

Štandardné metódy riadenia DC-DC meničov

Control Methods of DC-DC converters

Martin Lešo¹, Jaroslava Žilková², Marek Pástor³

¹martin.leso@tuke.sk, ²jaroslava.zilkova@tuke.sk, ³marek.pastor@tuke.sk,

^{1,2,3}Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, Košice, Slovenská Republika

Abstrakt— Spínané DC-DC meniče patria medzi najčastejšie používané výkonové elektronické zariadenia, ktoré sú používané v priemysle aj v komerčných zariadeniach. Riadenie výstupného napätia, prípadne prúdu týchto meničov predstavuje zložitý alebo neľahký problém vzhľadom k ich nelineárnosti. Z toho dôvodu bolo vyvinutých mnoho rôznych riadiacich stratégií meničov a tento príspevok predstavuje prehľad najpoužívanejších riadiacich metód DC-DC meničov, ktorých funkčnosť a spoľahlivosť je overená praxou. V rámci opisu jednotlivých metód je kladený dôraz na princíp ich činnosti a na hlavné prednosti a nedostatky jednotlivých metód.

Kľúčové slová—DC-DC meniče, prúdové riadenie, napät'ové riadenie, hysterézne riadenie

Abstract— The switched dc-dc converters are commonly used in different electronics devices, which are included in both industrial and commercial devices. The control of output voltage or output current is complex task, due to their inherent nonlinearity. There were developed many different control strategies of switching dc-dc converters and in this paper is a review of most common control strategies, which functionality and reliability are verified by practical applications. The paper describes a principle of operation and a major advantages and disadvantages of proposed control strategies.

Keywords— DC-DC converters, voltage mode control, current mode control, hysteric control

I. ÚVOD

Jednosmerné (DC-DC) meniče v súčasnosti slúžia na napájanie rôznych elektrických spotrebičov a sú široko zastúpené vo väčšine elektrických zariadení z dôvodu ich vysokej účinnosti a flexibilne nastaviteľného výstupného napätia. Požiadavky kladené pre navrhované meniče sú rôzne, pričom v mnohých prípadoch je potrebná presná regulácia výstupného napätia alebo prúdu. Z toho dôvodu bolo vytvorených niekoľko metód analógového alebo digitálneho riadenia, ktoré boli úspešne aplikované v priemysle [1].

Všeobecne za vstup DC-DC meničov môžeme považovať neregulovaný zdroj jednosmerného napätia a za výstup konštantné výstupné jednosmerné napätie, prípadne prúd. Pre dosiahnutie konštantného výstupného napätia bolo navrhnutých viacero druhov napät'ových regulátorov s rozličnými riadiacimi štruktúrami s cieľom zaistiť stabilitu a efektivitu DC-DC meničov. V súčasnosti s vývojom v oblasti výkonovej elektroniky vzniká požiadavka na presné a spoľahlivé riadenie DC-DC meničov. To vedie k potrebe zavádzania pokročilejších a spoľahlivejších riadiacich štruktúr [1-4].

Hlavným problémom pri návrhu riadiacej štruktúry je nájdanie optimálnej riadiacej metódy, ktorá by zabezpečovala a zohľadňovala nasledujúcu problematiku:

- nelinearitu obvodov spôsobenú použitím nelineárnych prvkov v meniči,
- stabilitu obvodu pri prechodových stavoch, zmenách vstupného napätia a záťaže meniča,
- stabilitu meniča v širokom rozsahu riadenia,
- možnosť použitia pre meniče vyššieho rádu,
- redukovanie nákladov pre implementáciu riadiacej štruktúry,
- redukcii elektromagnetického rušenia (EMI).

Doteraz bolo navrhnutých mnoho rôznych štruktúr DC-DC meničov [1], pričom všetky tieto meniče majú špecifické zapojenia, aby čo najlepšie riešili rozličné úlohy. Z toho dôvodu nie je možné určenie všeobecne optimálnej metódy riadenia pre všetky typy DC-DC meničov [1-4].

II. KONVENČNÉ METÓDY RIADENIA VÝSTUPNÉHO NAPÄTIA MENIČOV

Konvenčne sa pre riadenie DC-DC meničov používajú napät'ové, prúdové metódy riadenia a hysterézne riadenie, ktorých funkčnosť je overená praxou a ich riadiaca štruktúra je častokrát integrovaná v rámci integrovaných obvodov [5,6].

Napät'ové riadenie meničov bolo prvou aplikovanou metódou v priemysle z dôvodu jednoduchého návrhu a implementácie daného riadenia (obsahuje iba jednu spätnoväzobnú slučku). Hlavnou výhodou tohto typu riadenia je pevná spínacia frekvencia, nulová odchýlka požadovaného napätia a vysoká odolnosť riadiacej štruktúry voči rušeniam. Naopak medzi nevýhody napät'ového riadenia meničov patrí pomalá odozva regulačnej štruktúry na zmenu záťaže, vstupného napätia meniča, pričom daná metóda neposkytuje ochranu proti preťaženiu meniča a vyznačuje sa znížením stability obvodu pri paralelnom spojení viacerých meničov [2,7].

Pre riešenie nedostatkov napät'ového princípu riadenia meničov boli odvodené prúdové metódy riadenia výstupného napätia meničov, ktorých riadiaca štruktúra je tvorená dvoma spätno-väzobnými slučkami (napät'ová a prúdová). K hlavným výhodám prúdového riadenia DC-DC meničov patrí ich schopnosť okamžite reagovať na zmeny vstupného napätia z dôvodu, že šírko-impulzová modulácia (ŠIM) je generovaná na základe prúdu induktora meniča, čím je odstránené oneskorenie

odozvy riadenia pri zmenách vstupného napätia na meniči ako aj závislosť zosilnenia kompenzácie od pomeru vstupného a výstupného napätia meniča. Vzhľadom na to, že výstupom regulátora je výstupný prúd, minimalizuje sa efekt induktora filtra, čím je možné zredukovať počet pólov regulátora na jeden (v niektorých prípadoch). Tým je umožnené jednoduchšie kompenzovať filter meniča. Ďalšou prednosťou tohto typu riadenia je ochrana meniča pred preťažením, čo umožňuje zdieľať záťaž v prípade, ak je zapojených viacero meničov paralelne [7]].

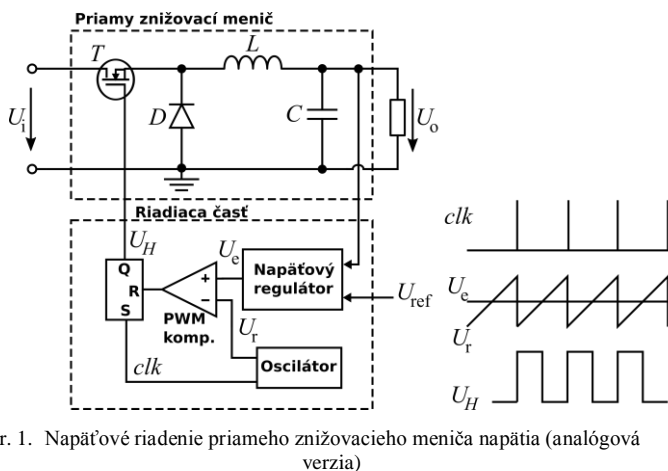
Z princípu činnosti prúdového riadenia vyplýva mnoho významných výhod použitia danej regulačnej štruktúry, ale zároveň táto technológia prichádza s vlastným unikátnymi problémami, ktoré musia byť uvážené pri navrhovaní danej štruktúry:

- regulačná štruktúra obsahuje dve spätné väzby, čím sa komplikuje analýza obvodu,
- riadiaca slučka začína byť nestabilná pri striede nad 50%,
- možný prenos šumu do riadiacej slučky pri rezonančných dejoch v meniči [7].

Hysterézný typ riadenia je používaný predovšetkým pre aplikácie, kde sa vyskytuje výrazná náhla zmena záťaže, pričom typickým prípadom takýchto aplikácií je napájanie procesorov (CPU) alebo programovateľných hradlových polí (FPGA) [9]. Tento typ riadenia pracuje na princípe udržania výstupného napätia v definovanom hysteréznom pásme okolo hodnoty požadovaného referenčného napätia. Takáto metóda regulácie sa vyznačuje veľmi rýchlou odozvou na zmenu vstupného napätia a výstupného napätia meniča z dôvodu, že neobsahuje žiadne pomalé spätné väzby ako iné metódy a neobsahuje žiadne obmedzenia pre nastavenie striedy, čím umožňuje riadenie striedy v plnom rozsahu od 0 po 1. Výborné dynamické vlastnosti riadenia umožňujú zmenšenie veľkosti výstupných filtrov, čo vedie k zníženiu celkovej ceny DC-DC meničov. Medzi hlavné nevýhody takéhoto riadenia môžeme zahrnúť nestálosť spínacej frekvencie meniča, čím môžu vznikať náhodné impulzy, ktoré spôsobujú nepríjemné pískanie a nepredvídateľnú EMI meniča [5].

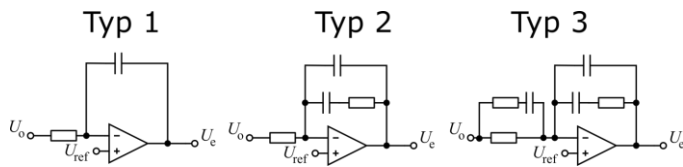
III. NAPĚŤOVÉ RIADENIE DC-DC MENIČOV

Princíp napätového riadenia (VMC) meniča je zobrazený na Obr. 2, na ktorom je schematicky znázornená analógová verzia VMC riadenia priameho znižovacieho meniča [2,7,8].



Obr. 1. Napätové riadenie priameho znižovacieho meniča napätia (analógová verzia)

Tento typ riadenia meničov obsahuje jednu regulačnú slučku s napätovou spätnou väzbou. Ako analógový napätový regulátor je najčastejšie používaný tretí typ zapojenia podľa Obr. 2, prípadne je možné použiť druhý typ zapojenia, ak má daný menič pracovať v oblasti neprerušovaných prúdov. Napätové regulátory vykonávajú výpočet regulačnej odchýlky a kompenzáciu filtra meniča (LC). Výstup napätového regulátora (u_c) je privádzaný do komparátora, v ktorom je tento výstup porovnávaný s trojuholníkovým signálom u_r generovaným oscilátorom impulzov. Spínanie hradla tranzistora (T) je realizované pomocou RS klopneho obvodu. Hodinový signál (clk) po skončení každej periódy nastavi výstup klopneho obvodu na log. 1, čím sa zopne tranzistor T. Rozopnutie tranzistora je realizované resetovaním výstupu RS klopneho obvodu, čím sa vykonáva rozopnutie tranzistora [2,7].



Obr. 2. Základné typy analógových regulátorov

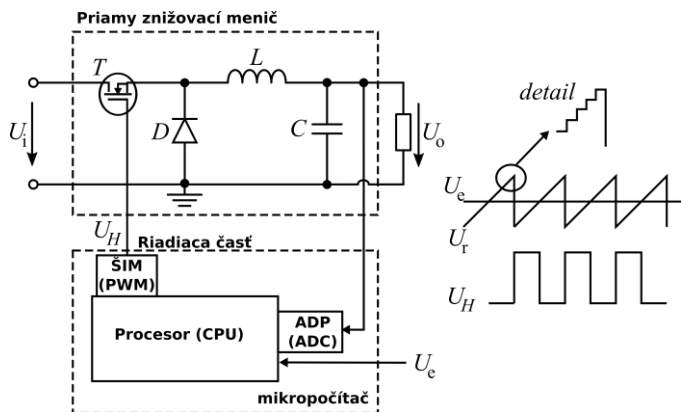
S vývojom v oblasti mikro počítačovej techniky narastá počet aplikácií digitálnych verzií napätového riadenia meničov. Na realizáciu takýchto riešení sú štandardne používané mikro počítače (Obr. 3), ktoré majú v sebe integrované moduly pre generovanie ŠIM, analógovo-digitálne prevodníky a mnohé ďalšie moduly. Požadované výstupné napätie meniča je v takýchto prípadoch možné nastaviť na konštantnú hodnotu v rámci programu mikro počítača. V prípade nutnosti nastavovania rôznej požadovanej hodnoty výstupného napätia meniča je možné túto hodnotu poslať do meniča pomocou rôznych komunikačných rozhraní ako I2C, SPI, CAN a pod., alebo nastaviť požadovanú hodnotu pomocou potenciometra pripojeného na analógovo-digitálny prevodník [11, 12].

Medzi hlavné výhody digitálneho VMC riadenia oproti analógovému VMC riadeniu môžeme zaradiť:

- zvýšenie presnosti daného riešenia, z dôvodu závislosti analógových obvodov od starnutia a vonkajších vplyvov prostredia ako je napr. teplota,
- možnosť komunikácie s externými zariadeniami ako aj možnosť implementácie pokročilých riadiacich algoritmov a nelineárnych metód riadenia ako je adaptívna PI regulácia, fuzzy regulácia, prediktívne riadenia pod. [13-19].
- nižší počet súčiastok [12].

Naopak za nevýhodu použitia mikro počítačov v riadení oproti analógovým obvodom je možné považovať:

- obmedzenie maximálne spínacej frekvencie tranzistorov meničov v závislosti od limitov mikro počítača,
- vyššia cena,
- pomalšia reakcia na preťaženie meniča [12].

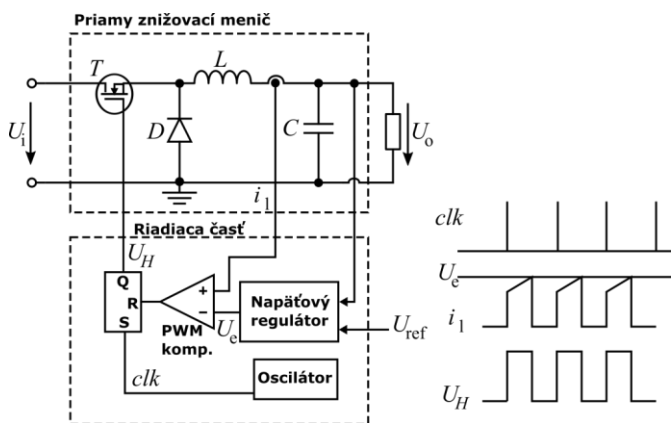


Obr. 3. Napätové riadenie priameho znižovacieho meniča napätia (digitálna verzia)

IV. PRÚDOVÉ RIADENIE DC-DC MENIČOV

Na zmiernenie nedostatkov VMC bolo vytvorené prúdové riadenie meničov CMC (Current Mode Control). Ako je možné vidieť na Obr. 5, základná štruktúra prúdového riadenia je podobná VMC.

Hlavným rozdielom CMC metódy oproti VMC je, že oscilátor je použitý len na tvorbu hodinového signálu konštantnej frekvencie. Trojuholníkový signál na generovanie ŠIM je nahradený signálom odvodeným z prúdu prechádzajúceho induktorom meniča. Ako napätový regulátor je zvyčajne využitý druhý alebo tretí typ regulátora podľa Obr. 2.



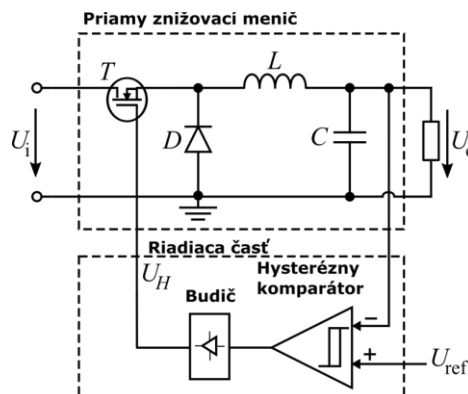
Obr. 4. Prúdové riadenie priameho znižovacieho meniča napätia

Táto metóda riadenia zvyčajne zahŕňa dve spätno-väzobné slučky a to prúdovú a napätovú. Princíp činnosti CMC metódy je zobrazený na Obr. 4. Na základe nameraného napätia na záťaži a nastaveného referenčného napätia je určená chyba na výstupe napätvej slučky. Táto chyba je vypočítavaná a spracovaná v napätovom regulátore, ktorého výstupné napätie U_e je porovnávané s prúdom tečúcim cez induktor (napätový výstup snímača prúdu), na základe ktorého je určená strieda spínania meniča [2], [5]. Takisto ako v prípade VMC metódy riadenia je možné realizovať prúdové riadenie meničov pomocou digitálnych mikropočítačov [20].

V. HYSTERÉZNE RIADENIE

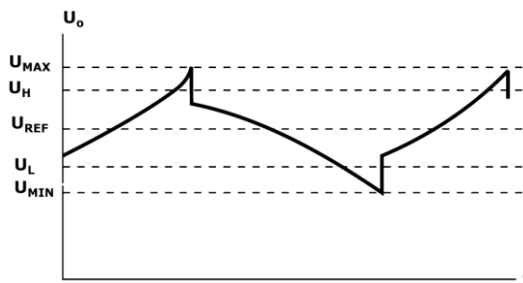
Hysterézne riadenie HMC (Hysteric mode control) pracuje na princípe udržania výstupného napätia v definovanom hysteréznom pásme okolo hodnoty požadovaného referenčného napätia meniča U_{REF} . Takáto metóda regulácie sa vyznačuje

veľmi rýchlou odozvou na zmenu vstupného napätia a výstupného napätia meniča nakoľko neobsahuje žiadne pomalé spätné väzby ako iné metódy a neobsahuje ani žiadne obmedzenia pre nastavenie striedy, čím umožňuje riadenie striedy v plnom rozsahu od 0 po 1. Výborné dynamické vlastnosti riadenia umožňujú zmenšenie veľkosti výstupných filtrov, čo vedie k zníženiu celkovej ceny DC-DC meničov. Principiálne znázornenie použitia HMC pre priamy znižovací menič je znázornené na Obr. 5 [5], [6].



Obr. 5. Hysterézne riadenie priameho znižovacieho meniča

Zvlnenie výstupného napätia meniča je závislé od nastavenia veľkosti hysterézného pásma a prekmitu závislého na oneskorení signálov spôsobenými štruktúrou meniča. Na Obr. 6 je znázornené pásmo hysterézie (od U_L do U_H) a celkové zvlnenie výstupného napätia (od U_{MIN} do U_{MAX}) [6].



Obr. 6. Zvlnenie napätia pri HCM [6]

VI. ZÁVER

V tomto článku boli opísané štandardné metódy riadenia znižovacích DC-DC meničov, ktorých funkčnosť je potvrdená praktickou realizáciou z priemyslu. Zároveň sú tu vysvetlené základné princípy jednotlivých metód, pričom je kladený dôraz na zhrnutie jednotlivých výhod a nevýhod uvedených metód. Každá z opísaných metód má určité nevýhody a obmedzenia, takže voľba riadiacej metódy je závislá od konkrétnych aplikácií, pričom je venovaná neustála pozornosť vývoju spoľahlivejších a efektívnejších metód riadenia znižovacích meničov.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Vedecká grantová agentúra Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied grantom VEGA 1/0464/15 a grant FEI-2015-3.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] H. M. Rashid, *Power electronics handbook third edition*, ISBN 978-0-12-382036-5, p. 1409, 2011.
- [2] Sujata Verma, S.K. Singh, Rao, A.G.: Overview of control Techniques for DC-DC converters, in *"Journal of Engineering Research"*, Vol.2(8), p 18-21, 2013, ISSN 2278 – 9472.
- [3] Jian Sun: *Dynamics and Control of Switched Electronic Systems*, ISBN: 978-1-4471-2884-7, 2012.
- [4] M. Biswal, "Control techniques for DC-DC buck converter with improved performance", diplomová práca, National Institute of Technology Rourkela, India, 2011.
- [5] S. Maniktala, "Voltage-Mode, Current-Mode (and Hysteretic Control)", *MicroSemi Technical note*, 2012, dostupné online: http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/124786-voltage-mode-current-mode-and-hysteretic-control
- [6] R. Miftakhudinov, "Synchronous buck regulator design using the TI TPS5211 high-frequency hysteretic controller", *Analog Applications Journal*, 1999.
- [7] R. Mammano, "Switching Power Supply Topology Voltage Mode vs. Current Mode", Design note, 1999 dostupné online: <http://www.ti.com/lit/an/slua119/slua119.pdf>
- [8] Bogdan, A.I.; Bizon, N.: Voltage-mode control of the DC-DC power converter - a short review, in *"Electronics, Computers and Artificial Intelligence"*, 2015 7th International Conference on pp.E-27-E-32, 25-27, 2015
- [9] TECH WEB, DC/DC Switching Regulator Basics – Control Methods (Voltage Mode, Current Mode, Hysteresis Control), 2015, dostupné online: <http://micro.rohm.com/en/techweb/knowledge/dcdc/s-dcdc/02-s-dcdc/97>
- [10] M. Lešo, „Aplikácia metód umelej inteligencie v dynamických systémoch“, písomná práca k dizertačnej skúške, KEM, TUKE, Košice, Slovensko, 2016.
- [11] N. George, V. N. Panchalai, E. Sebastian and S. Narayanan, "Digital voltage-mode-control of a full-bridge phase-shift-modulated DC-DC converter," *Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)*, 2014 Annual International Conference on, Kottayam, 2014, pp. 1-6.
- [12] L. Balogh, "A Practical Introduction to Digital Power Supply Control", *Texas Instruments Incorporated*, 2005.
- [13] S. Vazquez, J.I Leon., L.G. Franquelo, J. Rodriguez; H.A. Young, A. Marquez, P. Zanchetta: "Model Predictive Control: A Review of Its Applications in Power Electronics", *Industrial Electronics Magazine, IEEE*, vol.8, no.1, pp.16-31, March 2014
- [14] Kiam Heong Ang, G. Chong, Yun Li, "PID control system analysis, design, and technology", *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol.13, no.4, pp.559-576, July 2005.
- [15] A. Irfan, "Implementation of PID and Deadbeat Controllers with the TMS320 Family", *Texas instruments application report: SPRA083*, 1997.
- [16] M. Bodor, "Výkonový DC/DC menič s mäkkým spinaním", dizertačná práca. KEM, TUKE, Košice, Slovensko, 2012.
- [17] Nguyen Gia Minh Thao; Mai Tuan Dat; Tran Cong Binh; Nguyen Huu Phuc: PID-fuzzy logic hybrid controller for grid-connected photovoltaic inverters, in *Strategic Technology (IFOST)*, 2010 International Forum on, pp.140-144, 13-15 Oct. 2010
- [18] Yufeng Zhang; Shengjin Li; Gang Lu; Yong Zhou, "A fuzzy self-tuning PID control system of adjustable speed diesel generator", *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI)*, 2012, pp.619-622, 19-20 May 2012.
- [19] Liping Guo, J.Y. Hung, R.M. Nelms, "Evaluation of DSP-Based PID and Fuzzy Controllers for DC-DC Converters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.56, no.6, pp.2237-2248, June 2009.
- [20] D. He, W. Dilliard and R. M. Nelms, "Microcontroller implementation of current-mode control for a discontinuous mode boost converter", *Energy Conversion Engineering Conference, 2002. IECEC '02. 2002 37th Intersociety*, 2002, pp. 255-260.



Martin Lešo (Ing.) sa narodil v roku 1990 v Poprade (Slovensko). V roku 2014 dokončil inžinierky stupeň štúdia v odbore elektrotechniky na katedre Elektrotechniky a Mechatroniky na Technickej univerzite v Košiciach. V súčasnosti je študentom druhého ročníka tretieho stupňa štúdia na katedre elektrotechniky a mechatroniky v odbore silnoprúdová elektrotechnika a zaoberá sa problematikou aplikácie metód umelej inteligencie v oblasti elektrických pohonov a výkonovej elektroniky.



Jaroslava Žilková (Doc., Ing., PhD.) ukončila inžinierske štúdium na Katedre Technickej kybernetiky FEI TU v Košiciach. Po ukončení štúdia pracovala ako výskumná pracovníčka v EVÚ Nová Dubnica det. prac. Košice / ZŤS VVÚ Košice. V roku 2001 obhájila dizertačnú prácu a v roku 2008 sa habilitovala v odbore Silnoprúdová elektrotechnika. V súčasnosti je docentkou na Katedre elektrotechniky a mechatroniky FEI TU v Košiciach. Oblasť jej výskumnej činnosti sú hlavne moderné metódy riadenia elektrických pohonov a aplikácie metód umelej inteligencie v elektrotechnických systémoch.



M. Pástor titul PhD. získal na Technickej univerzite v Košiciach v odbore silnoprúdová elektrotechnika v roku 2014. V súčasnosti pôsobí ako odborný asistent na Katedre elektrotechniky a mechatroniky so zameraním na výkonovú elektroniku.