

Mikroprocesorové riadenie DC-DC meniča

Microprocessor control of DC-DC converter

Marek Pástor, Jaroslava Žilková, Martin Lešo

marek.pastor@tuke.sk, jaroslava.zilkova@tuke.sk

Katedra elektrotechniky a mechatroniky, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Technická univerzita v Košiciach, Letná 9, 042 00 Košice, Slovenská Republika

Abstrakt — Príspevok prezentuje realizáciu mikroprocesorového napät'ového riadenia DC-DC meniča s mäkkým spínaním. Model DC-DC meniča spolu s navrhnutým riadením bol vytvorený v programe Matlab/Simulink. Navrhnutý PI regulátor bol implementovaný na ARM mikroprocesore STM32F746. Činnosť riadeného jednosmerného meniča bola overená meraním na laboratórnom modeli 2-kW DC-DC meniča. Dosiahnuté výsledky sú zhodnotené v závere príspevku.

Kľúčové slová — riadenie, dc-dc menič, mäkké spínanie, mikroprocesor.

Abstract — The paper presents the implementation of microprocessor control of a soft-switching DC-DC converter. A model of a soft-switching DC-DC converter with voltage control was created in program MATLAB/Simulink. A continuous-time PI controller was transformed into a discrete-time PI controller and implemented on the STM32F746 ARM microprocessor. The abilities of the proposed PI controller were verified by measurement on a laboratory model of a 2-kW DC-DC converter. Achieved results are discussed at the end of the paper.

Keywords — control, DC-DC converter, soft-switching, microprocessor.

I. ÚVOD

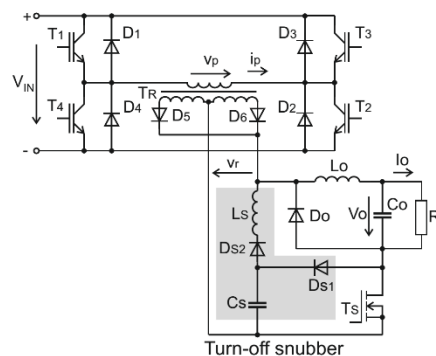
Od 70-tych rokov minulého storočia je s významným rozvojom výkonovej elektroniky spojené aj postupné rozširovanie nasadzovania výkonových polovodičových meničov v priemysle, ktoré vďaka efektívnemu riadeniu prináša výrazné úspory spotreby elektrickej energie. Analógové riadiace prvky predstavované tranzistorami a operačnými zosilňovačmi, ktoré boli teplotne a časovo nestále, boli neskôr nahradené integrovanými riadiacimi obvodmi, ktoré boli rovnako analógovými obvodmi, ale ich parametre a vlastnosti už boli pre použitie v riadení vhodnejšie. S rozvojom mikroprocesorovej techniky sa postupne aj v riadení výkonových polovodičových meničov začína upúšťať od analógových obvodov. Rozvoj mikroprocesorovej techniky priniesol do oblasti riadenia výkonových meničov prechod k digitálnej forme riadenia meničov aj k zmenšovaniu rozmerov meničov. Nemenej významná je skutočnosť, že s rozvojom mikroprocesorovej techniky je spojené výrazné zvyšovanie výpočtového výkonu procesorov, čo umožňuje veľký posun v riadení výkonových polovodičových meničov. V dnešnej dobe existuje veľa spoločností vyvíjajúcich univerzálne, spoľahlivé a cenovo dostupné mikroprocesory, ktoré je možné použiť pre efektívne riadenie výkonových polovodičových meničov.

Tento článok sa zaoberá realizáciou mikroprocesorového riadenia polovodičového DC-DC meniča s mäkkým spínaním,

ktorý bol bližšie opísaný v [1] s využitím ARM mikroprocesora STM32F746.

II. MENIČ S MÄKKÝM SPÍANÍM

Výkonová časť meniča (**Error! Reference source not found.**) sa skladá z mostíkového striedača s tranzistorami $T_1 - T_4$, ktoré zabezpečujú vytvorenie vysokofrekvenčného striedavého napätia s obdĺžnikovým priebehom pre napájanie vysokofrekvenčného transformátora.



Obr. 1. Schéma DC-DC meniča s mäkkým spínaním **Error! Reference source not found.**

Transformátor (**Error! Reference source not found.**) zabezpečuje galvanické oddelenie výstupu od vstupu a znižuje veľkosť napájacieho napätia riadeného usmerňovača. Riadený usmerňovač sa skladá z tranzistora T_5 , ktorý slúži na riadenie výstupného prúdu a napätia meniča a zabezpečuje spínanie tranzistorov mostíka pri nulovom napätí, prúde a vypínanie tranzistorov mostíka pri nulovom prúde. V rámci riadeného usmerňovača je realizovaná bezstratová odľahčovacia sieť tvorená diódami DS_2 , DS_1 , cievkou LS a kondenzátorom CS , ktorá zabezpečuje vypínanie tranzistora T_5 pri nulovom napätí.

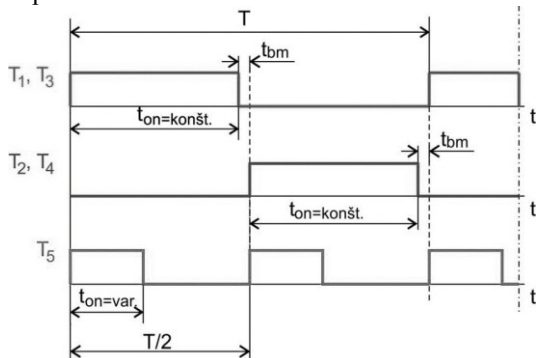
Za riadeným usmerňovačom je umiestnený výstupný LC filter s nulovou diódou tvorený kondenzátorom Co s kapacitou $4,3 \mu F$, tlmivkou Lo s indukčnosťou $4 \mu H$ a diódou D_0 , ktorý vyhladzuje priebeh výstupného napätia.

III. RIADENIE SPÍNAČOV MENIČA

Riadenie meniča je uskutočňované podľa Riadiace signály tranzistorov meniča **Error! Reference source not found.** Tranzistory striedača sú spínané frekvenciou 50Khz, pri 50% striede, pričom experimentálne bola nastavená veľkosť bezpečnostnej medzery na $1 \mu s$, čo zohľadňuje čas, počas ktorej sa

stihnú vybit' výstupné kapacity IGBT tranzistorov a oneskorenie riadiacich signáloch vplyvom galvanického oddelenia riadiacich vstupov a budičov tranzistorov.

Tranzistor riadeného usmerňovača pracuje so 100kHz PWM, pričom spínanie tranzistora je zosynchronizované so spínaním jednotlivých uhlopriečok strieđača. Vypnutie tranzistora T_5 nastáva pred vypnutím danej vetvy strieđača (pre fyzikálny model meniča je strieďa ohraňčená na maximálnu hodnotu 0,7), čím nastáva pokles prúdu primárnej strany transformátora pre zabezpečenie vypnutia tranzistorov strieđača pri nulovom prúde.



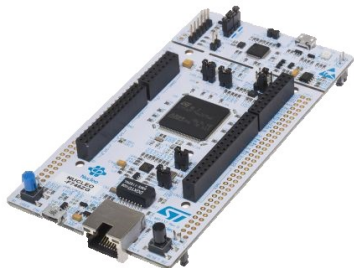
Obr. 2. Riadiace signály tranzistorov meniča **Error! Reference source not found.**

IV. RIADIACI MIKROPOČÍTAČ ST32F746

Pre realizáciu riadiacej časti meniča sme zvolili vývojový kit Nucleo-144 s mikroprocesorom STM32F746 (Obr.3), ktorý obsahuje procesor typu ARM Cortex M7 s perifériami potrebnými pre riadenie zvoleného meniča. Mikropočítač umožňuje pracovať na maximálne možnej frekvencii jadra procesora 216 MHz, s maximálnym výpočtovým výkonom 462 DMIPS, pričom mikropočítače s procesormi ARM rady M sú špecializované na použitie v embedded zariadeniach.

Tento typ riadiacej dosky bol zvolený z dôvodov:

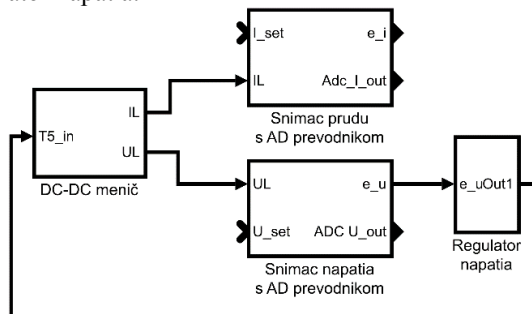
- zlomkovej ceny vývojového kitu oproti TMS320F28335,
- HAL knižnica umožňuje jednoduchý prechod na iný ARM procesor od firmy ST,
- vývojové prostredie Cube MX, ktoré slúži na nastavenie základných vlastností periférií mikropočítača vo forme generovania zdrojového kódu pre nastavenie registrov procesora,
- voľne použiteľné vývojové prostredia (do 32 KB),
- v rámci dosky je integrovaný programátor s možnosťou digitálnej emulácie sériového portu a podporou debug módu.



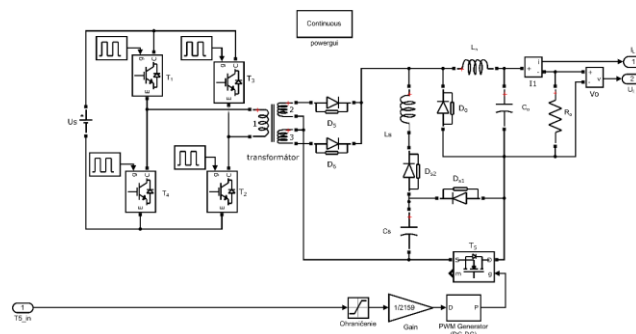
Obr. 3. Vývojový kit STM32 Nucleo-144

V. SIMULAČNÉ POROVNANIE REGULÁCIE NAPÄTIA POMOCOUI PI REGULÁTORA

Pre potreby verifikácie návrhu napäťovej regulácie výstupného napätia DC-DC meniča bol v rámci simulačného programu MATLAB/Simulink zostavený simulačný model meniča, ktorý je zobrazený na **Error! Reference source not found.** Model meniča je zostavený zo 4 blokov. Tieto bloky sú: výkonová časť meniča, A/D prevodník výstupného napätia, A/D prevodník výstupného prúdu za LC filtrom meniča a regulátor napätia.

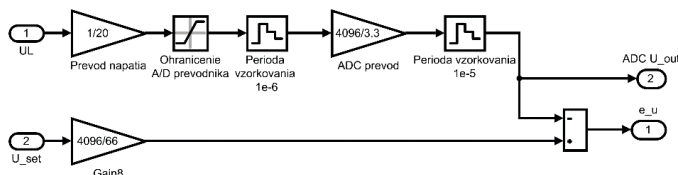


Obr. 4. Simulačný model DC-DC meniča

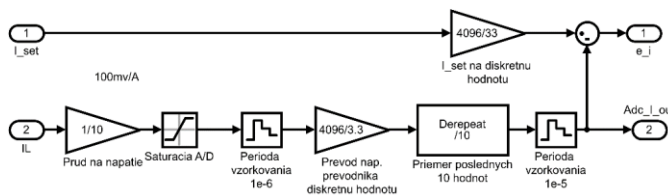


Obr. 5. Simulačná schéma výkonovej časti DC-DC meniča

Blok výkonovej časti meniča, ktorého parametre sú uvedené v tab.I, je zobrazený na **Error! Reference source not found.** Pre snímanie napätia a prúdu sú použité 12 bitové A/D prevodníky, ktorých simulačné schémy sú zobrazené na **Error! Reference source not found.** a **Error! Reference source not found.** Frekvencia snímania výstupných veličín je 1MHz, pričom ako výstupná hodnota pre reguláciu je použitá priemerná hodnota z posledných 10 nameraných hodnôt na odfiltrovanie zvlnenia výstupného napätia a prúdu.



Obr. 6. Simulačná schéma napäťového A/D prevodníka



Obr. 7. Simulačná schéma prúdového A/D prevodníka

TABLE I. PARAMETRE DC-DC MENIČA

Parameter	Value	Unit
Výstupný výkon P_{OUT}	2	kW
Vstupné napätie V_{IN}	300	V
Spinacia frekvencia f_s of $T_1 - T_4$	50	kHz
Výstupné napätie V_O	40	V
Výstupný prúd I_O	50	A
Prevod transformátora TR	5	-
Kapacita výstupného filtra C_O	27	μF
Indukčnosť výstupného filtra L_O	4	μH
Kapacita odľahčovacej siete C_S	220	nF
Indukčnosť odľahčovacej siete L_S	300	nH

VI. MIKROPROCESOROVÉ RIADENIE

Regulácia výstupného napätia meniča je zabezpečovaná PI regulátorom. V práci [1] je opísaný návrh PI regulátora, ktorého diskretná forma definovaná rovnicou (1) bola použitá pri realizácii mikroprocesorového riadenia tohto meniča.

$$u[k] = u[k-1] + K_1 e[k] + K_2 e[k-1] \quad (1)$$

Parametre K_1 a K_2 diskretného PI regulátora boli získané Tustinovou aproximáciou podľa (2):

$$\begin{cases} K_1 = K_p + K_i T_{sample} / 2 \\ K_2 = -K_p + K_i T_{sample} / 2 \end{cases} \quad (2)$$

pričom vzorkovacia perióda T_{sample} v (2) bola nastavená na spinaciu periódu sekundárneho tranzistora T_S , na dvojnásobok spinacích frekvencií f_s primárnych tranzistorov $T_1 - T_4$:

$$T_{sample} = \frac{1}{2f_s} \quad (3)$$

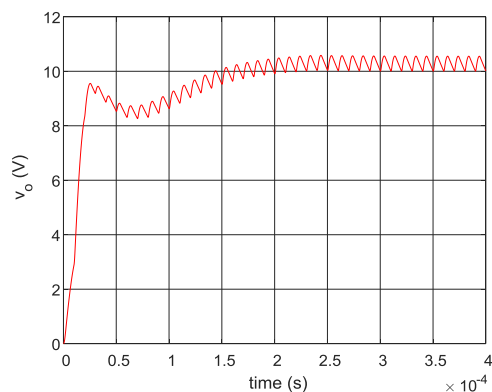
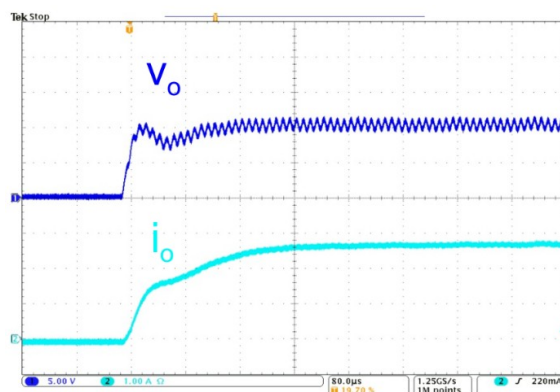
Riadiaci algoritmus bol implementovaný v ARM mikroprocesore STM32F746. V Tab. II sú uvedené parametre diskretného PI regulátora.

TABLE II. PARAMETRE DISKRÉTNÉHO PI REGULÁTORA

Parameter	Hodnota	Jednotka
Vzorkovací čas T_{sample}	10	μs
Dominantná čas. konštanta τ	35	μs
Zosilnenie K_1	0,0095	-
Zosilnenie K_2	-0,007	-

VII. VERIFIKÁCIA A POROVNANIE

Činnosť navrhnutého PI regulátora bola overená simuláciou v programe MATLAB / Simulink. Programová schéma riadenia DC-DC meniča je uvedená v (1) a parametre PI regulátora sú uvedené v Tab. II. Dosiahnutá odozva DC-DC meniča je zobrazená na obr. 8. Požadovaná hodnota výstupného napätia bola 10 V. Doba nastavenia výstupného napätia je cca. 150 μs .


 Obr. 8. Výstupné napätie DC-DC meniča získané simuláciou **Error! Reference source not found.**


Obr. 9. Merané výstupné napätie a prúd DC-DC meniča

Pri realizácii sme na meniči pracovali pri zníženom napájaní striedača meniča na 100V. Menič bol zaťažovaný dvoma reostatmi a pre zistenie presnosti regulácie sme ako požadovanú hodnotu nastavovali hodnotu, ktorú očakávame v dátovom registri A/D prevodníka. Pre overenie navrhnutej regulačnej štruktúry sme testovali menič pri skokovej zmene požadovaného napätia, pričom ako požadované napätie bola hodnota na A/D prevodníku snímača napätia 1000, čo predstavuje 10V. Na **Error! Reference source not found.** je uvedený priebeh výstupného napätia a prúdu meniča nameraného osciloskopom Tektronix MSO 4034.

VIII. ZÁVER

V príspevku je opísaný spôsob digitálneho riadenia polovodičového DC-DC meniča s mäkkým spínaním pomocou mikroprocesora STM32F746. Priebehy výstupného napätia a prúdu dosiahnuté meraním na laboratórnom modeli DC-DC meniča potvrdili funkčnosť navrhnutého PI regulátora podľa simulačných výsledkov riadenia DC-DC meniča s navrhnutým riadením vytvoreným v programe Matlab/Simulink.

K hlavným výhodám digitálneho VMC riadenia oproti analógovému VMC riadeniu patrí:

- 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, [13-19]

- nižší počet súčiastok [12].

Naopak nevýhodou použitia mikroprocesorov v riadení meniča oproti analógovým obvodom je:

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

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Slovenskou agentúrou pre výskum a vývoj (APVV) v rámci Projektu APVV-16-020 a Vedeckou grantovou agentúrou Ministerstva školstva Slovenskej republiky a Slovenskej akadémie vied (VEGA) v rámci projektu 1/0187/18.

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] M. Pastor, J. Zilková, "Riadenie výstupného napätia DC-DC meniča", *Elektrotechnické listy*, vol. 4, no. 2, pp. 4, 2019
- [2] G. Kácsor, P. Špánik, J. Dudrik, M. Luft, and E. Szychta, "Principles of operation of three-level phase shift controlled converter", *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 82, no. 2, pp. 69-74, 2008.
- [3] M. Bodor, J. Dudrik and J. Perdulak, "ZVZCS PWM converter using secondary active clamp", *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 11, no. 3, pp. 26–30, 2011, [online] Available: <http://dx.doi.org/10.2478/v10198-011-0026-7>.
- [4] J. Dudrik and V. Ruscina, "Voltage fed zero-voltage zero-current switching PWM DC-DC converter," 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, (*EPE-PEMC*) pp. 295-300, 2008, [online] Available: doi:10.1109/EPEPEMC.2008.4635281.
- [5] J. Dudrik, M. Pástor, M. Lacko and R. Žatkovič, "High-frequency soft-switching PWM DC-DC converter with active output rectifier operating as a current source for arc welding applications," *Electric Power Components and Systems*, vol. 45, no. 6, pp. 681-691, 2017.
- [6] J. Dudrik, M. Pástor, M. Lacko and R. Žatkovič, "Zero-voltage and zero-current switching PWM DC-DC converter using controlled secondary rectifier with one active switch and nondissipative turn-off snubber," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 7, pp. 6012-6023, 2018.
- [7] H. M. Rashid, *Power Electronics Handbook*, ISBN 978-0-12-382036-5, pp. 1409, 2011.
- [8] M. Leso, J. Zilková, J. M. Biros and P. Talian, "Survey of control methods for DC-DC converters," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 18, no. 3, pp. 41-46, 2018, [online] Available: DOI: 10.15546/aei-2018-0024.
- [9] S. Verma, S.K. Singh and A.G. Rao, "Overview of control techniques for DC-DC converters", *Research Journal of Engineering Sciences*, vol.2, no. 8, pp. 18-21, 2013, ISSN 2278 – 9472.
- [10] A.I. Bogdan and N. Bizon, "Voltage-mode control of the DC-DC power converter - a short review", 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, pp.E-27-E-32, 2015.
- [11] Jian Sun: *Dynamics and control of switched electronic systems*, Chapter 2: Pulse-Width Modulation, ISBN: 978-1-4471-2884-7, 2012.
- [12] F. Deniz, B. Alagoz, and N. Tan, "PID controller design based on second order model approximation by using stability boundary locus fitting," *Proc. 9th Int. Conf. Elect. Electron. Eng.*, pp. 827–831, Nov. 2015.
- [13] N. George, V. N. Panchalai, E. Sebastian and S. Narayanan, "Digital voltage-mode-control of a full-bridge phase-shift-modulated DC-DC converter," *Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD)*, pp. 1-6, 2014.
- [14] G. Malleshm, S. Mishra, A.N. Jha, "Maiden application of Ziegler-Nichols method to AGC of distributed generation system," *Power Systems Conference and Exposition, PSCE '09 IEEE/PES*, pp.1-7, 2009.

- [15] H. Jingqing, "From PID to active disturbance rejection control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.56, no.3, pp.900-906, March 2009.
- [16] M. Namnabat, M. B. Poodeh and S. Eshtehardiha, "Comparison of the control methods in improvement the performance of the DC-DC converter", *ICPE '07, 7th International Conference on Power Electronics*, pp.246-251, 2007.
- [17] M. P. Kazmierkowski, F. Blaabjerg and R. Krishnan, *Control in power electronics-selected problems*. Elsevier Science, San Diego, 2002.
- [18] A. S. Anuchin, "Structures of a digital PI controller for an electric drive", *Russ. Electr. Engin.*, no. 7, pp. 2–6, 2014. bolo to schované v16
- [19] 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.
- [20] M. Pastor, J. Dudrik and M. Vacek, "Predictive power control of grid-tied multilevel inverter", *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 13, no.3, pp. 3–7, 2013, DOI: 10.2478/aei-2013-0031.
- [21] M. Pastor and J. Dudrik, "Grid-tied 15-level cascade inverter with predictive current control", *Electronics and Electrical Engineering*. vol. 18, no. 9 pp. 19-22, 2012, <http://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/2798/1980>.
- [22] M. Pastor and J. Dudrik, "Predictive current control of grid-tied cascade H-bridge inverter", *Automatika, Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, vol. 54, no. 3, pp. 308-315, 2013, <https://automatika.korema.hr/index.php/automatika/article/view/186/256>
- [23] P. Cortes, M. P. Kazmierkowski, R. M. Kennel, D. E. Quevedo and J. Rodriguez, "Predictive control in power electronics and drives", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 55, no. 12, pp. 4312–4324, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2008.2007480>

M. Pástor (Ing., PhD.) - 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, polovodičové meniče a obnoviteľné zdroje energie.

J. 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 / ŽŤS 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.

Oblasti jej výskumnej činnosti sú hlavne moderné metódy riadenia elektrických pohonov a aplikácie metód umelej inteligencie v elektrotechnických systémoch.



Martin Lešo (Ing, PhD.) sa narodil v roku 1990 v Poprade (Slovensko). V roku 2014 ukončil inžinierske štúdium v odbore Elektrotechnika na Katedre elektrotechniky a mechatroniky na FEI TU v Košiciach. V roku 2018 na katedre elektrotechniky a mechatroniky obhájil dizertačnú prácu v odbore Silnoprúdová elektrotechnika. V súčasnosti sa zaoberá problematikou aplikácie metód umelej inteligencie v oblasti elektrických pohonov a výkonovej elektroniky.