

Samuel Bucko, Matej Kordovaník

Vplyv elektromobility na kvalitu elektrickej energie

Prezentovaný článok sa zaoberá problematikou integrovania e-Mobility do distribučnej siete, kde jednotlivé elektrické vozidlá pri procese nabíjania predstavujú špecifický druh záťaže. Táto záťaž v podobe nabíjania elektrických vozidiel môže ovplyvňovať kvalitatívne ukazovatele elektrickej energie. Bolo vytvorené zariadenie, vďaka ktorému bolo možné pripojiť k AC nabíjacej stanici trojicu regulovateľných umelých záťaží a sledovať príspevky 3. harmonickej pri rôznych konfiguráciách nabíjačiek vo vozidle alebo umiestnenia AC nabíjacej stanice.

Kľúčové slová: elektromobilita; kvalita, nabíjacie stanice, distribučná sieť

The presented article is focused the issue of integrating e-Mobility into the distribution grid, where individual electric vehicles, during the charging process, represent a specific type of load. This load, in the form of charging electric vehicles, can influence the qualitative indicators of electric energy. A device was created that allowed connecting a trio of controllable artificial loads to an AC charging station and monitoring the contributions of the 3rd harmonic at various configurations of the vehicle's chargers or the location of the AC charging station. **(The impact of electromobility on the power quality)**

Keywords: electromobility; quality, charging stations, distribution network

I. ÚVOD

Zvyšovanie nárokov na emisné hodnoty CO₂ a značne vyčerpané fosilné palivá sú motiváciou pre zavádzanie elektrických vozidiel (EV) alebo plug-in hybridných elektrických vozidiel (HEV) v rámci osobnej a nákladnej dopravy. Dôležitým parametrom v oblasti e-Mobility je z pohľadu užívateľov maximálny dojazd vozidla na jedno nabitie a počet vybijacích/nabíjacích cyklov batérií, ktoré sú priamym ukazovateľom životnosti batérií. Skrytou požiadavkou užívateľov EV a HEV je rýchlosť nabíjania, s ktorou sú spojené aj maximálne nabíjacie prúdy.[1]

Z pohľadu elektrizačnej siete hovoríme o novom type záťaže v sieti. Nakoľko jednotlivé EV a HEV sú založené na rôznych typoch nabíjania nie je možné určiť jednoznačný charakter danej záťaže. S týmito vlastnosťami EV a HEV je dôležité zamerať sa na kvalitu elektrickej energie, ktorá môže byť lokálne, ale i globálne skreslená aj vďaka implementovaniu flotily EV o určitej veľkosti.

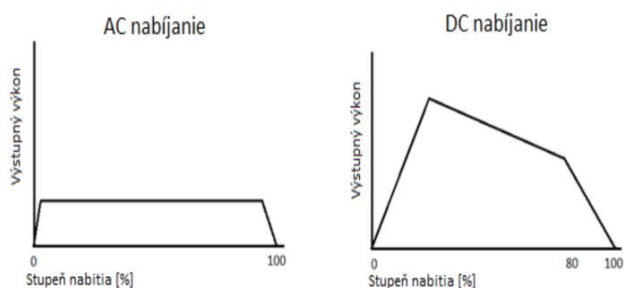
Ďalším negatívom, ktoré prichádza so zvyšujúcim sa počtom EV je zvýšenie nárokov na jestvujúcu infraštruktúru. V špecifických prípadoch je potrebné zmeniť dimenziu prierezu káblov. Ďalším rizikom s pripájaním flotily EV a HEV na danej vetve je zvyšujúca sa teplota transformátora, čím sa rapídne znižuje jeho životnosť a zvyšuje sa riziko nebezpečných udalostí. Riešením je obmedzenie počtu nabíjacích miest, čo však spomaľuje začlenenie EV a HEV do dopravy a zníženie popularity e-Mobility. Ďalším riešením je inteligentné riadenie celého systému nabíjania, ktoré napr. obmedzuje nabíjacie stanice v špičkových časoch denného diagramu zaťaženia alebo rozkladá rovnomerne nabíjacie výkony medzi jednotlivé pripojené EV a HEV.[2][3]

Keďže nevieme zabezpečiť stále pripojenie EV a HEV ku sieti, ako je to napríklad u vlakov a trolejbusov, tak musíme zabezpečiť stály prísun energie pomocou akumulátora a zároveň aj jeho dobíjanie. Na to slúžia rôzne typy nabíjacích staníc, ktoré fungujú na princípe jednosmerného (DC) alebo striedavého (AC) napätia a delia sa podľa vyhotovenia, typu nabíjacieho prúdu a umiestnenia nabíjačky.

II. AC A DC NABÍJANIE

Nabíjanie pomocou striedavého napätia a prúdu je z pohľadu výkonu je takmer konštantné v celom nabíjacom cykle. Nakoľko batérie potrebujú pre svoje nabíjanie jednosmerný prúd, k jeho usmerneniu dochádza priamo v zabudovanom usmerňovači. Takéto zariadenie sa nazýva palubná nabíjačka a obsahuje ju každé elektrické vozidlo. Môže využívať jednu, dve alebo tri fázy. Typ, kapacita a počet využitých fáz sa stávajú kľúčové parametre pri výbere elektromobilu. Palubná nabíjačka teda v značnej miere ovplyvňuje maximálny odoberaný výkon a zároveň s ním aj dĺžku trvania nabíjacieho cyklu. Kvôli obmedzeným možnostiam vo vnútornom priestore vozidla sú v porovnaní s usmerňovačmi používanými pri DC nabíjaní rádovo menšie, čoho následkom je aj negatívne ovplyvnenie trvania nabíjacieho cyklu a nabíjacieho výkonu. V súčasnosti je to najpoužívanejší spôsob nabíjania, ktorý podporujú všetky druhy vozidiel. Z dôvodu veľkej popularity najviac ovplyvňuje distribučnú sieť. Spôsoby, akými sa sieť ovplyvňuje taktiež závisia od parametrov palubnej nabíjačky a v neposlednom rade aj od spotrebiteľa, akým štýlom nabíja.[3]

DC nabíjanie prebieha pomocou jednosmerného prúdu. Rozdiel medzi AC nabíjaním spočíva v umiestnení invertora, ktorý nachádza mimo vozidla a do vozidla prúdi pomocou konektora už usmernený jednosmerný prúd priamo do batérií. Z Obr. 1 je možné porovnať priebehy AC a DC nabíjania, kde pri DC nabíjanom procese je tvar výkonovej krivky značne dynamickejši ako v prípade AC nabíjania. DC nabíjací proces dosiahne maximum v okolí 30-40% nabitíej kapacity a postupne klesá až do kapacity zhruba 80 %. Z tejto hodnoty začne klesať odoberaný výkon väčším tempom. Kvôli umiestneniu a priamemu napojeniu na batérie usmerňovač môže do batérií dodávať omnoho väčšie výkony ako palubný. Vďaka tomu je rýchlejší ako AC nabíjanie, avšak vyžaduje externú nabíjaciu stanicu. Tento spôsob využíva väčšina rýchlo nabíjacích staníc. V dnešnej dobe sa taktiež začína uvažovať nad obojsmerným nabíjaním – V2X, ktoré môže prebiehať len pomocou DC nabíjania a použitia usmerňovača zároveň so striedačom.[4]



Obr. 1. Priebehy nabíjajúcich výkonov pre jednotlivé typy nabíjajúcich procesov

III. KVALITA ELEKTRICKEJ ENERGIE A e-MOBILITA

Jednotlivé značky EV a HEV preferujú rôzne systémy nabíjania, či už AC alebo DC. Niektoré EV používajú všetky tri fázy pri nabíjaní (napr. Volvo alebo Tesla) a niektoré dve z fáz (VW) či iba jednu fázu (Nisan). Nelineárny charakter záťaže, ktorú predstavuje EV pripojené k nabíjajúcej stanici spôsobuje zvýšenie hodnôt harmonických zložiek prúdu (THD), čím ovplyvňuje kvalitu elektrickej energie v distribučnej sieti. Negatívne účinky harmonického skreslenia môžu spôsobovať zahrievanie izolácie káblov a tak zníženie jej životnosti alebo zvýšenie teploty transformátora a prechod prúdu v neutrálnom bode sústavy. Zároveň vzniká nesymetria napätí, ktorú je potrebné následne korigovať pomocou dodatočných zariadení.[2][4]

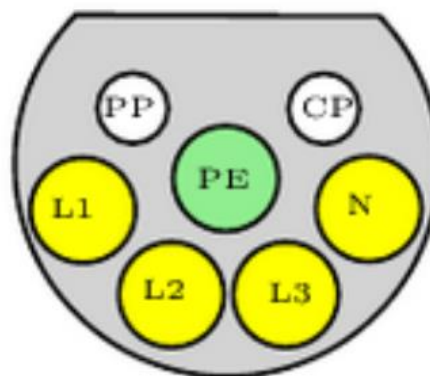
V dôsledku rôznych amplitúd napätí v jednotlivých fázach alebo v ich fázovom posune sa vyskytuje problém s nesymetriou napätí, ktorú môžu spôsobovať rôzne činitele, napr. spotrebiče pripojené len na jednu z fáz, ktoré majú vysoké výkony. Takýmto spotrebičom môže byť nabíjacia stanica pre EV a HEV. Vplyv nesymetrie narastá v prípadoch dlhých vetiev distribučnej NN siete. Niektoré štúdie [1][6] uvádzajú, že vplyv nabíjajúcich staníc je zanedbateľný, ak sa nachádzajú na začiatku vetvy, avšak pri umiestnení nabíjajúcej stanice na koniec vetvy, ktorá má značnú dĺžku môže takýto typ záťaže spôsobovať nerovnováhu napätí medzi jednotlivými fázami.

Pri použití rýchlonabíjajúcich jednosmerných staníc je možné nabiť EV a HEV do 30 minút, pri napätíach 600V DC a prúdoch 400 A. Takéto druhy nabíjajúcich staníc sú v niektorých prípadoch kombinované s obnoviteľným zdrojom elektrickej energie, napr. fotovoltaickou elektrárnou. Takýto typ zdroja môže taktiež spôsobovať vznik vyšších harmonických, ktoré vytvárajú polovodičové spínané prvky umiestnené v invertoroch.[3]

Zníženie dopadu e-Mobility na distribučnú sieť je možné vďaka finančnej motivácii, ktorá môže spočívať v nižších cenách elektrickej energie počas minima v dennom diagrame zaťaženia – v poobedňajších hodinách alebo v noci. Ďalším spôsobom môže byť vzdialené ovládanie nabíjajúcich procesov napríklad na základe hodnoty teploty transformátora. V prípade nesymetrie v sieti je možné do danej vetvy integrovať batériové úložisko alebo STATCOM, statické zariadenie pre kompenzáciu jalových výkonov v sieti. Vyššie harmonické spôsobené napríklad rýchlonabíjajúcimi stanicami je možné obmedziť pomocou sieťových filtrov integrovaných buď v samotnej nabíjajúcej stanici alebo v uzle, z ktorého je napájaná.[1][5]

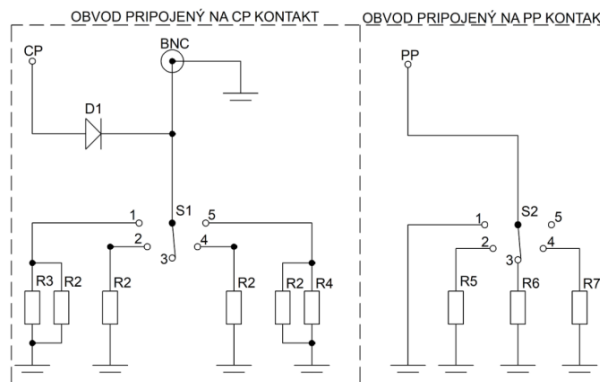
IV. NÁVRH EXPERIMENTU

V rámci tejto práce bolo vyrobené zariadenie, ktoré umožňuje pripojenie 3 umelých, počítačovo riadených záťaží Chroma 63802 k AC nabíjajúcej stanici. Zariadenie sa k nabíjajúcej stanici pripája pomocou konektora Type 2, ktorého rozloženie pinov je na Obr. 2.



Obr. 2. Nabíjací konektor Type 2 s rozložením pinov.

CP a PP piny slúžia na komunikáciu medzi nabíjajúcou stanicou a EV. Vo vytvorenom zariadení je sústava rezistorov, ktoré predstavujú jednotlivé nabíjacie režimy. Nabíjacia stanica využíva hodnoty odporov, ktoré sa v reálnom prípade zaradujú v EV, aby bol určený nabíjací režim, nabíjací prúd a či je vozidlo pripojené správne k nabíjajúcej stanici. Pomocou pinov CP a PP je možné komunikovať a to vďaka zaradením správnej hodnoty odporu. Na vytvorenom zariadení je možné jednotlivé hodnoty odporov meniť pomocou otočných prepínačov. Schéma zapojenia je zobrazená na Obr. 2 a jednotlivé hodnoty odporov sú zhrnuté v Tab. 1..



Obr. 3. Vnútroštruktúrna schéma zapojenia prípravky pre simulovanie pripojenia EV k nabíjajúcej stanici

TABUĽKA I Hodnoty súčiastok použitých pri zostavovaní prípravky

Popis súčiastok použitých v schéme	
Schematické označenie	Typ súčiastky
D1	Dióda 1N-4148
BNC	Zásuvka BNC, priama, 50OHM, pre spájk., na panel
S1, S2	Prepínač otočný, 5 polôh, 1A/250VAC, hriadeľ DØ6,35mm
R2	Rezistor 2,74 kΩ
R3	Rezistor 1,3 kΩ
R4	Rezistor 270 Ω
R5	Rezistor 1,5 kΩ
R6	Rezistor 680 Ω
R7	Rezistor 200 Ω

Simulované sú nasledovné režimy:

- úspešné/ neúspešné pripojenie EV k nabíjajúcej stanici

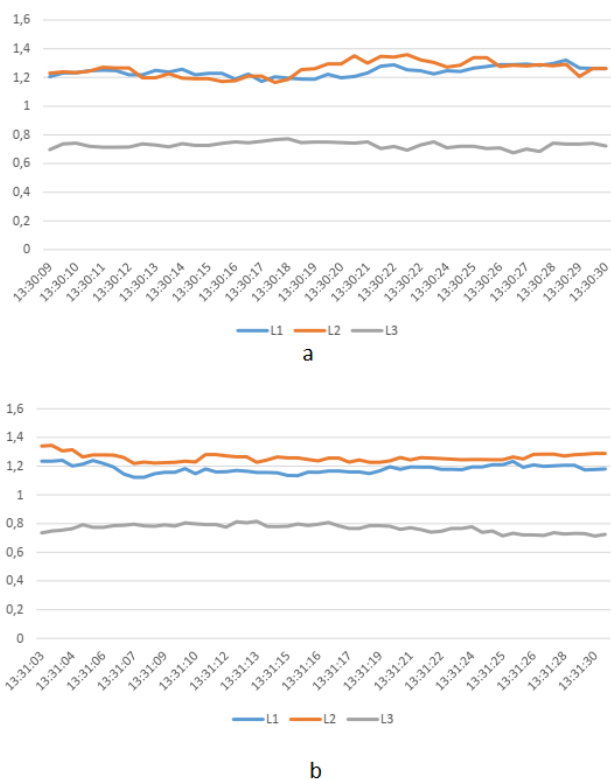
- spustenie/zastavenie nabíjacieho procesu
- simulácia povelu na spustenie chladenia batérií EV
- určenie maximálneho nabíjacieho AC prúdu: 32A, 25A a 10A

Pre nabíjanie bola zvolená metóda AC nabíjania s koncovkou Type 2 od firmy Mennekes. Takýmto spôsobom bolo možné odsledovať ako sa správajú v ideálnych prípadoch AC nabíjacie stanice. Meranie vyšších harmonických od sieťovej frekvencie bolo vykonané pomocou analyzátora výkonu PQube 3. Dáta boli zo zariadenia stiahnuté do PC a následne spracované.

V rámci experimentu boli simulované v laboratóriu SmartIndustryLab dve situácie a to pripojenie nabíjacej stanice na začiatku vetvy vedenia NN a na konci káblového vedenia s dĺžkou 1,1 km, ktoré bolo simulované pomocou sério-paralelného zapojenia odporov s výslednou hodnotou impedancie 0,249 Ω .

V. VÝSLEDKY

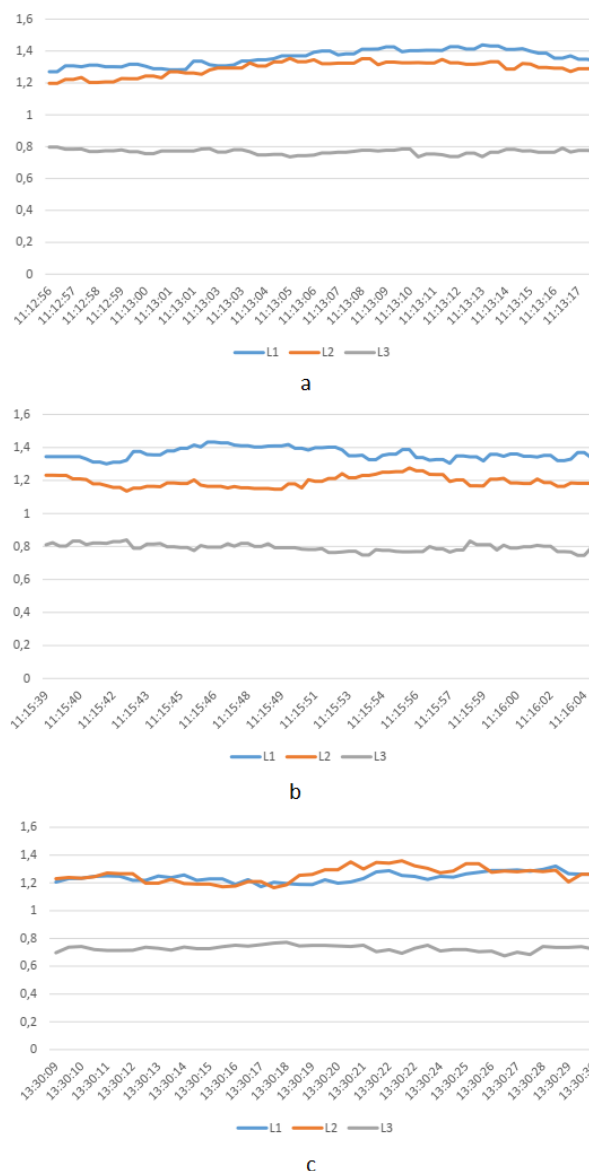
Po zozbieraní nameraných údajov a ich vyhodnotení je možné skonštatovať, že sa potvrdili niektoré úvahy z iných štúdií [6].



Obr. 4. Príspevky 3. harmonickej pre prípad 1-fázovej nabíjajúcej v EV a) v prípade pripojenia nabíjajúcej stanice v uzle NN siete b) vo vzdialenosti 1,1 km od uzla NN siete simuláciou káblového vedenia

Z Obr. 4. Je možné vidieť porovnanie príspevkov 3. harmonickej v pomerných jednotkách, v prípade umiestnenia nabíjajúcej stanice na začiatku vetvy NN vedenia a po 1,1 km úseku, ktorý je tvorený káblovým vedením. Toto meranie sa vzťahuje na prípad EV, ktoré používa pre nabíjanie iba jednu fázu, konkrétne L1. V oboch prípadoch sú priebehy pri fáze L3 posunuté nižšie. Tento jav je spôsobený v sieti mimo laboratória a pre vyhodnotenie nemá vplyv. V prípade káblového vedenia je vidieť jemný posun priebehov pre L2 a L3 k vyšším hodnotám v porovnaní so situáciou nabíjajúcej stanice

blízko uzla NN siete. Pri danom experimente bol použitý maximálny výkon jednotlivých umelých elektronických záťaží, kedy na AC strane tiekol v každej fáze prúd 7,83 A. Takýto prúd predstavuje hodnotu blížiacu sa k hraničnej hodnote 6A, ktorá je potrebná pre správne fungovanie vnútornej nabíjajúcej v automobile. V prípade, že hodnota prúdu klesne pod 6A, nabíjacia stanica sa automaticky odpája od EV. Tento jav bol preukázaný počas tohto experimentu. V prípade vyšších výkonov, ktoré sú používané pri AC nabíjaní je predpoklad, že rozdiely 3. harmonickej v jednotlivých fázach by boli väčšie.



Obr. 5 Porovnanie príspevkov 3. harmonickej v pomerných jednotkách pre a) EV nabíjané pomocou 3 fáz, b) 2 fáz a c) 1 fázy v uzle NN siete

Jednotliví výrobcovia EV využívajú 1, 2 a 3-fázové nabíjajúce integrované v EV, ktoré menia AC napätie a prúd na DC, s ktorými nabíjajú batérie. V ďalšej časti experimentu boli tieto 3 spôsoby napájania EV odsimulované. Namerané dáta je možné vidieť na Obr. 5. Ako v predošlom prípade aj v tomto sú rozdiely minimálne. V prípade 2-fázovej nabíjajúcej EV je možné vidieť väčšie rozdiely v prípade fáz L1 a L2, ktoré boli využité na napájanie EV.

VI. ZÁVER

Z predložených výsledkov je možné vyvodit' nasledujúce závery. Umiestnenie AC nabíjacej stanice, ku ktorej sa bude pripájať EV môže mať vplyv na kvalitu elektrickej energie v danej vetve siete NN, avšak obmedzenie v podobe maximálneho prúdu generovaného umelou záťažou neumožnilo v tomto experimente otestovať reálne nabíjacie výkony napr. rezidenčných wall-boxov, ktorých menovitý výkon je 11 až 22 kW (v tomto prípade bolo možné vygenerovať výkon len 5,4 kW). Z nameraných dát je zrejmé, že rozdiely sú minimálne a to v prípade rôznych typov vedení alebo filozofie nabíjáčiek v EV.

Zariadenie skonštruované pre účely tohto merania je vyhovujúce a dokáže vierohodne simulovať pripojenie EV k AC nabíjacej stanici. Je možné v ďalších prácach pomocou tohto zariadenia testovať funkčnosť nabíjacích staníc a ich reakciu na poruchové stavy počas nabíjacieho procesu.

Takto koncipované zariadenie v kombinácii s umelými elektronicky riadenými záťažami môžu byť vhodnou formou pre vytvorenie určitého etalónu, ktorý bude porovnávaný v prípade ďalších prác už s reálnymi EV pripojenými do laboratória.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola vytvorená vďaka projektu APVV-19-0576 "Sebestačnosť elektroenergetiky v podmienkach liberalizovaného trhu s elektrinou".

LITERATÚRA

- [1] A. Srivastava, M. Manas, and R.K. Dubey, "Electric vehicle integration's impacts on power quality in distribution network and associated mitigation measures: a review," *J. Eng. Appl. Sci.* 70, 32 (2023). <https://doi.org/10.1186/s44147-023-00193-w>
- [2] Ch. Kattmann, K. Rudion, S. Tenbohlen, "Detailed power quality measurement of electric vehicle charging infrastructure," *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, 2017, (1), p. 581-584, <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0834>
- [3] S. Rinaldi, M. Pasetti, M. Trioni and G. Vivacqua, "On the integration of E-Vehicle data for advanced management of private electrical charging systems," 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Turin, Italy, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969756.
- [4] M. Rata, G. Rata, C. Filote, M. S. Rapoaca, A. Gaur, C. Afanasov and A. Felseghi, "The Electrical Vehicle Simulator for Charging Station in Mode 3 of IEC 61851-1 Standard," *Energies* 2020,13, 176; doi:10.3390/en13010176
- [5] M. Gjelij, S. Hashemi, P. B. Andersen, and C. Traeholt, "Optimal infrastructure planning for EV fast-charging stations based on prediction of user behaviour." *IET Electr. Syst. Transp.*, 10: 1-12. <https://doi.org/10.1049/iet-est.2018.5080>
- [6] R. Freire, J. Delgado, JM. Santos, and AT. de Almeida, "Integration of renewable energy generation with EV charging strategies to optimize grid load balancing," 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. 2010, pp. 392-396, <https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625071>

ADRESY AUTOROV

Samuel Bucko, Technická Univerzita Košice, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, samuel.bucko@tuke.sk

Matej Kordovanik, Technická Univerzita Košice, elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 04210, Slovenská Republika, matej.kordovanik@student.tuke.sk