed.2: Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí – Část 4-3: Stykače a spouštěče motorů – Polovodičové regulátory a stykače na střídavý proud pro nemotorické zátěže. URL: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/Detail.aspx?k=96371>.
- [3] ČSN EN 60947-1 ed.4: Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí - Část 1: Všeobecná ustanovení. URL: <https://csnonlinefirmy.agentura-cas.cz/Detail.aspx?k=80621>.

Elektromagnetická kompatibilita kardiostimulační techniky, vymezení základních směrů výzkumu

Electromagnetic Compatibility of Cardiac Stimulation Technology, Determination of Research Orientation

Aleš Richter

Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a
mezioborových studií,
Liberec, Česká republika
ales.richter@tul.cz

Jan Morava

Technická univerzita v Liberci
Fakulta mechatroniky, informatiky a
mezioborových studií,
Liberec, Česká republika
jan.morava@tul.cz

Pavel Kučera

Kardiovaskulární centrum
Krajská nemocnice Liberec, a.s.,
Liberec, Česká republika

Abstrakt — Příspěvek se zabývá interdisciplinárním tématem elektromagnetické kompatibility kardiostimulační techniky využívané u pacientů se srdeční patologií. Představujeme funkční principy kardiostimulátorů a popisujeme jejich interakci se zdrojem vnějšího rušení. Jsou diskutovány mechanismy rušivých signálů a možnosti minimalizace jejich následků. Cílem je uvedení do problematiky, vymezení základní předpokladů a teoretický rozbor.

Klíčová slova — *elektromagnetická kompatibilita, EMC, elektromagnetická interference, EMI, implantabilní zařízení, kardiologie, kardiostimulátory, elektrofyzilogie,*

Abstract — This article deals with interdisciplinary topic of the electromagnetic compatibility of cardiac stimulation devices that are used in patients with cardiac pathology. We present the functional principles of cardiac pacemakers and describe its interaction with the source of external interference. We discuss the mechanisms of disturbance signals and methods to minimize its consequences. The aim is the introduction to this issue, the theoretical analysis and, finally also the definition of terms.

Keywords — *electromagnetic compatibility, EMC, electromagnetic interference, EMI, implantable device, cardiology, cardiac stimulation, electrophysiology,*

I. ÚVOD

Příspěvek je zaměřena na specifické interdisciplinární téma elektromagnetické kompatibility kardiostimulační techniky, které kombinuje oblast elektronických systémů a fyziologie člověka. Naše pozornost směřuje na lékařské elektronické systémy, které se implantují kardiologickým pacientům v případě poruchy převodního srdečního systému nebo z preventivních důvodů možného vzniku závažné srdeční (komorové) arytmie v důsledku jiné patologie. Pacient s implantovaným stimulátorem je každý den vystavován různým zdrojům elektromagnetických polí,

jejichž interakce s implantovaným systémem může mít za následek chybné chování přístroje a tím i přímo ohrozit zdraví pacienta. Rizika působení rušení na kardiostimulační systém nelze vždy snadno předpovídat, přičemž závisí na různých faktorech. I přes pokročilejší technologie zahrnujících řadu softwarových i hardwarových mechanismů lze tyto rizika výrazně minimalizovat, nikoliv však zcela odstranit.

Kardiostimulační funkce všech těchto zařízení je založená na stejném principu. Přístroj snímá a detekuje síňový nebo komorový elektrický signál z pólů intrakardiálních elektrod umístěných v příslušných srdečních dutinách. Stimulace buněk myokardu elektrickým impulzem předdefinovaných parametrů je odezva přístroje na snímanou srdeční aktivitu. Detekce signálů, které nejsou fyziologickou aktivitou srdce, může ovlivnit správnou funkci přístroje a přímo ohrozit pacienta. Nastat může inhibice kardiostimulace a následná asystolie u dependentních pacientů. V případě defibrilátoru je zde riziko neadekvátního defibrilačního výboje. Přítomnost EMI může také iniciovat změny v programaci přístroje.

II. TEORETICKÝ ROZBOR A PRAXE

A. Principy kardiostimulace

U kardiostimulačních zařízení se při implantaci systému nebo při periodických kontrolách prostřednictvím programmeru kontrolují elektrické parametry zařízení (jednotlivých elektrod), díky kterým jsme schopni vyhodnotit správnou fixaci elektrody při implantaci či celkově správnou funkci systému. Sledovanými parametry elektrod jsou stimulační práh, impedance a senzitivita (sensing), případně slew rate. Stimulační práh vyjadřuje minimální množství energie potřebné k depolarizaci tkáně. Elektrický impuls je charakterizován amplitudou signálu nejčastěji programovanou ve voltech [V], případně

miliampérech [mA], a šířkou pulsu v milisekundách [ms]. Ideální parametry stimulačního prahu při implantaci systému jsou do $\frac{1}{2}$ napětí baterie stimulatoru (tedy asi do 1,5 V) při šířce pulsu 0,4 ms. Doručený proud se bude lišit podle impedance elektrody a přechodového odporu mezi tkání a elektrodou (viz Ohm z.) Impedance stimulační elektrody, která je dána kombinací odporů vodiče a odporu tkáně, by se měla pohybovat v hodnotách $200 \Omega - 2000 \Omega$. Termín *Sensing* je schopnost přístroje detekovat vlastní srdeční rytmus. Hodnota je měřena v jednotkách až desítkách milivoltů [mV] a podle toho, ve které srdeční dutině vlastní aktivitu snímáme, se bavíme o P-vlnách (akční potenciál sinusového uzlu, primárního pacemakeru, v síni) nebo R-vlnách (šíření depolarizace v komoře). Nastavení hodnoty senzitivity na daném kanále pak znamená hranici pro nejmenší amplitudu signálu, kterou je přístroj schopen detekovat. Termín *Slew rate* se vztahuje k *sensingu* a dává nám informaci o kvalitě snímání. Vyjadřuje výchylku amplitudy snímaného signálu v čase [V/s], zpravidla se pohybuje v hodnotách $>1.0 \text{ V/s}$ v komoře a $>0,5 \text{ V/s}$ v síni. [1, 4]

B. Kardiostimulační technika

Kardiostimulační implantabilní zařízení se skládají ze samotného stimulatoru (generátoru pulsů) umístěného v oblasti klíční kosti pacienta, který obsahuje baterii a řídicí obvody, a daný počet elektrod (1-3) vedoucích od stimulatoru podklíčkovou žílou do srdečního oddílu a většinou aktivně fixovaných do endokardu srdeční dutiny.

Systémy lze rozdělit z několika hledisek. Všechny přístroje jsou schopny monitorovat srdeční akci a v případě kardiostimulátorů adekvátně kompenzovat vlastní rytmus pacienta elektrickým impulsem. Přístroje se schopností kardioverze a defibrilace jsou pokročilejší systémy, které kromě klasické kardiostimulace monitorují srdeční činnost a v případě výskytu nebezpečné komorové arytmie jsou schopny ji pomocí sekvence elektrických impulsů nebo elektrickým výbojem o energii až 40J potlačit. Přístroje se liší počtem elektrod a jejich umístěním v topologii srdce na jednodutinové, dvoudutinové a na přístroje pro resynchronizační terapii.

U jednodutinových přístrojů je zavedena jedna elektroda do pravé komory srdce, u dvoudutinového přístroje je navíc elektroda v pravé síni, u přístrojů pro resynchronizační léčbu je třetí zavedená ke stimulaci myokardu levé komory. [2, 3]

Konfiguraci kardiostimulátoru rozlišujeme podle umístění anody na unipolární a bipolární. Katoda je vždy umístěna na distálním konci elektrody (tip), přičemž při unipolární směřuje vektor k přístroji (can) jako anodě a v bipolární konfiguraci k blízkému pólu (ring) umístěného proximálněji také na vodiči. Na daném kanálu lze zvolit danou konfiguraci jednotlivě pro stimulaci i sensing. Vzhledem ke vzdálenosti pólů a vektoru snímání u obou případů lze odvodit, že bipolární konfigurace je rezistentnější proti rušení způsobeného myopotenciály nebo EMI než v nastavení unipolárním. [5]

Důležitou vlastností všech stimulačních zařízení je jejich programovatelnost. *Interogace* zařízení a jejich programace je možná prostřednictvím speciálního počítače (programmeru) po přiložení programovací hlavice do

blízkosti přístroje. Novější přístroje a většina defibrilátorů umožňují komunikaci bezdrátově telemetricky v daném frekvenčním pásmu (402 - 405 MHz). Kromě klinické diagnostiky či měření elektrických parametrů nám umožňuje programmer také nastavovat stimulační režim přístroje.

Režim popisuje tzv. NBG kód, který se skládá z pěti znaků. První znak uvádí stimulovanou dutinu (A = atrium, V = ventricle, D = dual, O = no pacing), druhý znak snímanou dutinu (A, V, D, O), třetí pozice vyjadřuje odezvu na snímanou událost, čtvrtá programovatelnost a pátá anti-tachyarytmickou funkci. [2, 4]



Fig. 1. Rozdíl v umístění katody a anody v bipolární a unipolární konfiguraci kardiostimulátoru.

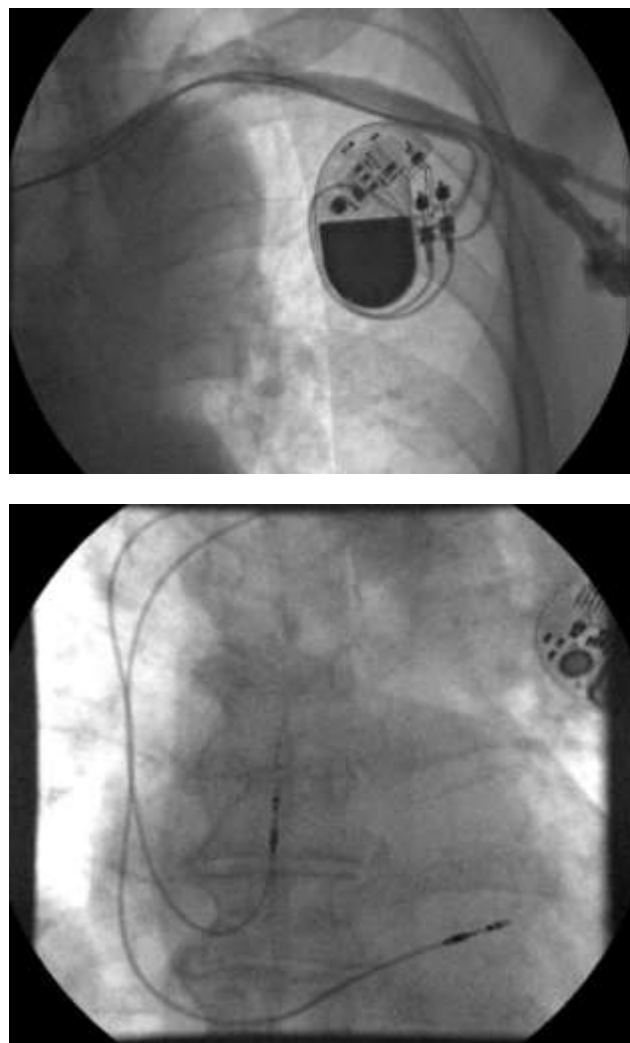


Fig. 2. RTG zobrazení implantovaného dvoudutinového kardiostimulátoru s dvěma aktivně fixovanými elektrodami.

C. Elektromagnetická interference s kardiostimulátory

Pacient s daným typem elektrofyziologické léčby je každý den vystavován různým zdrojům elektromagnetických polí, jejichž interakce s implantovaným systémem může být zařízením detekována jako vlastní srdeční akce. Může docházet k indukování lokálních proudů na elektrodách, zvýšení proudové hustoty v tkáni okolo zařízení a zahřívání implantátu. To může mít fatální důsledky typu inhibice kardiostimulace či neadekvátního výboje u defibrilátoru, ale i poškození elektroniky přístroje nebo změnu programace.

Množství vyzařeného EMI absorbovaného lidským tělem lze vyjádřit měrným absorbovaným výkonem s jednotkou watt na kilogram [W/kg].

EMI lze rozdělit do tří kategorií: elektromagnetická pole v celém svém frekvenčním spektru, ionizující záření, ale i akustické vlnění. V našem případě se zaměřujeme především na nízkofrekvenční elektromagnetické pole.

Nebezpečí vlivu rušení na pacienta pak závisí na řadě faktorů jako vzdálenosti od zdroje (intenzita klesá se čtvercem vzdálenosti), době expozice či poloze systému vzhledem ke zdroji, ale i konfiguraci a programaci samotného kardiostimulátoru. Nezanedbatelný vliv mají i tělesné dispozice pacienta.

Při působení silného EMI (např. elektrokauterizace, externí defibrilace) může dojít k resetu zařízení do továrního nastavení (power-on reset), jelikož může být přerušena komunikace mezi mikroprocesorem a pamětí s programací přístroje. U defibrilátoru dochází při power-on resetu k deaktivaci terapií. [1, 4]

V každodenním životě se můžeme setkat s řadou různých zdrojů elektromagnetického rušení od radiokomunikačních zařízení, detektorů kovů, spínaných měničů výkonové elektroniky, mikro výboje pod vedením vysokého napětí, ale především silné pole střídavé 50Hz soustavy.

Ve zdravotnictví pak k interakci s rušením dochází například při vyšetření magnetickou rezonancí nebo při působení fotonů ionizujícího záření u onkologických pacientů v průběhu ozařování, ale také u elektrokauterizace, radiofrekvenční ablace nebo kapslové endoskopie. V těchto případech je vyžadována dočasná reprogramace zařízení do vhodného stimulačního režimu. [2, 4]

Nebezpečí působení EMI nelze vždy predikovat. Z komponent či mechanismů aplikovaných proti EMI lze jmenovat: omezení amplitudy pomocí Zenerovy diody, stínění, bipolární sensing, filtrace signálů (pásmová propust - bandpass filtr), feedthrough filtr kondenzátoru, jazyčkový spínač (reed switch) nebo měření vnějších polí pomocí Hallova senzoru. I navzdory řadě mechanismů jednotlivých výrobců kardiostimulační techniky (HW i SW) lze rizika EMI jen minimalizovat, nikoliv však úplně odstranit.

Prostředky k minimalizování rizika spojeného s EMI jsou zahrnuta i v evropských směrniciích o zdravotnických prostředcích. [1]

D. Elektromagnetická interference kardiostimulátoru, klinický příklad

V následujícím textu představíme jeden příklad, se kterým se poměrně často setkáváme v běžném životě u pacientů s kardiostimulátorem. Obdobné klinické epizody falešné

detekce FiS jsou poměrně běžné. Analyzujeme jednu anonymizovanou epizodu zachycenou prostřednictvím systému dálkové monitorace. V tomto případě se jedná o přístroj typu biventrikulární kardiovertr-defibrilátor. Algoritmy pro detekci FiS a aktivaci AMS jsou však napříč jednotlivými přístroji principiálně dost podobné.

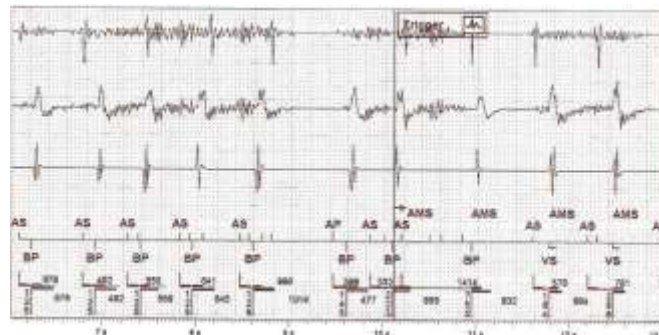


Fig. 3: Intrakardiální záznam falešné detekce na near-field kanále (1.řádek síňový, 3. komorový) a far-field RV Coil - Can kanále (2.řádek). N.B.: Marker AS = Atrial Sense, BP = Biventricular Pace, VS = Ventricular Sense, AMS = Automatic Mode Switching.

Zachycený interferenční signál, susp. EMI, se amplitudou pohybuje okolo hladiny senzitivity na RA kanále. Patrný je také na diskriminačním far-field kanále. Na bipolárním komorovém vektoru snímání signál není patrný z důvodu odlišného zesílení signálu, což souvisí s citlivostí RA elektrody. Rychlá akce evokuje rychlou biventrikulární stimulaci v komorách a následně dochází k aktivaci režimu AMS a změně stimulačního programu na DDIR 70/min. Hranice detekce síňové tachykardie je u daného přístroje nastavena na 180/min.

III. DISKUZE

Na tomto jednoduchém příkladu jsme demonstrovali snadno vyvolatelnou chybnou odezvu přístroje na základě falešné detekce elektromagnetické interference na síňovém kanále jako fibrilace síní. Reálný příklad z klinické praxe jsme ověřili pomocí simulace EMI a sledovali jsme změnu programace přístroje do MS režimu. Tento experiment pomohl k analýze obdobné klinické epizody ze systému domácí monitorace. Změna programace kardiostimulátoru aktivací AMS režimu není pro pacienta nijak závažná, závisí na přednastavení přístroje a pacientem nemusí být ani jakkoliv vnímána. Na daných ukázkách demonstrujeme, že přístroje jsou náchylné k chybné interpretaci elektrického signálu a že EMI může mít vliv na správné chování přístroje. Mohou však nastat jiné závažnější komplikace vlivem působení EMI, které již mohou mít přímý dopad na pacienta. K tomu dochází i z toho důvodu, že přístroj nehlídá tvar snímaného signálu (komplexu), podle kterého by bylo možné rušení a arytmiu odlišit, ale monitoruje především amplitudu a frekvenci kmitů, případně vazebné intervaly a setrvalost. Riziko falešné detekce je tak reálné a následky a způsob ovlivnění přístroje pak závisí na mnoha dalších faktorech.

IV. ZÁVĚR

Tento příspěvek představuje dlouhodobější výzkum prováděný ve spolupráci naší Fakulty mechatroniky, informatiky a mezioborových studií s Krajskou nemocnicí Liberec, a.s.

Záměrem dlouhodobého výzkumu je popisovat a experimentálně ověřovat limity přístrojů a rizika spojená s jejich interakcí se zdrojem nízkofrekvenčního elektromagnetického rušení. Velmi důležité je objasnit mechanismy vzniku a tím předejít negativní interakci s EMI.

V tomto článku jsme se snažili ukázat základní fyzikální principy kardiostimulace z nelékařského, technického hlediska a její možné ovlivnění vyvolané působením externích elektromagnetických polí různého charakteru v závislosti na zvoleném typu srdeční terapie.

Tyto rizika bývají často zlehčována a přehlížena. Je třeba myslet na to, že jako každé elektronické zařízení mají i tyto lékařské systémy své limity.

Moderní kardiostimulační systémy se snaží využívat softwarové, hardwarové prostředky k minimalizaci rizik spojených s EMI. Přesto je potřeba danému tématu věnovat více pozornosti. Zejména s tím souvisí i následné zlepšení edukace pacientů.

Aktuálnost této problematiky výrazně roste s rychle vzrůstajícím počtem kardiologických pacientů vyžadujících daný typ elektrofyziologické léčby. Současně s naším výzkumem musíme také více informovat lékaře ale i pacienty, tak aby byli schopni na tyto nečekané události správně reagovat, protože nejsme schopni předpovědět a vysvětlit všechny jevy, které by mohly nastat.

PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena z projektu Studentské grantové soutěže (SGS) na Technické univerzitě v Liberci v roce 2019.

Příspěvek vznikl ve spolupráci Technické univerzity v Liberci, Ústavu mechatroniky a technické informatiky, a Krajské nemocnice Liberec, Kardiovaskulárního centra.

LITERATURA

- [1] NAPP, Andreas, Dominik STUNDER, Melanie MAYTIN, Thomas KRAUS, Nikolaus MARX a Sarah DRIESSEN. *Are patients with cardiac implants protected against electromagnetic interference in daily life and occupational environment?*. *European Heart Journal* [online]. 2015, **36**(28), 1798-1804 [cit. 2019-06-02]. DOI: 10.1093/eurheartj/ehv135. ISSN 0195-668X. Dostupné z: <https://academic.oup.com/eurheartj/article-lookup/doi/10.1093/eurheartj/ehv135>.
- [2] ELLENBOGEN, KENNETH A., BRUCE L., WILKOFF and G. NEAL KAY.: *Clinical cardiac pacing, defibrillation, and resynchronization therapy*. Philadelphia, PA: Elsevier, 2017. ISBN 978-0-323-37804-8.
- [3] GERCEK, Cihan, Djilali KOURTICHE, Mustapha NADI, Isabelle MAGNE, Pierre SCHMITT a Martine SOUQUES. *Computation of Pacemakers Immunity to 50 Hz Electric Field: Induced Voltages 10 Times Greater in Unipolar Than in Bipolar Detection Mode*. *Bioengineering* [online]. 2017, **4**(4) [cit. 2019-06-02]. DOI: 10.3390/bioengineering4010019. ISSN 2306-5354. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/2306-5354/4/1/19>.
- [4] MORAVA, Jan, Aleš RICHTER a Jakub EICHLER. *Detection of Electromagnetic Interference on Electrodes of Cardiac Implantable Electronic Devices. Measurement 2019*. Bratislava: Slovak academy of sciences, 2019, s. 182-185. ISBN 978-80-972629-2-1.
- [5] MORAVA, J., RICHTER, A. a KUČERA, P. *Electromagnetic compatibility of cardiostimulation technology in relation to human body - the introductory study*. IFBME Proceedings 0. vyd. Springer Singapore, 2019. S. 755-760. ISBN: 9789811090349, ISSN: 1680-1737.

Název	Sborník příspěvků SKAKUII 2019 SEKEL 2019
Autoři	kolektiv autorů
Vydavatel	Technická univerzita v Liberci
Určeno pro	účastníky mezinárodních setkání, SKAKUII 2019 a SEKEL 2019
čj. RE 40/19	schváleno rektorátem TU v Liberci
Číslo publikace	55-040-19

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

ISBN 978-80-7494-491-8