

Spotreba energie robota v závislosti od rýchlosti a miesta pohybu v pracovnom priestore

Measurement of the robot energy consumption depending on the speed and location of the movement in the robot workspace

Peter Bober

peter.bober@tuke.sk

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice, Slovenská Republika

Abstrakt— Tendencia na znižovanie spotreby energie sa prejavuje vo všetkých oblastiach inžinierskej práce. Článok prezentuje meranie spotreby energie ramena robota v závislosti od rýchlosti a miesta pohybu v pracovnom priestore. Merania ukazujú, že pre daného robota je spotreba energie nízka ak vykoná pohyb rýchlo a potom prejde do režimu s úsporou energie. Ďalej je veľmi dôležité správne umiestnenie robota vzhľadom na pracovný pohyb. Zníženie spotreby od 35% do 52% ukazuje, že je v ďalšom výskume potrebné zaoberať sa modelovaním a optimalizáciou spotreby energie robota.

Kľúčové slová— meranie, robot, spotreba energie

Abstract— Tendency to reduce energy consumption is reflected in all areas of engineering work. The article presents the measurement of the robot energy consumption depending on the speed and location of the movement in the robot workspace. Measurement shows that the low power consumption is achieved when the robot quickly completes the movement and then goes into a power saving mode. Furthermore, it is very important to properly position the robot with respect to the work movement. A reduction in energy consumption from 35% to 52% indicates that further research is needed in modelling and optimization of the energy consumption of the robot.

Keywords— energy consumption, measurement, robot

I. ÚVOD

Znižovanie spotreby energie výrobných technológií je samozrejماً požiadavka dnešnej doby. Dôvody sú ako ekonomické, kde v prostredí medzinárodnej konkurencie je potrebné znižovať náklady, tak aj ekologické, kde udržateľný spôsob života závisí od schopnosti planéty znášať ekologickú záťaž vytváranú človekom. Ďalšie dôvody sú praktické úžitkové vlastnosti zariadení napájaných z primárnych batérií alebo akumulátorov, kde je potrebné dosiahnuť čo najdlhšiu dobu prevádzky na jedno nabitie. Snaha o znižovanie spotreby energie je vyjadrená aj v dokumente Európskej únie „Európa 2020“ [1], ktorý stanovil cieľ znížiť do roku 2020 spotrebu energie o 20%.

Automatizované systémy a zvlášť roboty, manipulatory a mobilné roboty nie sú v tomto smere výnimkou. V modernej automobilovej výrobe sa podľa [2] až polovica elektrickej energie spotrebuje na pohyb robotov pričom celkovo v priemysle je to okolo 8% podľa odkazu na prácu Engelmana v [3]. Problematika znižovania spotreby výrobných liniek s robotmi je pomerne široká a multidisciplinárna. Iné možnosti

na znižovania spotreby sú pri vývoji samotného robota, iné pri projektovaní výrobných liniek a iné pri samotnej prevádzke.

Vo všeobecnosti je možné znižovať spotrebu energie výrobných liniek s robotmi nasledovne:

1. Znižovanie spotreby energie a zvyšovanie účinnosti komponentov robota (motor, výkonový menič, prevodovka).
2. Vytvorenie podmienok na rekuperáciu energie v rámci pohybu robota.
3. Plánovanie optimálnych trajektórií vzhľadom na spotrebu energie.
4. Optimalizácia plánovania pohybov - odstránenie zbytočných pohybov, prechod do Stand-by režimu so zníženou spotrebou.
5. Znižovanie hmotnosti pohyblivých častí a nástrojov.
6. Výber vhodných robotov s nízkou spotrebou pri projektovaní výrobných liniek.
7. Koordinácia pohybov robotov na linke s cieľom zníženia špičkovej spotreby, rekuperácia energie medzi robotmi.

Uvedené možnosti zníženia spotreby energie sú ilustrované nasledovnými publikovanými prácami. Firma Daimler Ag si v roku 2010 patentovala myšlienku rekuperácie energie medzi jednotlivými robotmi [4]. Pohony robotov sú napojené na spoločnú jednosmernú zbernicu a energia pri brzdení jedného pohonu sa využíva pri rozbehu iného. Autori v [5] rozvíjajú túto koncepciu a pridávajú do jednosmerného medzi obvodu kondenzátorovú batériu, ktorá je schopná ukladať rekuperovanú energiu v čase, keď sa nemôže využiť na pohyb iného robota. Týmto spôsobom sa zníži špičkový odber z napájacej siete. Iný prístup k rekuperácii energie je použitý v [6]. Tu autori využívajú mechanickú pružinu na ukladanie energie pri cyklických pohyboch ramena robota. V experimentoch pre konkrétnu úlohu dosiahli až 65% úsporu energie. Takýto prístup je však vysoko špecifický len pre konkrétny pracovný pohyb robota. V [7] sa uvádza, že obmedzením maximálnej hodnoty zrýchlenia sa dá dosiahnuť až 30% redukcia spotreby. Obmedzením zrýchlenia klesajú prúdové špičky a znižuje sa mechanické namáhanie, čo má vplyv na predĺženie životnosti robota. Podobné odporúčanie na vyhladenie pohybu a zníženie rýchlosti je aj v [3]. Autori však upozorňujú, že príliš pomalý pohyb môže vyžadovať viac energie. Ďalší prístup, ktorý títo autori

odporúčajú, je dôsledné využívanie stand-by režimu jednotlivých komponentov robota, čo podľa odhadu môže viesť až k 30% úspore energie.

Jednou zo základných úloh v robotike je plánovanie trajektórie pohybu ramena robota. Obsluha zadá východiskovú polohu, cieľovú polohu a body, cez ktorá má koncový efektor robota prejsť. Naprogramované algoritmy riadiaceho systému vypočítajú dráhu, rýchlosť a zrýchlenie v každom bode. Vzhľadom na to, že je možné dostať sa z jedného bodu do druhého viacerými cestami, musia byť špecifikované ďalšie kritériá na výber vhodnej trajektórie. Jedným z kritérií je práve spotreba energie. Priemyselná prax sa spolieha na algoritmy, ktoré sú dodávané výrobcami robotov. V bežnej prevádzke nebývajú dostupné teoretické vedomosti, technické zariadenia a softvér na optimalizáciu trajektórií. Autori v [8] porovnávali spotrebu energie a rýchlosť pohybu pre trajektórie generované originálnym softvérom od výrobcu a špeciálnymi optimalizačnými algoritmi. Došli k záveru, že spotrebu energie je možné znížiť o 4% a zrýchliť pohyb o 3% pre väčšinu generovaných trajektórií.

Plánovanie trajektórie z pohľadu spotreby energie vyžaduje vytvorenie analytického alebo numerického modelu spotreby energie. Analytický model spotreby energie, ktorý sa skladá z kinematického modelu robota, dynamického modelu robota a z modelu elektrických pohonov je publikovaný v [9]. Analytické rovnice pre spotrebu energie tvoria východisko modelu v Matlab-Simulink. Presnosť modelu je dokladovaná porovnaním výsledkov zo simulácie a z merania. Obdobný postup je zvolený v [3]. Aj tu je model spotreby energie odvodený z modelov jednotlivých častí robota pričom sa vychádza z výpočtu strát. Spotreba riadiaceho systému nie je v tomto prípade zarátaná do celkovej spotreby robota.

Modelovanie spotreby či už vytváraním modelov jednotlivých komponentov alebo modelovaním strát v pohonoch jednotlivých kĺbov je pomerne náročné na matematický aparát a následnú identifikáciu parametrov modelu. Za úvahu stojí preskúmať možnosti vytvorenia modelu spotreby len na základe experimentálnych meraní.

Cieľom tohto článku je predbežná analýza vzťahu medzi pohybom robota s spotrebou energie. Nasledujúce práce by sa mali zaoberať vytvorením modelu spotreby robota, ktorý je použiteľný pre návrh robotického pracoviska, či sa už jedná o výber vhodného umiestnenia robota vzhľadom na vykonávaný pracovný pohyb alebo pre plánovanie energeticky úsporných trajektórií.

II. NÁVRH MERANIA A VYHODNOTENIA SPOTREBY

Kvalitatívnym cieľom merania je určiť, akým spôsobom je spotreba energie ovplyvnená rýchlosťou pohybu a miestom pohybu v pracovnom priestore robota. Kvantitatívne výsledky majú priniesť číselný odhad spotreby energie. Na tento účel bolo navrhnutý systém merania a vyhodnotenia spotreby a naplánované experimenty.

Úlohou systém merania a vyhodnotenia spotreby je meranie spotreby energie robota pre určený pracovný cyklus. Systém merania energiu na základe merania vstupného napätia U a celkového prúdu I ako výkonovej časti servopohonov tak aj samotného riadiaceho systému. Spotrebovaná energia E za čas T sa vypočíta ako integrál

$$E(T) = \int_0^T U(t)I(t)dt \quad (1)$$

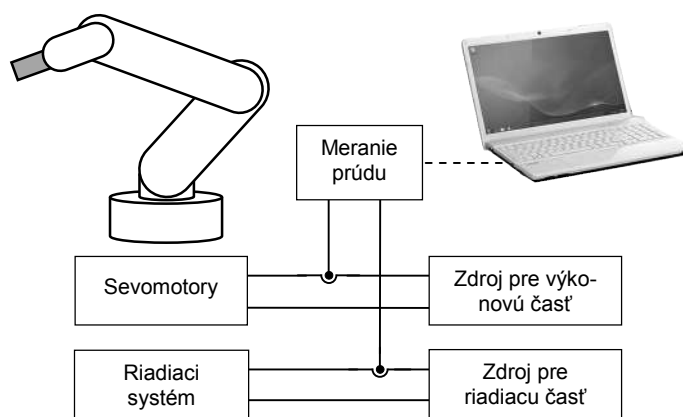
Pri praktickej realizácii je napájacie napätie konštantné a výpočet integrálu bude sumácia n intervalov merania. Zjednodušene predpokladáme, že prúd I_k v k -tom intervale šírky Δt je konštantný:

$$E(T) = U \sum_{k=1}^n I_k \Delta t; \quad n = \frac{T}{\Delta t} \quad (2)$$

Celková energia $E_C(T)$ sa vypočíta ako súčet energie spotrebovanej v riadiacom systéme $E_R(T)$ a energie výkonovej časti servopohonov $E_V(T)$:

$$E_C(T) = E_V(T) + E_R(T) \quad (3)$$

Schéma zapojenia systému merania je na Obr. 1. Servomotory aj riadiaci systém sú napájané zo stabilizovaných zdrojov jednosmerného napätia. Preto sa meral len okamžitý prúd pre servomotory a prúd pre riadiaci systém. Údaje sa zaznamenávali na osobnom počítači. Robota bol ovládaný riadiacim systémom robota.



Obr. 1. Bloková schéma systému merania spotreby energie.

III. EXPERIMENTÁLNE MERANIA

Celkove boli urobené tri experimenty, ktorých cieľom bolo zistiť, akým spôsobom rýchlosť pohybu a umiestnenie pohybu v pracovnom priestore robota ovplyvňuje spotrebu elektrickej energie. V Tabuľke I je pre každý experiment uvedený cieľ, opis a parameter, ktorý sa menil.

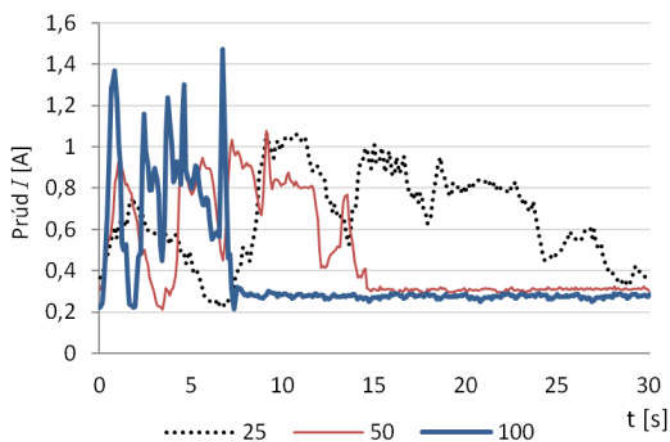
TABUĽKA I OPIS EXPERIMENTOV

Experiment	Cieľ:	Opis:	Parameter:
Experiment 1	Zistiť, akým spôsobom zmena rýchlosti pohybu ovplyvňuje spotrebu energie pracovného cyklu.	Pracovný cyklus robota v trvaní 30s, začiatok aj návrat je v rovnakej východiskovej polohe.	Rýchlosť pohybu určená indexom s hodnotami 25, 50 a 100.
	Zistiť vplyv východiskovej polohy na spotrebu energie pracovného cyklu.	Pracovný cyklus robota v trvaní 30s, index rýchlosti je 100, začiatok aj návrat je v zvolenej východiskovej polohe.	Východisková poloha číslo 1, 2 a „Stand-by“.
	Zistiť vplyv polohy pohybu v pracovnom priestore robota na spotrebu energie.	Vykonanie série rovnakých pohybov v rôznych miestach pracovného priestoru robota.	Poloha v pracovnom priestore robota číslo 1 až 4. Hmotnosť manipulovanej časti: bez bremena, s bremenom 86g.

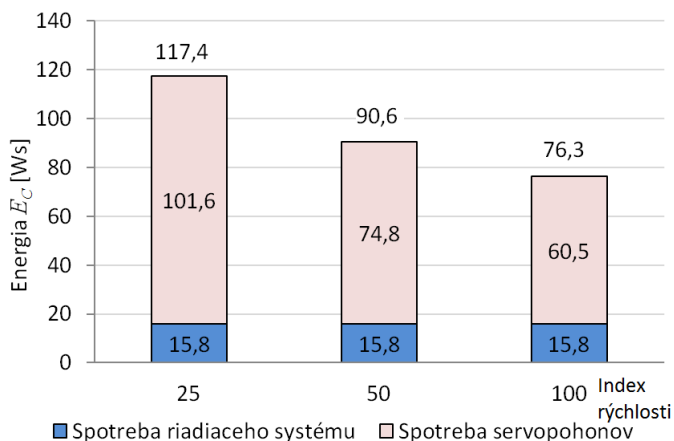
IV. ZHODNOTENIE MERANÍ A DISKUSIA

Experimentálne merania boli vykonané na malom robote AL5D od firmy Lynxmotion. Na Obr. 2 je priebeh prúdu zo zdroja pre výkonovú časť pre pracovný cyklus robota, ktorý trvá 30s a je vykonávaný troma rôznymi rýchlosťami (Experiment 1). Rýchlosti sú označené indexom 25, 50 a 100, pričom 100 znamená maximálnu rýchlosť. Robot sa po skončení pohybu vráti do východiskovej polohy. Spotrebovaná energia vypočítaná podľa rovníc (2) a (3) je na Obr. 3.

Z merania je zrejmé, že rýchlejší pohyb vyžaduje väčší okamžitý prúd, avšak rameno robota prejde skôr do východiskovej polohy, v ktorej je odber výrazne nižší, ako pri pomalom pohybe. Preto sa v tomto prípade najmenej energie spotrebuje pri najrýchlejšom pohybe. Tento poznatok je trochu iný, ako v [3], kde autori neodporúčajú použiť vysoké rýchlosti. Spotreba riadiaceho systému nezávisí na rýchlosti pohybu robota. Rozdiel v spotrebe energie medzi najrýchlejším a najpomalším pohybom je 35%.



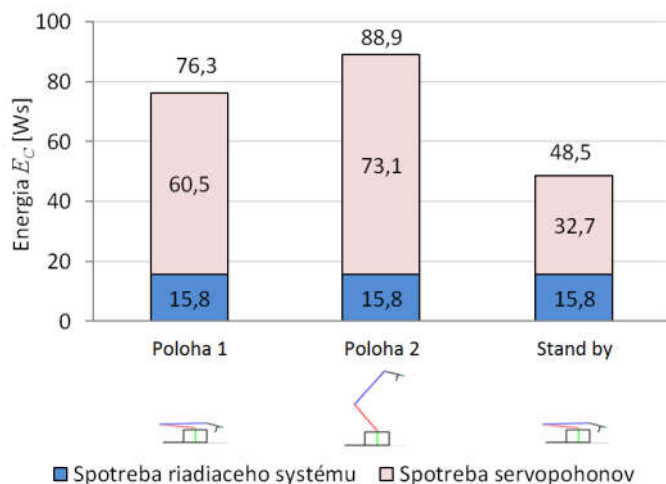
Obr. 2. Priebeh okamžitého prúdu servopohonov pre rôzne rýchlosti.



Obr. 3. Spotreba energie pre rôzne rýchlosti pohybu.

Výsledky Experimentu 2 sú znázornené v grafe na Obr. 4. V tomto prípade sa v pracovnom cykle rameno pohybovalo rýchlosťou 100 a menila sa východisková poloha. V polohe 1 je rameno zložené na podstavu robota. V polohe 2 je rameno vztýčené a poloha „Stand-by“ je rovnaká, ako poloha 1 s tým rozdielom, že servopohony sú uvedené do „stand-by“ režimu bez momentu a odber prúdu je jedna desatina z pôvodnej hodnoty.

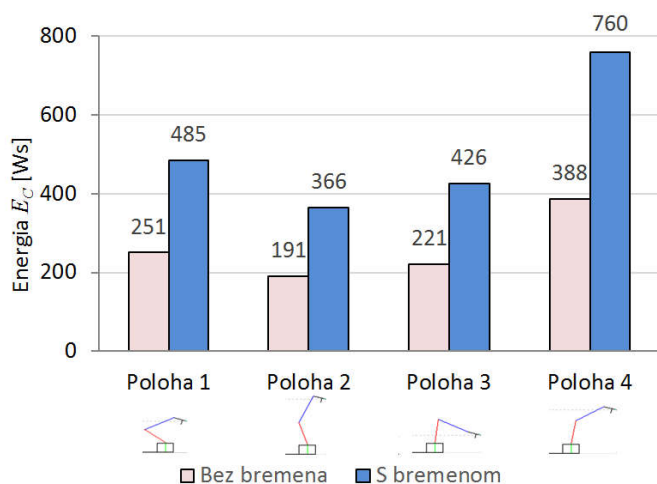
Zo zaznamenaných výsledkov je zrejmé, že celková spotreba energie na jeden pracovný cyklus je ovplyvnená východiskovou polohou, v ktorej rameno robota zotrúva medzi jednotlivými pracovnými cyklami. Udržanie ramena v rôznych polohách vyžaduje rôzne množstvo energie. Použitý robot nemal mechanické brzdy, ktoré by umožnili vypnúť servopohony v ľubovoľnej pozícii. Preto najmenšia spotreba energie je v polohe, kde je možné servopohony vypnúť. Maximálny rozdiel v spotrebe energie pre jednotlivé polohy je 45%.



Obr. 4. Spotreba energie pre rôzne východiskové polohy.

Výsledky Experimentu 3 sú znázornené na Obr. 5. V tomto prípade sa rovnaká postupnosť pohybov vykonávala v rôznych miestach pracovného priestoru robota. Poloha v pracovnom priestore je znázornená v spodnej časti grafu.

Z merania je zrejmé, že umiestnenie pohybu v pracovnom priestore robota výrazne ovplyvní spotrebu energie. Niektoré pozície ramena spotrebujú výrazne väčšie množstvo energie, ako iné. Rozdiel medzi najväčšou a najmenšou spotrebou energie je pre pohyb bez bremena 51% a s bremenom 52%.



Obr. 5. Spotreba energie série rovnakých pohybov v rôznych miestach pracovného priestoru robota.

V. ZÁVER

V článku sú prezentované merania spotreby energie pri pohybe ramena robota v závislosti od rýchlosti pohybu a miesta, kde sa tento pohyb vykonáva. Na základe merania experimentov je zrejmé, že správna voľba rýchlosti pohybu a miesta v pracovnom priestore robota výrazne ovplyvňujú spotrebu pre ten istý pohyb. Nameraný rozdiel v spotrebe energie na vykonanie rovnakej úlohy bol pre jednotlivé prípady od 35% do 52%. Preto je možné formulovať nasledovné tvrdenie a odporúčania:

- Vzťah medzi spotrebou a pohybom je závislý na konkrétnej kinematike robota a konštrukcii servopohonov.
- Pri použití robotovi je vhodné použiť rýchly pohyb a následné zotrvanie v „Stand-by“ režime so zníženou spotrebou.
- Robota je potrebné vhodne umiestniť vzhľadom k priestoru, kde má byť vykonávaný pohyb, aby spotreba energie bola najnižšia.

Na praktické uplatnenie predchádzajúcich odporúčaní je potrebné disponovať modelom spotreby energie robota a vhodným softvérom, ktorý zabezpečí optimalizáciu v umiestnení robota, plánovaní jeho trajektórie a riadení „Stand-by“ režimu práce. To, že súčasné riadiace systémy dodávané s robotmi neposkytujú všetky prostriedky na energeticky optimálne nasadenie robotov ilustruje literatúra [8]. Preto ešte ostáva priestor na ďalší výskum v oblasti modelovania a optimalizácie spotreby energie robota.

POĎAKOVANIE

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

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] European Commission, „Energy 2020“, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2011.
- [2] S. Schröder, „Optimized Movements: Ballet of the Bots“, 1.10.2014. [Online]. Dostupné: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/efficient-energy-use-optimized-movements-of-industry-robots.html>. [Cit. 12.6.2017].
- [3] Paryanto, M. Brossog, M. Bornschlegl a J. Franke, „Reducing the energy consumption of industrial robots in manufacturing systems“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ročník 78, str. 1315-1328, 2015.
- [4] M. Lebrecht a T. Schneider, Robotersystem, 2010, *Patent DE201010033596*, dostupné: <https://www.google.com/patents/DE201010033596A1?cl=de>
- [5] I. Rankis, D. Meike a A. Senfelds, „Utilization of Regeneration Energy in Industrial Robots System“, *Power and Electrical Engineering*, ročník 31, str. 95-100, 2013.
- [6] M. Plooi, M. Wisse and H. Vallery, „Reducing the energy consumption of robots using the Bi-directional Clutched Parallel Elastic Actuator“, *Transactions on Robotics*, ročník 32, číslo 6, str. 1512-1523, 2016.
- [7] B. Lennartson, „Reducing energy consumption through optimised robot systems“, *ADJACENT Open Access*, 22.9.2016. dostupné <http://www.adjacentopenaccess.org/farming-environment-marine-sustainable-news/reducing-energy-consumption-robot-systems/28061/>. [Cit. 12.6.2017]
- [8] K. Paes, W. Dewulf, K.V. Elst, K. Kellens and P. Slaets, „Energy efficient trajectories for an industrial ABB robot“, *Procedia CIRP*, ročník 15, str. 105-110, 2014.
- [9] A. Othman, K. Belda a P. Burget, „Physical modelling of energy consumption of industrial articulated robots“, 15th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Busan, 2015.



Peter Bober získal PhD. na Elektrotechnickej fakulte Technickej univerzity v Košiciach v odbore Elektrická trakcia a elektrické pohony v roku 1993 (téma: Číslicové riadenie pohonu s asynchrónnym motorom). Pracuje na Katedre elektrotechniky a mechatniky Fakulty elektrotechniky a informatiky Technickej univerzity v Košiciach ako odborný asistent.

Jeho oblasť odborného záujmu je výskum v oblasti modelovania, riadenia a optimalizácie elektrických pohonov.