

Posodobitev laboratorijskih vaj s področja močnostne elektronike z vpeljavo simulacijskega programa Ansys Simplorer

Andraž Rihar¹, Peter Zajec¹, Danjel Vončina¹

¹Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana

E-pošta: andraz.rihar@fe.uni-lj.si

Upgrading the laboratory practice on power electronics by introduction of Ansys Simplorer simulations

Abstract. The paper presents a concept of upgrade to the laboratory practice curriculum in the field of power electronics. The existing curriculum was closely reviewed, compared to the concepts from existing literature, and intensively upgraded by introduction of Ansys Simplorer-based simulations. This enabled the students to approach individual topics more gradually, reducing the gaps between the behavior of ideal and realistic power electronics circuits. It seems that the students find the new approach more gradual and beneficial, enabling them to improve their understanding of specific phenomena and to master the topics of power electronics with ease and satisfaction.

1 Uvod

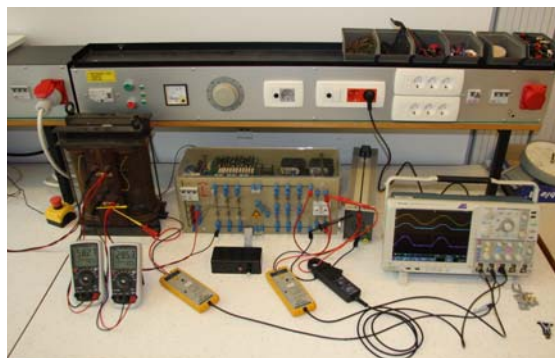
Že od nekdaj velja, da za usvojitev znanja (še posebej s področja tehničnih ved), nista dovolj le premlevanje in študij teoretičnih vsebin, temveč sta nujno potrebna tudi praktično delo in spoznavanje specifičnih pojavov in podrobnosti iz prve roke. Povsem enako velja tudi za področje močnostne elektronike, s katerim se pedagoško in raziskovalno ukvarjamo v Laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko (LRTME). Študentje Fakultete za elektrotehniko se s to tematiko in z osebjem laboratorija med drugim srečajo v okviru predmeta Energetska elektronika, ki se izvaja v sklopu smeri Mehatronika in energetika v 3. letniku univerzitetnega študija [1].

Namen predmeta je študentom približati področje pretvarjanja električne energije iz ene oblike v drugo s pomočjo elektronskih naprav in pripadajoče koncepte, ki so prisotni na izredno širokem obsegu električnih moči, torej vse od mili do megawattov. V okviru predmeta se študentje dodobra spoznajo: i) s področjem klasičnih in modernih polprevodniških stikal, ii) s principi zaščite in hlajenja, iii) z različnimi usmerniški in presmerniški vezji ter pripadajočimi krmilnimi principi in iv) s karakteristikami moči v elektronskih napravah.

Vsebine močnostne elektronike se na Fakulteti za elektrotehniko študentom podajajo že vrsto let, skozi zgodovino pa je bil predmet deležen številnih sprememb v smeri nadgradnje učnega procesa. V osnovi je predmet razdeljen na dva sklopa. V okviru predavanj (4 ure tedensko) so študentom podane teoretične vsebine, ki so redno podprte z računskimi zgledi oziroma

avditornimi vajami. Teoretične in računske vsebine so nato ločeno, vendar tesno prepleteno, dodatno podprte z namenskimi laboratorijskimi vajami (2 uri tedensko v manjših skupinah).

Študentje na predavanjih tako najprej na primer prestudirajo delovanje usmerniškega vezja z idealnimi komponentami, nato naredijo nekaj računskih zgledov, s katerimi dodatno utrdijo razumevanje delovanja in določene podrobnosti. Končno študentje na laboratorijskih vajah s pomočjo namenskega laboratorijskega modela (slika 1) zgradijo izbrano usmerniško vezje in opravijo več meritev, s katerimi preverijo ustreznost usvojenega znanja in se podrobneje spoznajo še z določenimi pojavi in vplivi realnih komponent oziroma realnih vezij.



Slika 1. Eksperimentalna postavitev enofaznega enohodnega tiristorskega usmerniškega vezja z R bremenom. Od leve proti desni so prikazani transformator, laboratorijski model s tiristorji in diodami, bremenski upor in osciloskop.

Dolga leta je opisan koncept deloval izvrstno, sčasoma pa se je pokazalo, da je med podanimi teoretičnimi vsebinami (na osnovi idealnih komponent) in praktičnim delom z realnimi vezji zaradi specifičnosti področja (komponente za velike moči, modularen laboratorijski model, itn.) vseeno nekoliko prevelik razkorak in bi bilo smiselno učni proces posodobiti oziroma nadgraditi. Študentje med laboratorijsko vajo namreč precej časa porabijo za izgradnjo samega vezja, ostane pa jim premalo časa za poglobljeno razumevanje delovanja in spoznavanje posameznih pojavov močnostne elektronike.

S pojavom zmogljivejših računalnikov in naprednih simulacijskih programov, ki omogočajo podrobne simulacije najrazličnejših tematik, smo se izvajalci predmeta odločili, da vaje prenovimo in nadgradimo v smeri glajenja prehoda med teorijo in prakso v smislu kombinacije laboratorijskih vaj s simulacijami.

2 Pregled področja

Izveden je bil pregled področja uporabe simulacijskih programov v namen poučevanja tematik močnostne elektronike po svetovnih univerzah. Pregled literature pokaže, da se izvajalci predmetov odločajo za najrazličnejše pristope k poučevanju močnostne elektronike [2]. Izredna raznovrstnost se pokaže tudi na področju uporabljenih simulacijskih programov. Uporaba simulacij lahko namreč veliko pripomore k boljšemu razumevanju in utrjevanju snovi, saj dobro dopolnjujejo prednosti praktičnih laboratorijskih vaj [3]. Žal laboratorijske vaje povsod niso samoumevne, temveč so celo v nekaterih razvitejših državah le izjema, kot sledi iz [4], kjer avtor ugotavlja, da v ZDA le približno 46 % univerz študentom omogoča praktične vaje s področja močnostne elektronike.

Izredno pogosta je uporaba širše poznanih, komercialnih simulacijskih programov, ki so že dodobra uveljavljeni na drugih področjih elektrotehnike. V namen poučevanja močnostne elektronike je zelo pogosta uporaba programskega okolja MATLAB/Simulink, ki lahko nudi prijetno uporabniško izkušnjo, ima enostaven uporabniški vmesnik in tudi dobro povezljivost s preostalimi programskimi orodji [5]. Izvajalci uporabljajo bodisi osnovne knjižnice [6,7,8], bodisi pripravijo lastne pakete knjižnic komponent [9]. Pogosto zastopane so tudi različne izvedbe Spice simulacijskih programov, kot sta LTSpice v Palestini [10] ter Pspice v ZDA [11], Braziliji [12] in drugod [13,14].

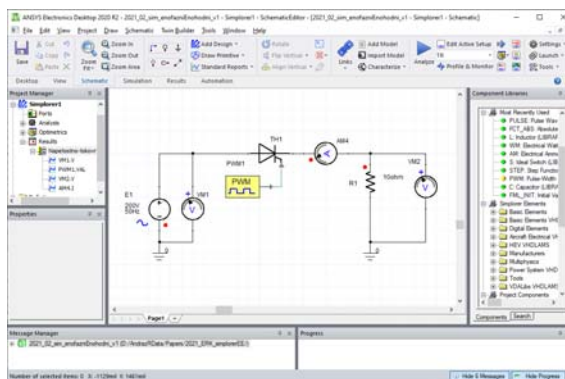
Simulacijske vaje so lahko tudi dobra predpriprava na laboratorijske vaje. Na univerzi v Illinoisu tako študentje za pripravo simulacij v Spice, PSIM, Simulinku ali drugih programih dobijo dodatne točke za predpripravo na laboratorijske vaje [15].

Predvsem v državah severne Evrope [16], v nekaterih državah ZDA (Minnesota) [17] in v Čilu [18] se poslužujejo uporabe programskega orodja PLECS, ki z obširnimi knjižnicami komponent omogoča napredne analize elektromagnetike, termike in mehanike [19]. Ostali programi, kot so PSIM, PWSIM, Scilab se pojavljajo, vendar so manj pogosto uporabljani.

Še en izvrsten program, ki omogoča analizo raznovrstnih vidikov močnostne elektronike predstavlja platforma Ansys Multiphysics [20], ki jo s pridom uporabljajo kolegi z Univerze v Zagrebu [21]. Bistvene prednosti programa Ansys Simplorer so enostavnost uporabe, smiselno razporejene knjižnice idealiziranih, statičnih in dinamičnih komponent, kot tudi dobra povezljivost z drugimi programi ter možnost kosimulacij [22].

3 Posodobitev izvedbe laboratorijskih vaj

Po pregledu relevantne literature s področja smo se izvajalci odločili, da bomo laboratorijske vaje nadgradili s pomočjo simulacijskega orodja Ansys Simplorer in sicer iz več razlogov: i) enostavnost uporabe, ii) dobre izkušnje kolegov z univerz iz soseščine, iii) laboratorij LRTME ima že zakupljeno ustrezno število raziskovalnih in študentskih licenc in iv) dober potencial programa za uporabo pri zaključnih delih magistrskega študija.

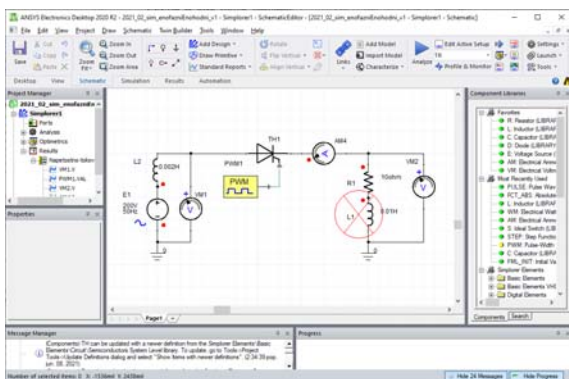


Slika 2. Simulacijski model enofaznega enohodnega usmerniškega vezja s tiristorjem in R bremenom.

V nadaljevanju smo najprej pregledali obstoječi razpored laboratorijskih vaj, nato pa smo ga temeljito nadgradili v smislu boljše povezljivosti in dodatne postopnosti pri spoznavanju vsebin močnostne elektronike. Že pripravljeno študijsko gradivo je bilo združeno z novimi vsebinami na temo simulacij v obliki skripte, ki jo študentje prejmejo na začetku študijskega leta in jim med semestrom služi kot pomoč ob spoznavanju simulacijskega programa ter za lažje izvajanje posameznih laboratorijskih vaj.

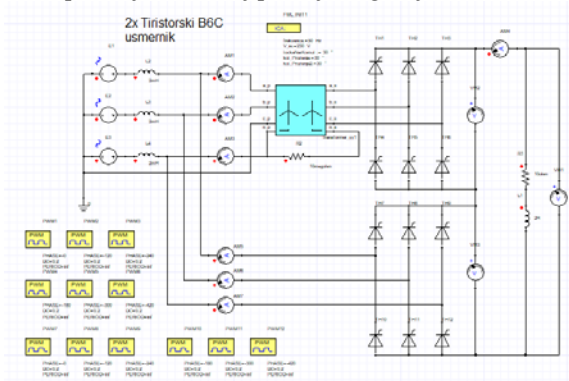
Na začetku semestra študentje dobijo možnost namestitve licenciranega programa na svoje osebne in prenosne računalnike, kar jim omogoča ne le uporabo za dodatno utrjevanje snovi, temveč tudi uporabo za najrazličnejše šolske in druge projekte. Dodatno si lahko s programom pomagajo tudi pri reševanju domačih računsko-simulacijskih nalog. V sklopu prvega obiska v laboratoriju si s študenti s pomočjo navodil iz gradiva ogledamo uvodno simulacijo enostavnega RLC vezja, ki nam omogoči spoznavanje programskega orodja in različnih tipov analiz (tranzientna, izmenična in parametrična analiza). Podani primer predstavlja izvrsten prehod s področja signalne analize členov iz predmeta predhodnega semestra (Regulacijska tehnika) v področje analize napetostno-tokovnih razmer.

Navedenemu primeru uvodne vaje sledi večje število simulacijskih in laboratorijskih vaj, s katerimi si sosedno ogledamo preprosta in kompleksnejša enofazna usmerniška vezja, kot so enofazno enohodno vezje z diodo/tiristorjem (slika 2), vezje s srednjim odcepom M2 ter mostično vezje B2. V sklopu simulacij z idealiziranimi komponentami se osredotočimo na princip delovanja, na pogoje za ustrezno delovanje polprevodniških stikal in na porazdelitev obremenitve posameznih stikal. Simulacije študentom omogočijo nadgradnjo znanja o usmerniških vezjih z idealnimi komponentami, v sklopu laboratorijskih vaj pa lahko več časa posvetimo spoznavanju in analizi pojavov realnih vezij, kot je na primer napetostni udar zaradi stresanih induktivnosti transformatorja, itn. Ko študentje realne pojave spoznajo in jih razumejo, imajo kasneje tudi možnost nadgradnje svojih simulacijskih modelov z upoštevanjem vplivov realnejših komponent. V tem smislu lahko na primer v vezje vključijo še stresane induktivnosti (slika 3).



Slika 3. Simulacijski model enofaznega enohodnega usmerniškega vezja s tiristorjem, R bremenom in stresano induktivnostjo napajalnega vira.

Na primeru enofaznih vezij si študentje ogledajo posebnosti asimetrične magnetne obremenitve usmerniških transformatorjev in nato preidejo na trifazna usmerniška vezja, ki omogočajo bolj simetrično obremenitev in večje moči. Ogledajo si nekrmljena, delno krmiljena in polno krmiljena trifazna tripulzna (M3) in šestpulzna (B6) usmerniška vezja in spoznajo prednosti ter slabosti posameznih izvedb (kompleksnost, frekvenca in iznos valovitosti izhodnega toka, itn.). V sklopu dela na laboratorijskem modelu se lahko poleg utrjevanja znanja delovanja vezij dodatno samostojno posvetijo na primer pojavu komutacije toka in vplivu različnih parametrov na kot prekrivanja (karakteristike bremena, kot proženja, itn.). Ponovno lahko v svoje simulacijske modele vključijo komutacijske dušilke in si tudi s pomočjo simulacij potrdijo dognanja.



Slika 4. Simulacijski model trifaznega dvanajstpulznega usmerniškega vezja s tiristorji, RL bremenom in stresano induktivnostjo napajalnega vira.

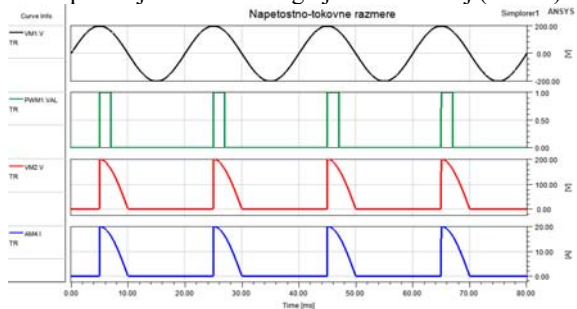
Končno si s pomočjo simulacij ogledajo še delovanje vezave dveh B6C vezij (slika 4), v okviru laboratorijskega obiska pa si ogledajo tudi vplive različnih principov zmanjševanja krmilne jalove moči, kot so uporaba prostotečne diode, prilagajanja iznosa napajalne napetosti in zaporednega proženja.

Proti koncu semestra se preusmerijo tudi na področje enosmernih presmernikov in si ogledajo uporabo pretvornika navzdol-navzgor za vodenje enosmernega motorja s trajnimi magneti.

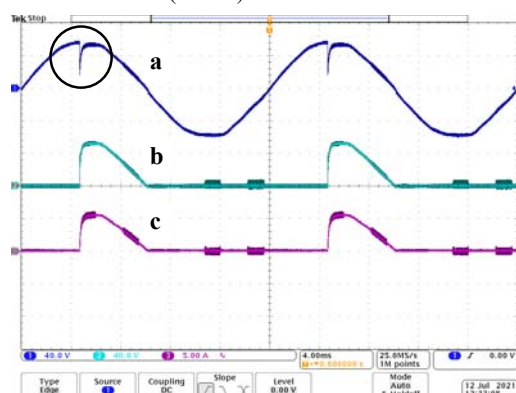
Tekom semestra se izvajalci laboratorijskih vaj s profesorjem, ki teoretične vsebine predava, neprestano usklajujemo in tako zagotavljamo ustrezno povezanost oziroma prepletenost podanih vsebin.

4 Rezultati

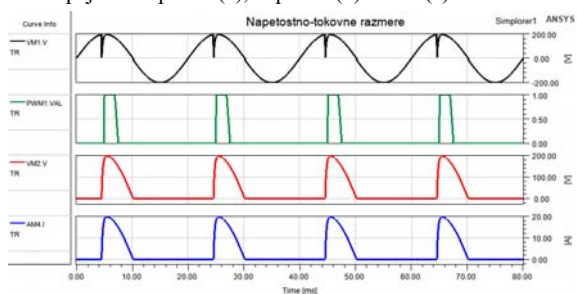
Simulacija idealnega enofaznega enohodnega usmerniškega vezja omogoča dobro razumevanje delovanja vezja in potek bistvenih veličin (slika 5) medtem, ko meritve realnega vezja izpostavijo pojav napetostnega udara (slika 6), ki ga je možno analizirati tudi s pomočjo ustrezno nadgrajenih simulacij (slika 7).



Slika 5. Napetostno-tokovne razmere v simulaciji idealiziranega enofaznega enohodnega usmerniškega vezja z R bremenom. Prikazani so napajalna napetost (VM1.V), prožilni signal (PWM1.VAL), napetost (VM2.V) ter tok (AM4.I) na bremenu.

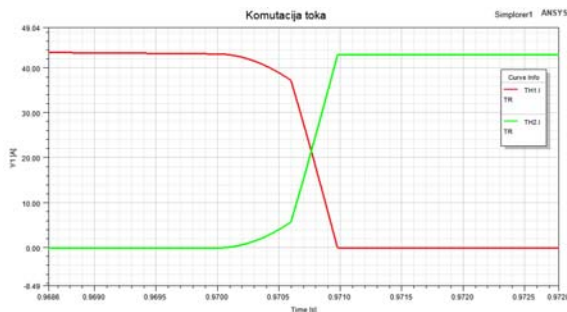


Slika 6. Napetostno-tokovne razmere v realnem enofaznem enohodnem usmerniškem vezju z R bremenom ob kotu proženja 90° – pojav napetostnega udara (črn krog). Prikazani so napajalna napetost (a), napetost (b) in tok (c) na bremenu.

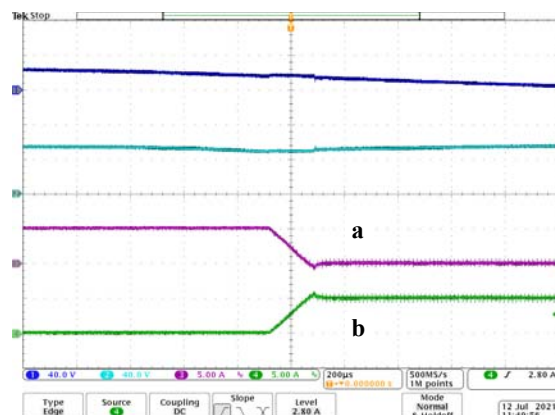


Slika 7. Napetostno-tokovne razmere v simulaciji enofaznega enohodnega usmerniškega vezja z dodano stresano induktivnostjo na napajalnem delu – pojav napetostnega udara. Prikazani so napajalna napetost (VM1.V), prožilni signal (PWM1.VAL), napetost (VM2.V) ter tok (AM4.I) na bremenu.

Na primeru večfaznih večpulznih usmerniških vezij si je možno v simulacijah ogledati pojav komutacije toka oziroma kota prekrivanja (slika 8), kar nato potrdimo tudi z meritvami realnega vezja (slika 9).



Slika 8. Pojav komutacije toka med sosednjima tiristorjema v simulaciji trifaznega dvanajstpulznega usmerniškega vezja.



Slika 9. Komutacija toka med sosednjima tiristorjema (a in b) v realnem trifaznem dvanajstpulznem usmerniškem vezju.

5 Sklepne ugotovitve

Članek predstavlja koncept posodobitve laboratorijskih vaj s področja močnostne elektronike s pomočjo simulacij in pri tem izpostavlja bistvene prednosti opisanega pristopa, kot so večja postopnost, boljše razumevanje in večja samostojnost študentov.

Ustreznost učnega procesa je relativno težko kvantitativno oceniti, vseeno pa pedagogi na podlagi večletnih izkušenj in subjektivnih ocen ugotavljamo, da se opisana posodobitev študentom dopade in sklepamo, da se v taki obliki vaje študentom res zdijo enostavnejše, postopnejše in razumljivejše.

Zadnjih nekaj let ob koncu semestra študentje rešujejo tudi obvezen kviz na temo laboratorijskih vaj. Na podlagi zelo dobrih doseženih rezultatov pedagogi sklepamo, da se študentom opisani pristop dopade in študentje torej osvojijo ustrezno mero znanja ter veščin.

V sklopu nadaljnjega dela so predvidene dodatne posodobitve laboratorijskih vaj z novimi simulacijskimi izzivi, dodatnimi razlagami in sprotnim, krajšim preverjanjem znanja.

Literatura

- [1] https://www.fe.uni-lj.si/izobrazevanje/1_stopnja_uni/elektrotehnika/predmeti/2009011211524199/, dostopano dne: 8.6.2021.
- [2] U. Drofenik, J.W. Kolar. Survey of modern approaches of education in power electronics. V: *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No. 02CH37335)*. Vol. 2, str. 749-755, 2002.
- [3] P. Cepeda, P. Ponce, A. Molina. Simulation to implementation as good practices for teaching power

electronics to undergraduate students: fuzzy sliding mode control for DC motors. *Advances in Power Electronics*. ID 697263, str. 1-9, 2014.

- [4] F. Misoc. An overview of existing power electronics courses (AC 2012-5554). *American Society for Engineering Education*. Str. 25.4.1 – 25.4.22, 2012.
- [5] <https://www.mathworks.com/>, dostopano dne: 8.6.2021.
- [6] https://jcboseust.ac.in/electrical/images/lab/pe_lab_manual.pdf, dostopano dne: 8.6.2021.
- [7] <https://www.vvitengineering.com/lab/EE6611-POWER-ELECTRONICS-AND-DRIVES-LAB.pdf>, dostopano dne: 8.6.2021.
- [8] <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/power-electronics.html>, dostopano dne: 8.6.2021.
- [9] A. Nouh, M.F. Khatab. Laboratory Simulations Packet for Power Electronics Circuits: Teaching and Training. V: *Proceedings of the 6th International Conference on Engineering & MIS*. Str. 1-8, 2020.
- [10] <https://eng.iugaza.edu.ps/Portals/113/elec-dep/files/Power%20Electronics%20Laboratory%20Manual%20.pdf>, dostopano dne: 8.6.2021.
- [11] N. Mohan, W.P. Robbins, P. Imbertson, T.M. Undeland, R.C. Panaitescu, A.K. Jain, T. Begalke. Restructuring of first courses in power electronics and electric drives that integrates digital control. *IEEE transactions on power electronics*, 18(1), str. 429-437, 2003.
- [12] J.A. Pomilio. Power Electronics Lab: Converging Knowledge and Technologies. V: *15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference*. Str. 1-6, 2019.
- [13] H. Fernández, U.P. Ordaz. Power electronics laboratory: simulation tools, power converters and tests bench based on industrial applications. *Simulation*. Vol. 5, str. 6, 2015.
- [14] <http://mist.ac.in/pdfs/LabManuals/EEE/PowerElectronicsandSimulationLab.pdf>, dostopano dne: 8.6.2021.
- [15] https://ceme.ece.illinois.edu/files/2020/08/ECE469_V3.4Aug2019Draft3.pdf, dostopano dne: 8.6.2021.
- [16] https://portal-int.taltech.ee/sites/default/files/2020-02/EE_ins_Seadmete_juhendmaterjal_EEV5050.pdf, dostopano dne: 8.6.2021.
- [17] http://people.ece.umn.edu/groups/power/labs/pspice_pe/PLECS_Lab_Manual.pdf, dostopano dne: 8.6.2021.
- [18] <https://www.e2tech.cl/teaching/power-electronics-i/simulation-and-exercises/>, dostopano dne: 8.6.2021.
- [19] <https://www.plexim.com/products/plecs>, dostopano dne: 8.6.2021.
- [20] <https://www.ansys.com/>, dostopano dne: 8.6.2021.
- [21] Z. Jakopovic, V. Sunde, Z. Bencic. Undergraduate power electronics laboratory-applying TSMST method. *Journal of Power Electronics*. 10(6), str. 621-627, 2010.
- [22] A. Rihar, P. Zajec, D. Vončina. Cosimulation of ansys simplorer and MATLAB/Simulink. V: *19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics*. Str. 313-317, 2017.