



PSSOH²⁰²⁴

PRIMENA SLOBODNOG SOFTVERA I OTVORENOG HARDVERA



ZBORNİK SEDME KONFERENCIJE SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM

BEOGRAD, OKTOBAR 2024.

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet



Zbornik sedme nacionalne konferencije sa međunarodnim učešćem pod nazivom

Primena slobodnog softvera i otvorenog hardvera PSSOH 2024

U Beogradu, juna 2025. godine

Naučni odbor / Scientific Board

Vanr. prof. Miloš Cvetanović
Prof. Nadica Miljković
Vanr. prof. Vladimir Milovanović
Prof. Jaka Sodnik
Prof. Gordana Gardašević
Viši dipl. bibliotekar Milica Ševkušić
Dipl. inž. Dragan Satarić
Prof. Branislav Gerazov
MS. Biljana Kosanović
Vanr. prof. Zaharije Radivojević
Prof. Miloš Daković
Nauč. savetnik Miloš Đorđević

Urednički i organizacioni odbor / Editorial and Organizational Board

Prof. Nadica Miljković
Vanr. prof. Miloš Cvetanović
Doc. Miloš Bjelić

Spoljni organizacioni odbor / External Organizational Board

Dipl. psihol. Đurđa Timotijević
Prof. Iris Žeželj
Nauč. savetnica Ljiljana Lazarević
Viši dipl. bibliotekar Milica Ševkušić
Prof. Platon Sovilj
Dipl. inž. Bojana Satarić
Viša nauč. saradnica Dejana Pavlović

Logo and cover designed by / Logo i naslovnu stranu dizajnirala je

Dipl. inž. Dragica Nikolić

Organizacioni odbor / Organisational Board

M.Sc. Nikolina Škorić, Chairperson
Dipl. inž. Nikola Todorović, Chairperson
Dipl. inž. Dragica Nikolić
Dejan Petković
M.Sc. Živana Garašević
Dipl. inž. Mihajlo Pavlović
M.Sc. Pavle Radojković
M.Sc. Ilija Tanasković
Dipl. Inž. Marko Mijailović
Dipl. Inž. Tamara Maravić
Maja Škorić

Izdavači / Publishers

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet /
University of Belgrade – School of Electrical Engineering i / and
Akademska Misao / Academic Mind

Štampa / Printed by

Akademska Misao / Academic Mind

ISBN: 978-86-6200-066-8

Tiraž / Number of copies: 35

Mesto i godina izdanja / Place and year of publication

Beograd, 2025. / Belgrade, 2025

NAPOMENA: Za dizajn korica, korišćenai su DALL-E 3 i Chat GPZ-4o u kombinaciji sa fotografijom i manuelno odabranom paletom boja. / NOTE: For the cover design, DALL-E 3 and Chat GPT-4o are used in combination with photography and manually selected color palette.

University of Belgrade – School of Electrical Engineering



Proceedings of the Seventh National Conference with International Participation titled

Application of Free Software and Open Hardware PSSOH 2024

In Belgrade, June 2025.

Predgovor sedmoj PSSOH konferenciji

Na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, 12. oktobra 2024. godine u amfiteatru "Nikola Tesla" br. 56, održana je 7. po redu dvojezična nacionalna PSSOH konferencija sa međunarodnim učešćem (Primena slobodnog softvera i otvorenog hardvera). Veoma smo zahvalni svim predavačima, jer smo uz njihovo ljubazno odobrenje, bili u prilici da snimke predavanja i odgovore na pitanja postavimo na sajtu konferencije, kao i na zvaničnom YouTube kanalu PSSOH konferencije, za sve one koji nisu bili u prilici da dođu na dan konferencije.

U 2024. godini, sve teme predavanja po pozivu su bile posvećene slobodnom softveru otvorenog koda (eng. *Free and Open Source Software*, skraćano FOSS) u raznovrsnim oblastima: energetski pretvarači i pogoni, optička spektroskopija, vojna i civilna avijacija, kao i uređivanje audio i video zapisa. Plenarno predavanje je u 2024. godini bilo posvećeno temi meta-nauke i naučnom pristupu, koji omogućava da naučnoistraživački rad postane kvalitetniji, a posebno sa akcentom na primenu principa otvorene nauke i saradnje u nauci. Uz kašnjenje, objavljujemo Zbornik, kako bi: 1) vreme između konferencije i pripreme Zbornika bilo posvećeno javnoj recenziji radova, koji su dostupni u Zenodo repozitorijumu i 2) da sebi damo vremena da odgovornom poslu pripreme Zbornika posvetimo dovoljno vremena. Iako je Zbornik i ove godine objavljen sa kašnjenjem, svi radovi pisani u celini (po pozivu) su bili dostupni na Zenodo repozitorijumu u oktobru 2024. godine u dijamantskom pristupu (publikacije postavljene u otvorenom pristupu bez ikakve nadoknade, odnosno bez troškova za objavljivanje i pristup sadržaju).

Od osnivanja, 2018. godine, PSSOH konferencija je zasnovana na volonterskom radu svih učesnika (recenzenti, urednički odbor i organizacioni odbor), te se registracija za učešće i kotizacija za autore i plenarne predavače ne naplaćuju. Zato, ogromnu zahvalnost dugujemo svim učesnicima za ljubazan doprinos kontinuiranom održavanju PSSOH konferencije sve ove godine. Posebno, zahvalni smo svim predavačima, a pre svega plenarnoj predavačici naučnoj savetnici dr Ljiljani B. Lazarević, koja je održala veoma zanimljivo predavanje na temu kvaliteta naučnih istraživanja, što je privuklo veliki interes ne samo istraživača, već i studenata, koji planiraju da se bave naučnim radom.

Post-konferencijske radionice su u 2024. godini, održane 26. oktobra, kada su profesor dr Miloš D. Đurić i Marko Mijailović, student Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu, izdvojili vreme da podele svoje veštine sa prijavljenim učesnicima u računarskim učionicama na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu. Svi učesnici radionica su dobili elektronske sertifikate, kao potvrdu da su pohađali radionice. Profesor Đurić je predstavio metode za obradu prirodnih jezika primenom alata u programskom jeziku Pajton, a materijali sa radionice su dostupni na veb stranici PSSOH konferencije. Radionica, koju je pripremio student Marko Mijailović je nastala u saradnji sa Udruženjem studenata elektrotehnike Evrope u Beogradu (eng. *Electrical Engineering Students' European Association Local Committee Belgrade*, skraćeno EESTEC LK u Beogradu), koja je od 2024. godine postala i zvanični partner PSSOH konferencije. Primena Gita u praksi za efikasno upravljanje kodom, koju je pripremio Marko Mijailović je privukla veći broj učesnika, a posebno studenata, koji su imali prilike da savladaju tehnike rada u ovom alatu.

Kao i ranijih godina, proverili smo koliki broj udžbenika je podeljen u slobodnom pristupu sa studentima Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu i ponudili svim autorima da svoje udžbenike predstave u Zborniku PSSOH konferencije, te ovaj Zbornik sadrži promociju otvorenih nastavnih materijala.

Iskoristili bi smo ovu priliku da izrazimo bezgraničnu zahvalnost za kontinuiranu i velikodušnu podršku Akademске Misli iz Beograda, jer bez njih štampana verzija ovog Zbornika, ne bi bila moguća. Dodatno, Varius kompanija je ove godine, pokrila troškove štampanja majica sa PSSOH logom i posluženje za predavače i učesnike konferencije, na čemu smo vrlo zahvalni. Naročito bi smo se zahvalili Nikolini Škorić, studentkinji doktorskih studija Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu na svom predanom radu i entuzijazmu u organizaciji konferencije, kao i na rukovođenju Organizacionim odborom, koji čine studenti i

diplomci Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu. Bez podrške Organizacionog odbora u kome su neki članovi već veoma dugo sa nama ne bi smo mogli da zamislimo održavanje PSSOH konferencije: dipl. inž. Nikola Todorović (koji je ove godine učestvovao u vođenju Organizacionog odbora zajedno sa Nikolinom Škorić), Dejan Petković, student osnovnih studija, dipl. inž. – master Živana Garašević, Mihajlo Pavlović, student master studija, dipl. inž. – master Pavle Radojković, Ilija Tanasković, student doktorskih studija, Marko Mijailović, student master studija, Tamara Maravić, studentkinja master studija i Maja Škorić, studentkinja osnovnih studija.

U duhu slobodnog softvera i uz zahvalnost velikom prijatelju PSSOH konferencije Italu Vinjoliju, ovaj Zbornik smo pripremili u LibreOffice okruženju. Takođe, u duhu ravnopravnosti, koja predstavlja jednu od osnova PSSOH konferencije, Uvodna reč na srpskom jeziku sadrži rodno-ravnopravni jezik, osim u pojedinim delovima, gde se pojmovi predstavljeni u muškom gramatičkom rodu se podjednako odnose na muški i ženski rod.

U Beogradu, 11. juna 2025. godine

Urednički odbor PSSOH konferencije

Foreword to the Seventh PSSOH Conference

The 7th bilingual national PSSOH conference with the international participation on application of free software and open hardware (in Serbian: *Primena Slobodnog Softvera i Otvorenog Hardvera*) was held at the University of Belgrade – School of Electrical Engineering on October 12, 2024, in the "Nikola Tesla" amphitheater No. 56. We are immensely grateful to all invited speakers for granting us their kind permissions to post the video recordings of the lectures and answers to the questions on the conference website, as well as on the official YouTube channel of the PSSOH conference, for all who were unable to come in person.

In 2024, all topics of the invited lectures were dedicated to the Free and Open Source Software (FOSS) in diverse areas: energy converters and drives, optical spectroscopy, military and civil aviation, as well as for editing audio and video recordings. The plenary lecture in 2024 was dedicated to the meta-science and ways to improve the quality of scientific research, with a particular emphasis on the application of the open science principles and collaboration in research. We are publishing the Proceedings with a delay with two goals: 1) to dedicate the time between the conference and the preparation of the Proceedings to a public review of the papers, which are available in the Zenodo repository, and 2) to give ourselves a freedom to devote sufficient time to the responsible task of preparing the Proceedings. Although the Proceedings are published with an extensive delay this year, all papers for invited lectures were available on the Zenodo repository in October 2024 in the Diamond Open Access (DOA – publications freely available without any fee, i.e., free of charge publication and free of charge access to the content).

Since its establishment in 2018, the PSSOH conference has been based on the voluntary work of all participants (Reviewers, as well as members of the Editorial Board and Organizing Committee), so registration for participation and fees for authors and plenary speakers have never been charged. Therefore, we owe an immense appreciation to all conference participants for their kind contribution, which was crucial for the continuation of the PSSOH conference all these years. We would like to especially express our gratitude to all lecturers, and above all to the plenary lecturer, Dr. Ljiljana B. Lazarević, Principal Research Fellow for delivering a captivating lecture on the quality of scientific research, which attracted prominent interest not only from researchers, but also from students who plan to engage in scientific work.

Post-conference workshops were held on October 26, 2024 when Professor Dr. Miloš D. Đurić and Marko Mijailović, a student at the University of Belgrade – School of Electrical Engineering, devoted their time to share skills during the hands-on events held in the computer classrooms at the School of Electrical Engineering. All workshop participants received electronic certificates as a confirmation of their attendance. Professor Đurić presented methods for natural language processing using tools in the Python programming language – the workshop materials are available on the PSSOH conference website. The workshop, prepared by student Marko Mijailović was created in collaboration with the student organization EESTEC LC in Belgrade (Electrical Engineering Students' European Association Local Committee Belgrade), which has become an official partner of the PSSOH conference in 2024. The application of Git for effective code management, prepared by Marko Mijailović, attracted a large number of participants, especially students, who had the opportunity to master the techniques of working in Git.

Alike in previous years, we checked how many textbooks were distributed in open access to students at the University of Belgrade – School of Electrical Engineering, and offered to all Authors to present their textbooks in the PSSOH Proceedings, so this Proceedings contains the promotion of open educational materials.

We would like to take this opportunity to express our boundless gratitude for the continuous and generous support of Academic Mind from Belgrade, as without them the printed version of this Proceedings would not be possible. Additionally, this year, the Varius company covered the costs of printing T-shirts with the PSSOH logo and catering for all conference participants, for which we are tremendously grateful. Moreover, we would especially like to thank Nikolina Škorić, a PhD student at the University of Belgrade – School of Electrical Engineering, for her dedicated work and enthusiasm in organizing the conference, as well as for

leading the Organizing Committee, which consists of students and graduates of the University of Belgrade – School of Electrical Engineering. Without the support of the Organizing Committee members, some members of which have been with us for a very long time, we would not be able to imagine the management of the PSSOH conference: dipl. eng. Nikola Todorović (who lead the Organizing Committee this year together with Nikolina Škorić), B.Sc. student Dejan Petković, M.Sc. Živana Garašević, M.Sc. student Mihajlo Pavlović, M.Sc. Pavle Radojković, PhD student Ilija Tanasković, M.Sc. student Marko Mijailović, M.Sc. student Tamara Maravić, and B.Sc. student Maja Škorić.

In the spirit of free software and with exceptional gratitude to a great friend of the PSSOH conference, Italo Vignoli, we have prepared this Proceedings in the LibreOffice environment. Also, in accordance with the principles of gender equality, which is one of the foundations of the PSSOH conference, the Foreword in the Serbian language contains gender-equal language, except in certain parts, where terms presented in the masculine grammatical gender refer equally to the masculine and feminine genders.

In Belgrade, June 11, 2025.

Editorial Board of the PSSOH Conference

Sadržaj / Table of Contents

Plenarna sesija / Session

Meta-science: How to improve science using science	6
--	---

PSSOH sesija sa predavanjima po pozivu / PSSOH Session With Invited Lectures

Switched reluctance motor drive simulation using open-source software	7
Review of open software for applications in optical spectroscopy	25
Analiza parametara leta i pokreta oka u izmenjenim uslovima simulacije korišćenjem slobodnog softvera – Eksperimenti sa primenom koncepta digitalne obuke i selekcije pilota	30
Pregled odabranih alata slobodnog softvera za uređivanje video i audio zapisa	47

Spisak autora(ki) / List of Authors	55
---	----

Otvoreni nastavni materijali / Open Educational Resources	56
---	----

META-SCIENCE: HOW TO IMPROVE SCIENCE USING SCIENCE

Ljiljana B. Lazarević

Institute of Psychology and LIRA lab, Faculty of Philosophy, University of Belgrade, 11000
Belgrade, Serbia

e-mail: ljiljana.lazarevic@f.bg.ac.rs

ABSTRACT FOR THE PLENARY LECTURE

Evidence of low reproducibility of scientific findings accumulated across scientific fields. These concerns increased the need to develop and improve the field of meta-science - a discipline investigating scientific processes, methods, and interventions aimed at improving science. In the talk, I outline the current state of affairs in the meta-research, focusing on the reproducibility of findings in different scientific fields (e.g., economy, philosophy, medicine, pharmacology, psychology). I present an overview of the most important collaborative efforts from psychology (Reproducibility Project: Psychology, Many Labs 2, Many Labs 3, Many Labs 5) that offered important insights about the factors influencing the reproducibility of scientific findings. I also present the results of the innovative approach based on prediction markets used to estimate the replication rates across scientific fields. Lastly, I discuss efforts made to offer researchers incentives for practicing open science and empirical results evaluating their effectiveness in the improvement of science.

Keywords: meta-science, reproducibility, replicability, open science.

SWITCHED RELUCTANCE MOTOR DRIVE SIMULATION USING OPEN-SOURCE SOFTWARE

Bogdan Brković¹, Milovan Majstorović¹, Mateja Ivanović¹, Mladen Terzić¹

1: University of Belgrade, School of Electrical Engineering, 11000 Belgrade, Serbia
e-mails: brkovic@etf.bg.ac.rs, majstorovic@etf.bg.ac.rs, im225002p@student.etf.bg.ac.rs,
terzic@etf.bg.ac.rs

Abstract

The switched reluctance motor is a viable magnet-free option for low and medium power applications. Current challenges limiting widespread application are the inherent noise and vibration issues. Mitigation of these problems while retaining the required performance can be achieved by improving the motor design and control. The research presented in this paper is aimed at developing a detailed simulation model of the switched reluctance motor drive system. This process includes: motor parameter identification based on finite-element analysis, composition of the joined model of the motor and dedicated power converter, automatic simulation running, output data logging, and processing. The entire procedure is conducted using open-source software platforms. The developed modelling and simulation approach enables the determination of motor and converter performance indicators, including a detailed calculation of semiconductor losses and temperature rise. Furthermore, this provides a foundation for applying design and control optimization algorithms to achieve enhanced performance characteristics.

Keywords: switched reluctance motor, power converter, drive, modelling, simulation.

1 Introduction

The switched reluctance motor (SRM) is recognized as a topology of interest in low and medium power applications such as home appliances and small electric vehicles [1–4]. Compared to its main counterpart, the permanent magnet synchronous machine (PMSM), the SRM has a distinct advantage of being a magnet-free device. This feature makes the SRM more cost-effective and eco-friendly, considering the volatility of the permanent magnet market and the devastating procedure of rare-earth material extraction. The major drawbacks of the SRM are noise and vibration inherently related to the double-salient structure [5]. To overcome these challenges, improved motor and converter design and control approaches are required.

The SRM design procedure is based on analytical calculations or finite element analysis (FEA). The two approaches can be combined to take advantage of the FEA accuracy and the time-efficiency of the analytical approach. This is commonly done by using FEA to obtain flux and torque lookup tables which are then used to compose the SRM dynamic model. This model can then be used to simulate SRM operation under various conditions using any software package equipped with standard non-linear differential equation solvers.

The SRM can be supplied exclusively from a dedicated power converter. Multiple topologies have been proposed over the years [6, 7]. The most commonly employed topology is the Asymmetric Half-Bridge Converter (AHBC), due to its relatively low cost, control flexibility, and simplicity.

A simulation of the SRM drive is required in the development stage to assess the drive performance under various operating modes. Both the motor and converter need to be simulated in sufficient detail within a reasonable time frame. As previously stated, the motor can be simulated in great detail using FEA software, however such simulations are by no means time-efficient. On the other hand, there is a wide array of circuit simulation software packages. Notably, LTspice is a powerful open-source simulation tool incorporating actual device models [8]. This allows an accurate prediction of converter performance, most notably calculation of losses and dynamic behaviour. There is only the matter of interfacing the converter model to the SRM model. In this paper, a detailed SRM model based on flux and torque lookup tables is developed and implemented in the LTspice circuit simulation tool. The lookup tables are generated using the FEA software platform FEMM 4.2 [9] in combination with GNU Octave [10]. To the best of our knowledge, no previous implementations of an SRM model in a circuit analysis software such as LTspice have been reported. Finally, the complete drive model is assembled in LTspice. Interaction with the LTspice model (starting and stopping the model execution, output data recording and processing) is conducted entirely using a dedicated Python script.

The paper is composed as follows. Following the Introduction, fundamental information regarding the applied SRM and AHBC are given in section 2. Details regarding the development and implementation of the SRM drive model using open-source software platforms are given in section 3. The model results are displayed in section 4 and the conclusions and plans for future work are presented in section 5.

2 SRM drive overview

The SRM under investigation has six stator poles and ten rotor poles. Such a machine is aptly referred to as a 6/10 SRM. The machine cross-section is displayed in Figure 1. The operating principle is relatively simple - when a given phase is energized a magnetic field established in the corresponding stator poles attracts the nearest rotor poles. By applying excitation in an appropriate order and with suitable timing, high average torque with minimal oscillations is obtained.

Typical SRM waveforms are illustrated in Figure 2. The diagrams display the phase inductance, excitation voltage and current, and electromagnetic torque developed by a single phase. The variation of quantities is shown with respect to the rotor angle. Characteristic positions of the rotor with corresponding qualitative flux line distributions are also displayed. Two characteristic rotor positions are identified: the unaligned position, when the stator pole is between two rotor poles and the inductance value is minimal, and the aligned position, when the axes of stator and rotor poles are aligned and the inductance value is maximal. The inductance variation between these two positions is approximately linear, disregarding magnetic saturation. The phase is usually energized before the overlap between the stator and rotor poles begins and the current is quickly increased. Prior to reaching full alignment, the voltage polarity is reversed and the current is reduced back to zero, after which the voltage is maintained at zero value until the next cycle. The obtained electromagnetic torque is mostly positive, however a slight negative pulse cannot be avoided practically, due to the finite current decrease rate. Positive torque is generated when the inductance is increasing and vice versa. No torque is generated when the inductance is constant. Without diving too deep into the SRM model itself, only the basic

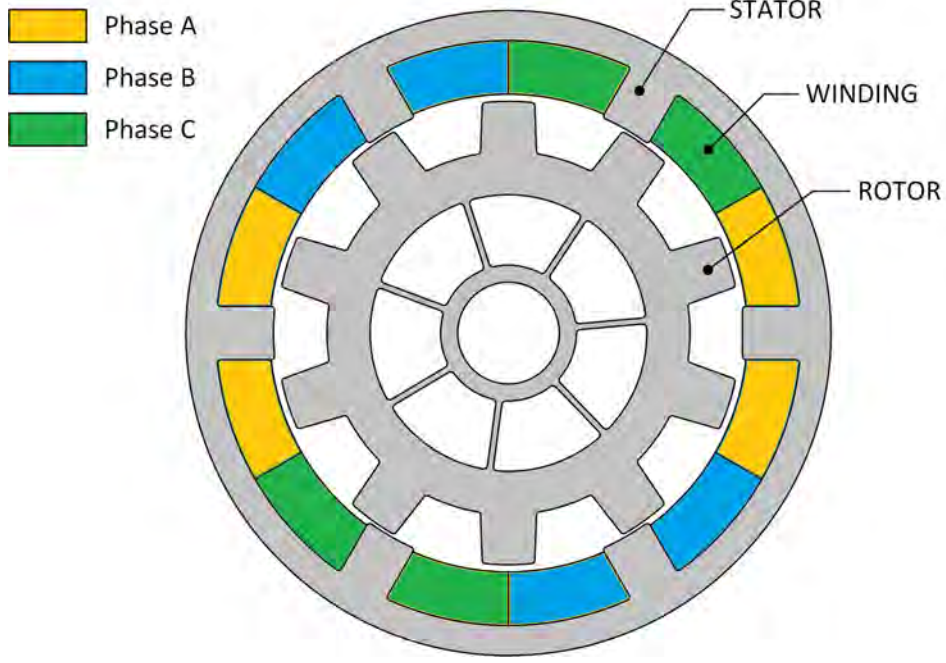


Figure 1: SRM cross-section

equations are given as follows [5]:

$$u_{\xi} = R_{\xi} i_{\xi} + \frac{d\psi_{\xi}}{dt} = R_{\xi} i_{\xi} + L_{\xi}(i_{\xi}, \theta) \frac{di_{\xi}}{dt} + \frac{\partial L_{\xi}(i_{\xi}, \theta)}{\partial \theta} i_{\xi}, \quad (1)$$

$$T_{e\xi} = \frac{1}{2} i_{\xi}^2 \frac{\partial L_{\xi}(i_{\xi}, \theta)}{\partial \theta}, \quad (2)$$

$$\theta = \int \Omega dt. \quad (3)$$

The variables and parameters in the previous expressions are defined as:

- ξ denotes the observed phase (A, B, or C),
- u_{ξ} , i_{ξ} , and ψ_{ξ} are the voltage, current, and flux linkage of the observed phase,
- θ is the rotor position with respect to phase A,
- Ω is the rotor angular speed,
- $T_{e\xi}$ is the electromagnetic torque generated by the observed phase, and
- R_{ξ} and L_{ξ} are the resistance and inductance of the observed phase.

It should be emphasized that the inductances are dependent on current values due to magnetic saturation, which makes the SRM model highly non-linear. This non-linearity will be accounted for by modelling the SRM using flux and torque lookup tables obtained from FEM simulations, as elaborated in section 3. The motion equation is excluded from the model, as the rotor speed is considered constant in all upcoming analyses.

The SRM supply voltage obviously needs to be varied frequently which can only be accomplished by means of a power converter. Considering the required voltage values ($+V_{DC}$, $-V_{DC}$, and 0), a two-level converter such as an H-bridge would be suitable. However, considering the fact that the

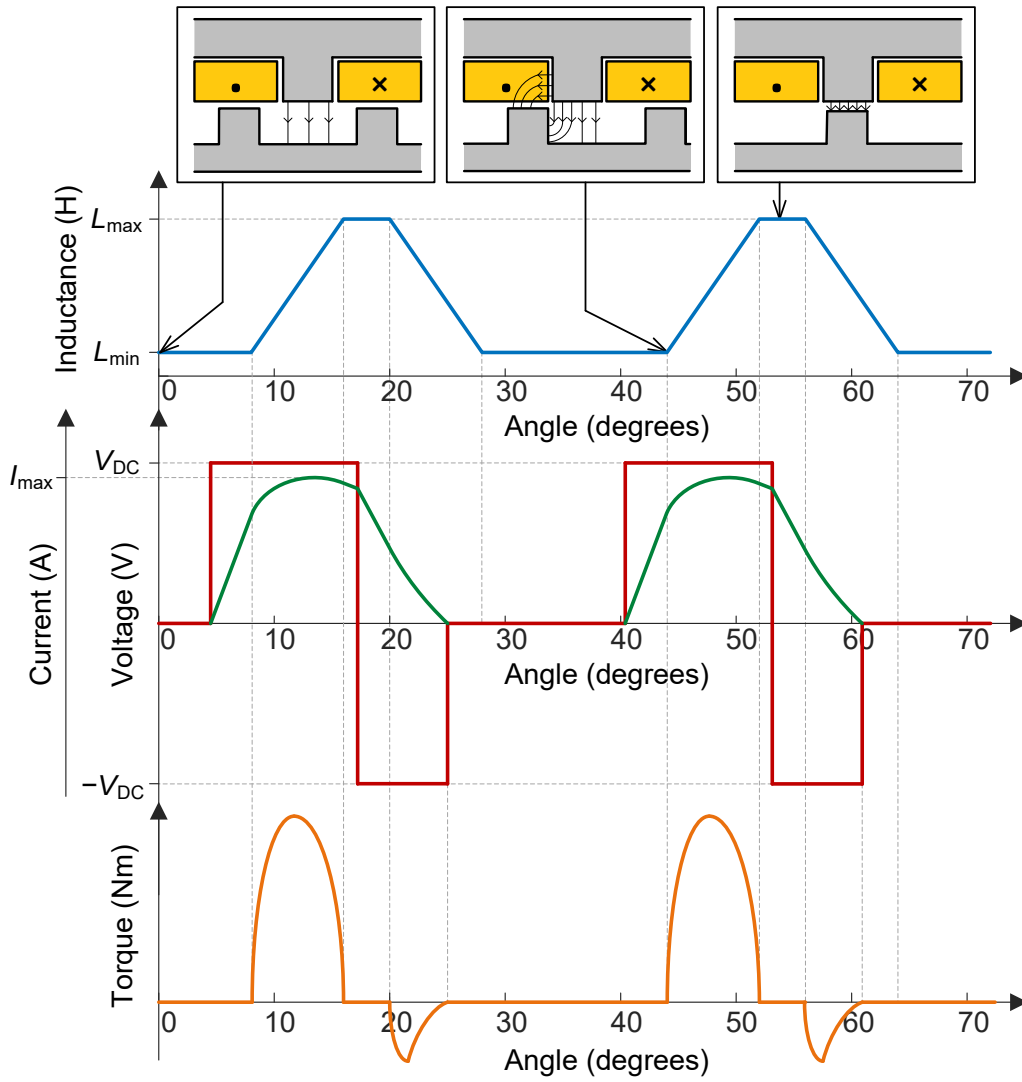


Figure 2: Example of SRM waveforms for a typical operating mode

SRM current is unidirectional, it is very common in practice to apply the asymmetric half-bridge converter (AHBC). The AHBC topology and its connections to respective SRM phases is schematically displayed in Figure 3. The AHBC structurally resembles a standard H-bridge module, except that it only employs two switches (most commonly MOSFET or IGBT) and two diodes for each phase. As previously stated, this is due to the fact that the current is unidirectional, which even eliminates the need for reverse diodes in parallel with the switches (even though these are inherently present in most cases). Reducing the number of power switches reduces the total component cost, which makes the AHBC a preferred option for SRM supply. Moreover, the control algorithm is simpler, as only two switches per phase are controlled, and the switching losses tend to be lower. The only drawback is that the converter is composed of discrete components which may increase manufacturing cost and complexity.

The control approach will now be briefly explained for a typical operating mode. Example voltage and current waveforms along with corresponding AHBC switching states are shown in Figure 4. Hysteresis current control is commonly applied in the following manner:

- positive DC link voltage V_{DC} is applied by turning on the power switches when the turn-on angle (θ_{on}) is exceeded, which causes the current to increase;

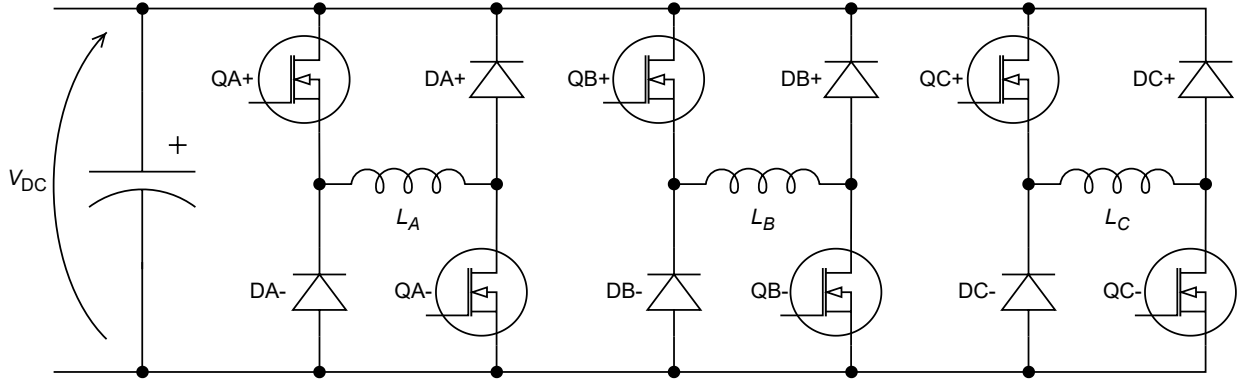


Figure 3: Schematic display of SRM phases supplied from an AHBC

- when the current exceeds the value $I_{ref} + \Delta I$ (I_{ref} is the reference and ΔI the hysteresis band), the lower switch is turned off and approximately zero voltage is applied to the phase winding, causing the current to gradually decrease;
- when the current drops to $I_{ref} - \Delta I$, the lower switch is again turned on and the current increases due to positive DC link voltage;
- the previous two steps are repeated until the turn-off angle (θ_{off}) is reached, after which both switches are turned off and negative voltage $-V_{DC}$ is applied through the diodes;
- the negative voltage reduces the current to zero.

It should be noted that either of the two switches can be manipulated to achieve hysteresis control, and normally both are used alternately to achieve an even loss distribution. The selection of turn-on and turn-off angles is crucial for maximizing the average torque and minimizing the torque ripple. Different values of θ_{on} and θ_{off} should be applied for various speeds and loads to achieve optimal operating conditions.

3 Model synthesis and implementation

The flowchart depicting the model development and execution procedure is shown in Figure 5. The applied software tools are indicated and the key outputs are highlighted. The entire procedure can be divided into three four steps:

- FEM model composition,
- FEM model execution by means of Octave code,
- LTspice model assembly, and
- LTspice model execution by means Python code.

After completing steps (i) and (ii), flux and torque lookup tables are generated. Based on these lookup tables, the LTspice model is composed in step (iii). Finally, a Python script for automating the LTspice simulation execution and output data logging is developed in step (iv). The obtained outputs are the SRM drive performance indicators, such as currents, voltages, power switch losses, etc. Each of the listed steps is analysed in detail in the following subsections. Subsection 3.1 describes steps (i) and (ii), whereas subsection 3.2 is concerned with steps (iii) and (iv).

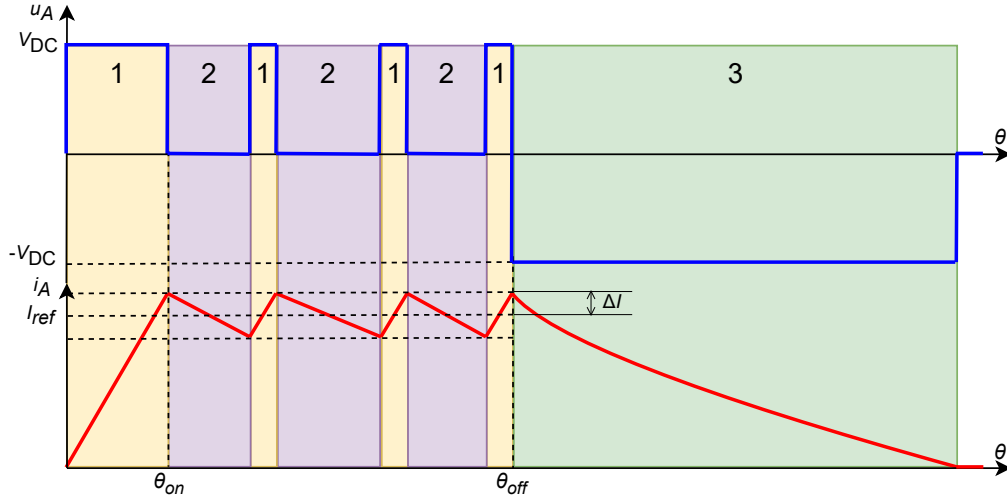
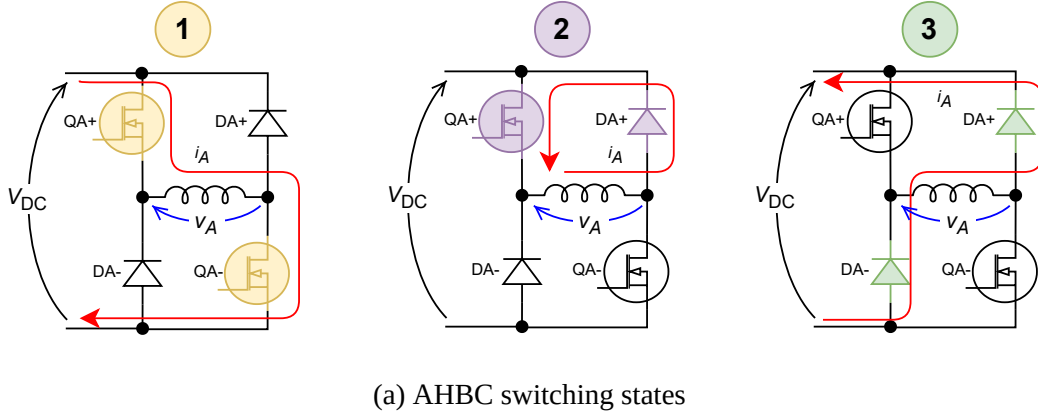


Figure 4: Illustration of SRM current control using AHBC

3.1 Flux and torque lookup table generation (FEMM & Octave)

The FEM model is developed based on the construction data of the 6/10 SRM displayed in Figure 1. The open-source software platform FEMM 4.2 for finite element-based electromagnetic calculations is used. The SRM geometry is plotted and appropriate materials are assigned to different areas. After this is completed, the machine geometry is divided into a great number of small (finite) triangular elements. The obtained finite element mesh is displayed in Figure 6a. When the mesh of appropriate density is formed, the calculation is conducted and the field distribution within the analysed domain (machine) is obtained. An example flux density distribution is displayed in Figure 6b.

Manual model execution is generally inconvenient, as many input parameters need to be set prior to each calculation. This becomes very cumbersome and time-consuming when a wide range of operating modes needs to be analysed. In this paper, the FEM model was used for obtaining flux and torque lookup tables (LUTs) with respect to winding currents and rotor angular position. As the accuracy of the resulting SRM model is directly dependent on the resolution of these LUTs, over 2000 simulations for various current and rotor angle combinations are required. This process is therefore automated by interfacing FEMM with GNU Octave by means of the OctaveFEMM toolbox [11]. This toolbox allows Octave to modify the model, run the simulation, and access the output values.

The process of generating flux and torque LUTs is depicted in the flowchart of Figure 7a. Note that

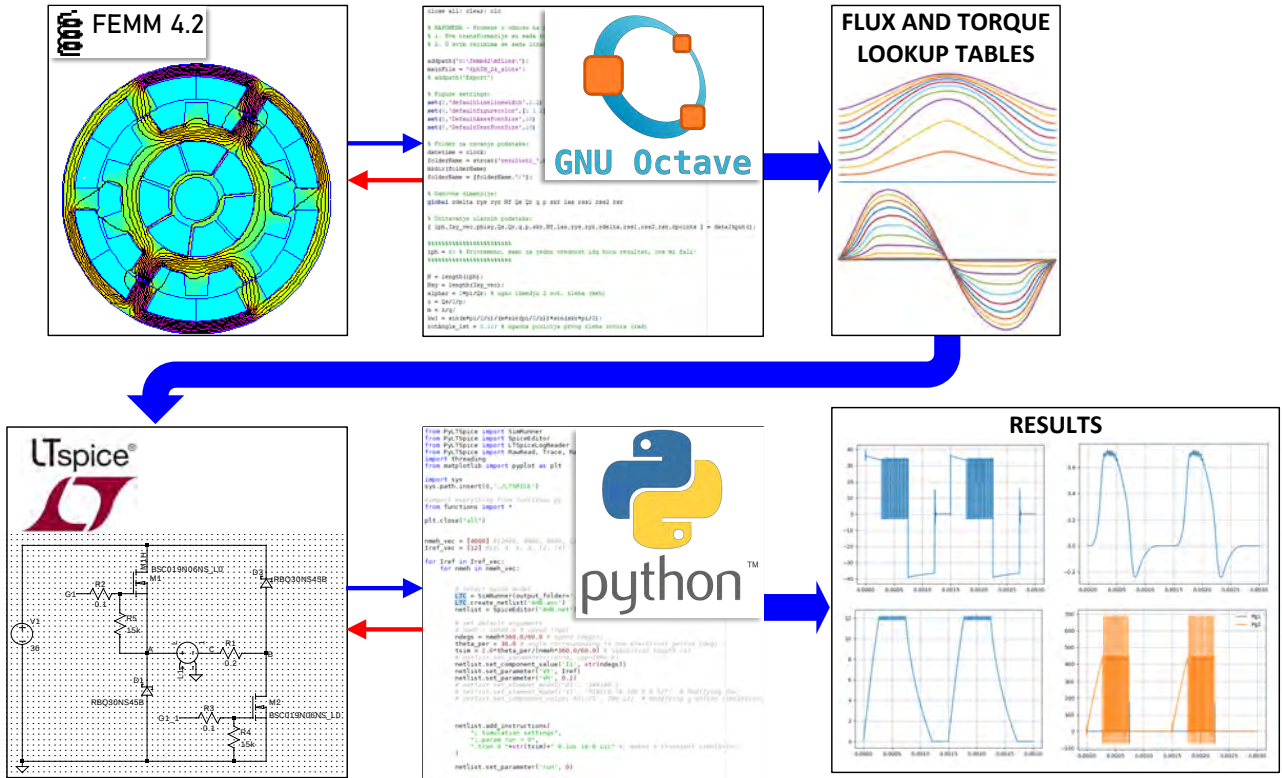


Figure 5: Flowchart of the model synthesis, implementation, and execution procedure

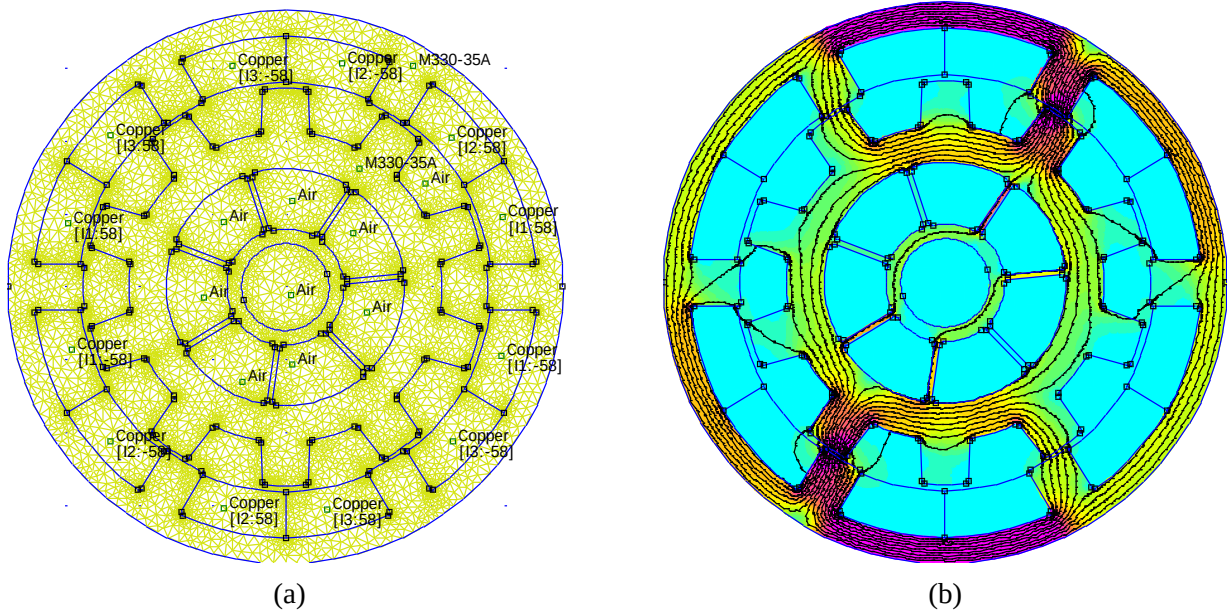
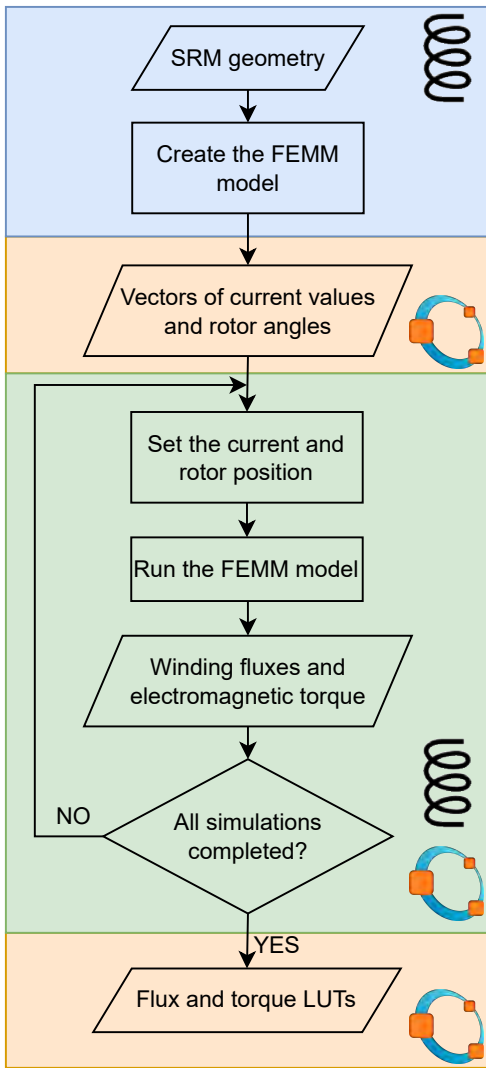
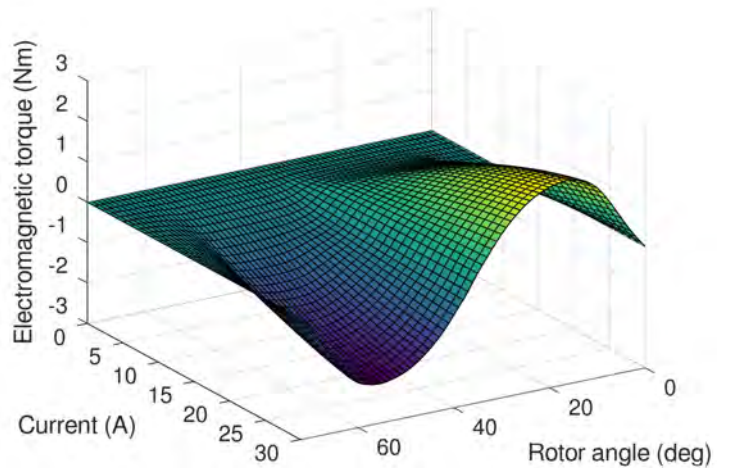
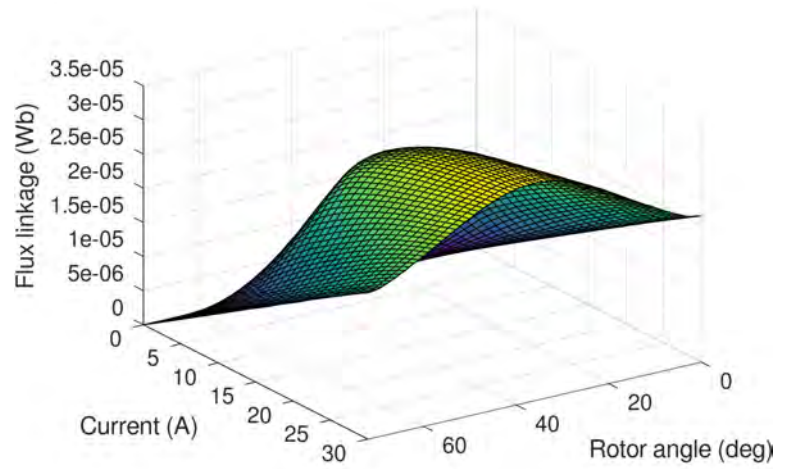


Figure 6: SRM cross-section in FEMM 4.2 environment: (a) finite element mesh, (b) flux density distribution obtained after calculation

the software tools applied in each stage of the procedure are indicated by appropriate icons. The model is generated using only FEMM, although this step can also be carried out using Octave. After the model is formed, input values are provided to Octave, specifically the set of currents and rotor angles for LUT formation. A loop is then initiated, wherein FEMM calculations are conducted for all current and angle combinations. This part of the process is automated: Octave invokes the model, sets the current and angle to the required values, runs the model, and obtains the flux and torque values. Upon exiting the loop, two-dimensional flux and torque LUTs are formed and exported to text files for further use in forming the SRM numerical model. With a 1° angle resolution and 1 A current resolution, the LUT contains a total of 2263 entries. This rule of thumb ensures high modelling accuracy while maintaining the number of executed FEM simulations and total LUT generation time within reasonable limits. Additionally, increasing the number of data points in the LUT eventually reduces the simulation efficiency without significantly improving the accuracy. The graphical representation of the flux and torque LUTs in the form of surface diagrams is given in Figure 7b.



(a)



(b)

Figure 7: (a) Flux and torque LUT calculation flowchart, (b) flux and torque LUTs represented by 3D diagrams

3.2 SRM drive model assembly and execution (LTspice & Python)

As indicated in Figure 5, the flux and torque LUTs are used to form an SRM model in the LTspice environment. While the converter model is implemented in a straightforward manner, the SRM model includes electrical, magnetic, and mechanical quantities. Therefore, appropriate electrical equivalents need to be employed. Moreover, LUT implementation in LTspice is quite involved. Software tools that enable a simpler SRM model formulation are available, but none of them provides accurate modelling of power switching device dynamics and losses. As the power converter is an integral and most sensitive part of the SRM drive, a high-fidelity model is crucial for proper performance prediction.

The complete SRM drive model implemented in LTspice is displayed in Figure 8. The model can be divided into several functional entities as designated in the figure:

1. The main part of the model – converter circuit connected to the phase winding terminals. The phase winding is modelled as resistor connected in series with a dependent voltage source corresponding to the winding electromotive force (EMF). When the EMF is calculated, the current is obtained simply as:

$$i_A = \frac{u_A - e_A}{R_A}, \quad (4)$$

where u_A is the terminal voltage, e_A is the EMF, and R_A is the phase winding resistance.

2. The EMF calculation circuit based on differentiating the winding flux. For this purpose, the flux value is assigned to a voltage controlled current source connected in series with an inductor. The current value corresponds to the flux and the inductance corresponds to the number of turns per phase, thereby essentially obtaining the EMF value as:

$$e_A = N_s \frac{d\Phi_A(i_A, \theta)}{dt}, \quad (5)$$

where N_s is the number of turns per phase (“inductance”), and Φ_A is the flux per pole (“current”). Note that a series RC snubber is added in parallel to avoid numerical issues due to connecting a current source in series with an inductor. The RC element filters out the high-frequency noise caused by the switching actions. The flux value is obtained from the LUT as a function of winding current i_A and rotor angle θ .

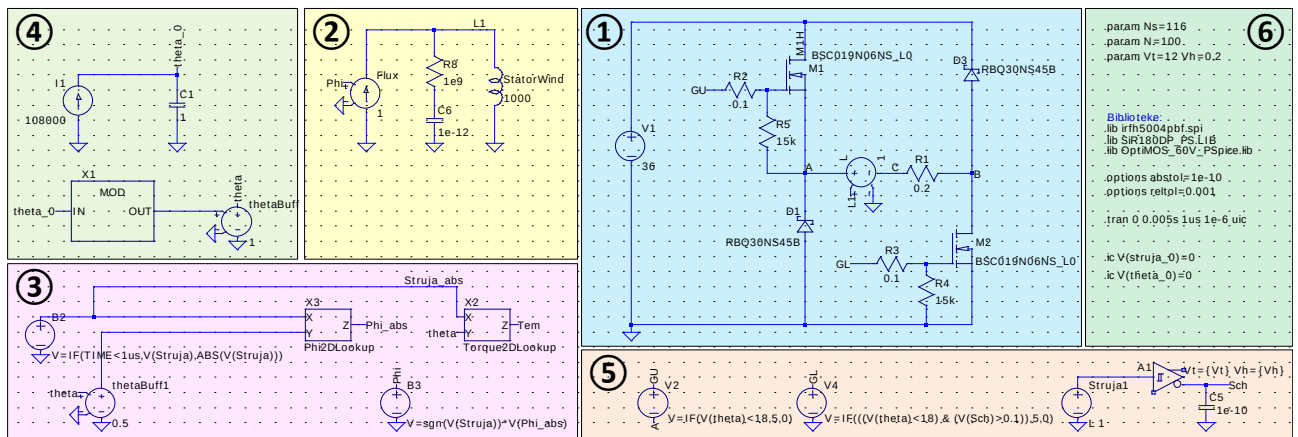


Figure 8: LTspice model of the SRM drive: 1 – converter circuit, 2 – SRM phase winding model, 3 – flux and torque calculation from LUTs, 4 – rotor angle calculation, 5 – control circuits, 6 – model inputs (parameters, libraries, initial conditions) and simulation settings

3. Flux and torque LUTs are implemented by using multiple behavioural voltage sources whose outputs are defined by the LTspice *table* command. A more detailed representation is given in Figure 9, where two behavioural sources are represented. This example refers to the flux LUT, but the same principle is applied for the torque as well. Note that voltages of ports X and Y correspond to input values of the current and rotor angle, respectively. The source denoted Byx0 provides an output value from the associated table, dependent on the rotor angle and corresponding to the current value of 0 A. The model contains 30 similar sources corresponding to current values ranging from 1 A to 30 A, each providing an output dependent on the rotor angle by interpolating the values from the LUT:

$$V(\text{Byxj}) = z_{jk} + (V(Y) - y_j) \cdot \frac{z_{j(k+1)} - z_{jk}}{y_{(k+1)} - y_k}, \quad y_k \leq V(Y) < y_{(k+1)}, \quad (6)$$

where x_j , y_k , and z_{jk} represent LUT values of current, angle, and flux, respectively. The source B3 provides an output corresponding to the actual (input) current value X by interpolating the outputs of voltage sources Byxj and Byx(j+1) :

$$V(Z) = V(\text{Byxj}) + (V(X) - x_j) \cdot \frac{V(\text{Byx(j+1)}) - V(\text{Byxj})}{x_{(j+1)} - x_j}, \quad x_j \leq V(X) < x_{(j+1)}, \quad (7)$$

where $V(Z)$ denotes the output flux value. The presented approach requires a total of 32 behavioural voltage sources, each with a corresponding *table* command. Additionally, parameters x_j , y_k , and z_{jk} need to be defined by including multiple *param* commands. The entire process is very involved and time-consuming, and can be expedited by using a Python script to assign parameter values directly from the previously obtained text files.

4. Rotor angle is calculated by integrating the speed, according to (3). Rotor speed is set to a constant value in each simulation, therefore the angle calculation is performed using a circuit composed of an independent current source with current equal to speed, and a capacitor with a capacitance of 1 F. The capacitor voltage is therefore obtained as the integral of current, i.e., speed, which corresponds to (3). Note that the angle is reset to zero whenever it reaches a multiple of 36° to comply with the range of flux and torque LUTs.
5. Current control is implemented by using two behavioural voltage sources and one current controlled voltage source. The behavioural sources V2 and V4 with the accompanying resistors act as gate driver circuits for the upper and lower MOSFET, hence the labels GU (Gate Upper) and GL (Gate Lower). The current controlled source provides a voltage equal to the SRM phase current which is fed to a Schmitt trigger. The parameters of the Schmitt trigger are the reference current and the hysteresis band, i.e., the corresponding voltage values V_t and V_h . According to Figure 10, the control logic can be formulated as follows:

- when the rotor angle is between 0° and 18° , voltages at GU and GL are equal to zero and both MOSFETs are switched off;
- when the rotor angle is between 18° and 36° , the voltage at GU equals 5 V and the upper MOSFET is switched on;
- when the rotor angle is between 18° and 36° , the voltage at GD depends on the current value:
 - when the input voltage of the Schmitt trigger exceeds $V_t + V_h$, the voltage at GL is set to zero and the lower MOSFET is switched off;

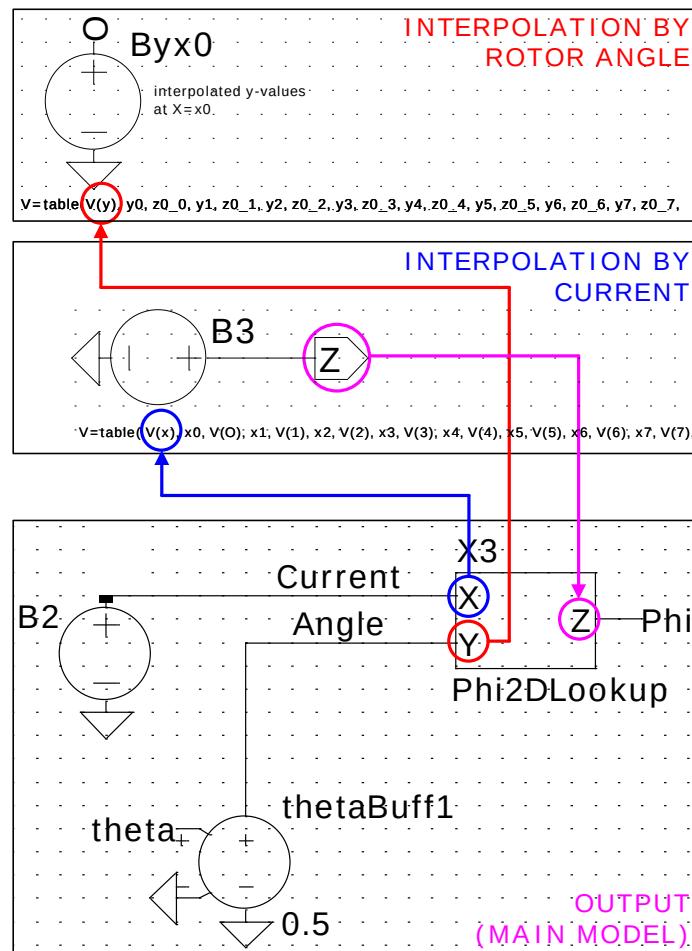


Figure 9: Flux LUT implementation in LTspice

- when the input voltage of the Schmitt trigger drops below $V_t - V_h$, the voltage at GL is set to 5 V and the lower MOSFET is switched on;

The described control algorithm is in accordance with the approach illustrated in Figure 4. Note that only the lower MOSFET is switched on and off during hysteresis control, leading to an uneven loss distribution between the switches.

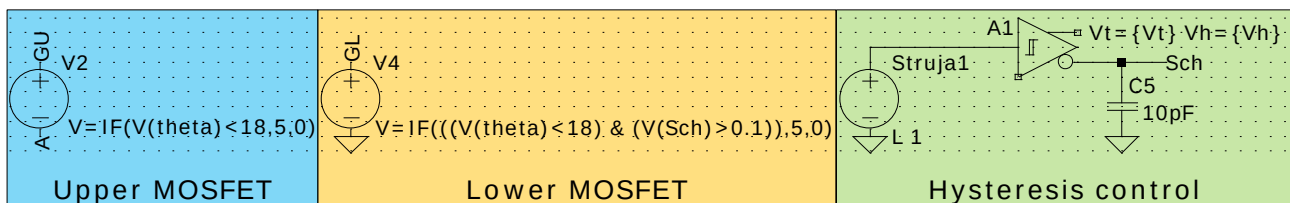


Figure 10: Components of the current control system in LTspice

6. Inclusion of libraries containing the applied switching devices (MOSFETs) and diodes, parameter and initial conditions definitions, and simulation settings are provided through the appropriate LTspice directives. The minimal time step was limited to 1 μs , but a variable-step solver is used by LTspice to accommodate very fast transients. The step is reduced iteratively until the relative tolerance of 0.001 is satisfied. Such simulation settings would be appropriate even if more complex digital control algorithms were employed, as the sampling period of such algorithms is normally above 100 μs .

Manipulation and execution of the model via the LTspice interface can be inconvenient, especially if multiple parameters need to be varied prior to each simulation. For instance, in the case of the SRM, it would be of interest to vary the reference current, operating speed, turn-on and turn-off angles, hysteresis band, etc. Moreover, if one were to use the same model structure to analyse a different SRM, modifications to LUTs would be quite cumbersome. For this reason, the dedicated PyLTSpice library [12] is used to interface Python with LTspice and perform these modifications automatically. Moreover, PyLTSpice allows the user to read output files and extract any waveforms of interest for further processing. Specifically, the input parameters varied in this paper are the reference current and operating speed. The waveforms of supply voltage, current, torque, and switching device losses are obtained and analysed.

The flowchart outlining the simulation procedure is displayed in Figure 11. The process is mostly self-explanatory, and the applied software tools used in each stage are denoted. More details can be found in the Python scripts given in the Appendix. Parts of the code using the PyLTSpice library are commented for better understanding.

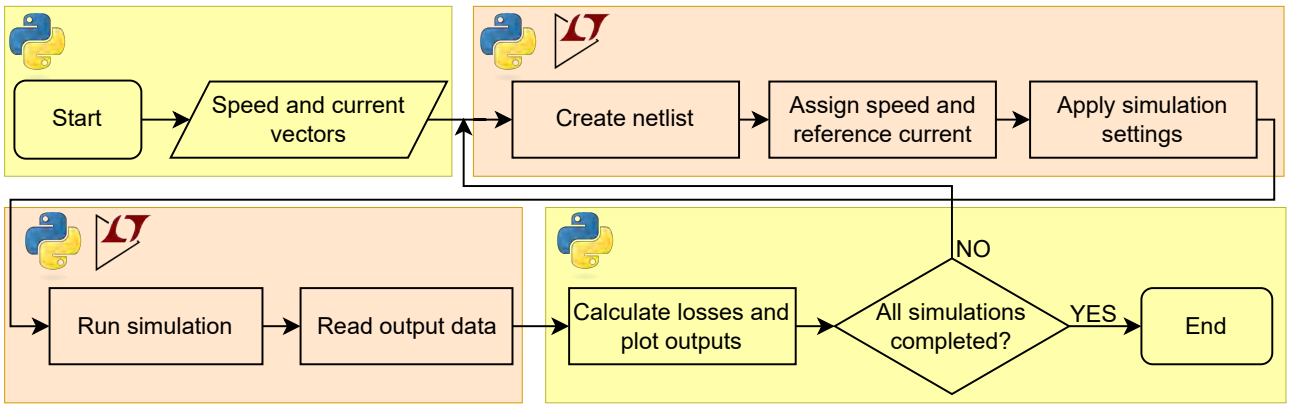


Figure 11: Flowchart of the simulation procedure using the Python/LTspice interface

4 Results

The SRM model is executed for various values of reference currents and operating speeds:

$$\begin{aligned} I_{ref} &\in \{2, 4, 6, 8, 10, 12, 14\} \text{ A,} \\ n &\in \{2000, 4000, 8000, 12000, 18000\} \text{ rpm.} \end{aligned} \quad (8)$$

The hysteresis band can also be modified in the Python script, but was kept constant for the purpose of this analysis.

Waveforms of SRM voltage, current, and torque are obtained for each operating mode. Additionally, switching device losses and converter efficiency are calculated. Simulated waveforms are shown for two characteristic scenarios:

- 1) low operating speed (2000 rpm) and low reference current (4 A),
- 2) high operating speed (12000 rpm) and moderate reference current (8 A).

The waveforms obtained for scenario 1 are displayed in Figure 12. The frequent voltage changes along with pronounced torque and current ripple indicate numerous switching operations during each electrical cycle. Hysteresis control is obviously active in this case, as the current oscillates around the reference value of 4 A. The MOSFET losses are therefore dominated by the switching loss component,

as observed in Figure 12d. Note that the losses are mostly attributed to the lower switch (M2) due to the hysteresis control implementation which does not employ the upper switch (M1). The MOSFET losses are calculated with great accuracy due to the use of detailed switching device models. As previously stated, high-fidelity modelling of semiconductor components is a major advantage offered

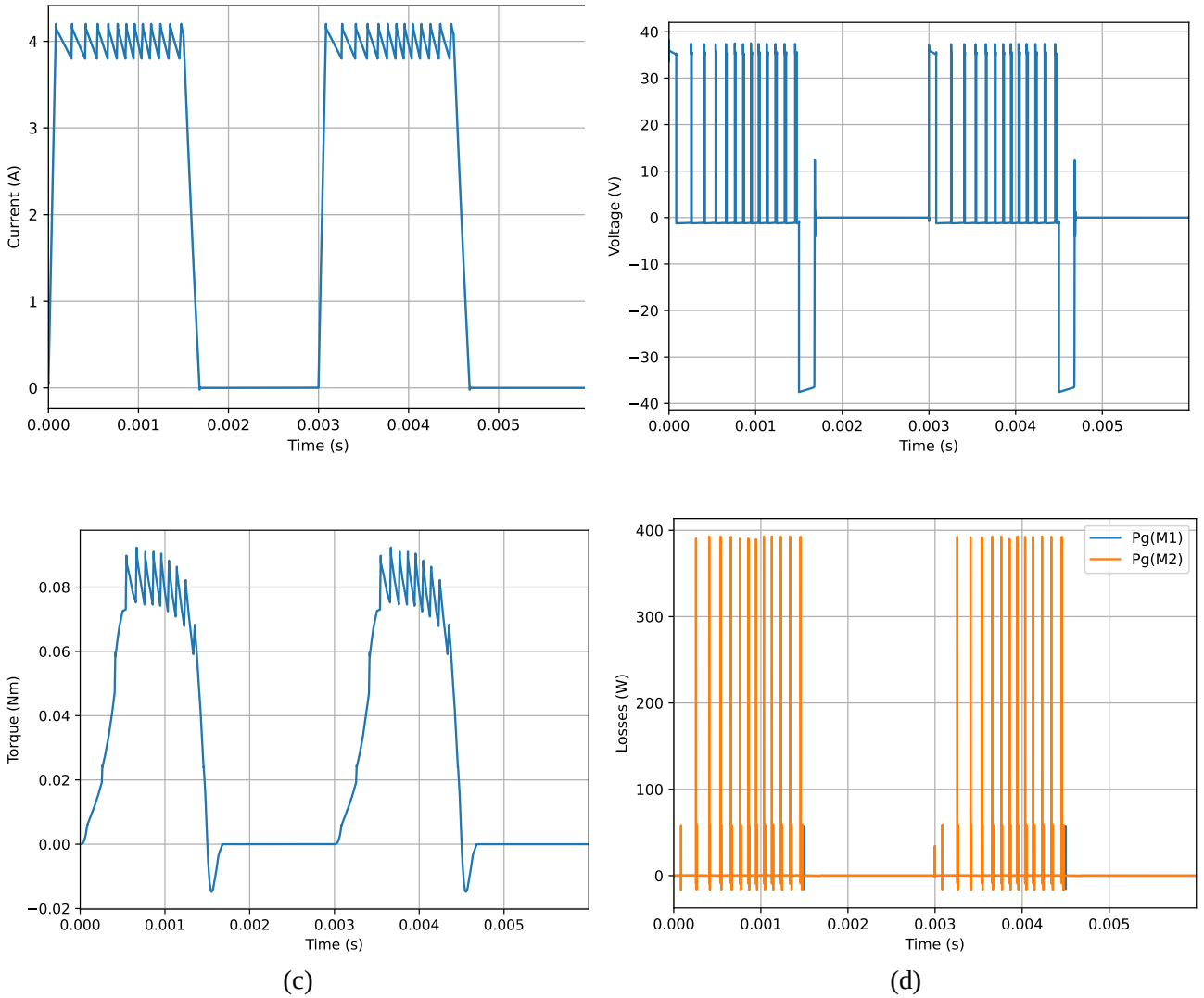


Figure 12: SRM drive waveforms obtained for the operating mode with reference current of 4 A and rotor speed of 2000 rpm: (a) current, (b) voltage, (c) torque, (d) MOSFET losses

The waveforms obtained for scenario 2 are displayed in Figure 13. Unlike the previous operating mode, the voltage now changes only twice per cycle between the positive and negative DC link voltage (zero voltage is never applied). Consequently, the torque and current waveforms are ripple-free. It can therefore be concluded that hysteresis control is not applied in this case. The current does not even approach the reference value of 8 A, therefore both switches remain turned on until the turn-off angle is reached. The MOSFET losses are now dominated by the conduction loss component, as seen in Figure 13d. High switching losses appear only twice per cycle, therefore their cumulative effect is much less pronounced compared to scenario 1. The losses are now evenly distributed between the two MOSFETs as they both conduct the same current and are switched twice in each cycle.

The input and output power of the SRM drive are measured and the drive efficiency is calculated for all operating modes. The obtained results are displayed in Table 1. While the efficiency calculation using

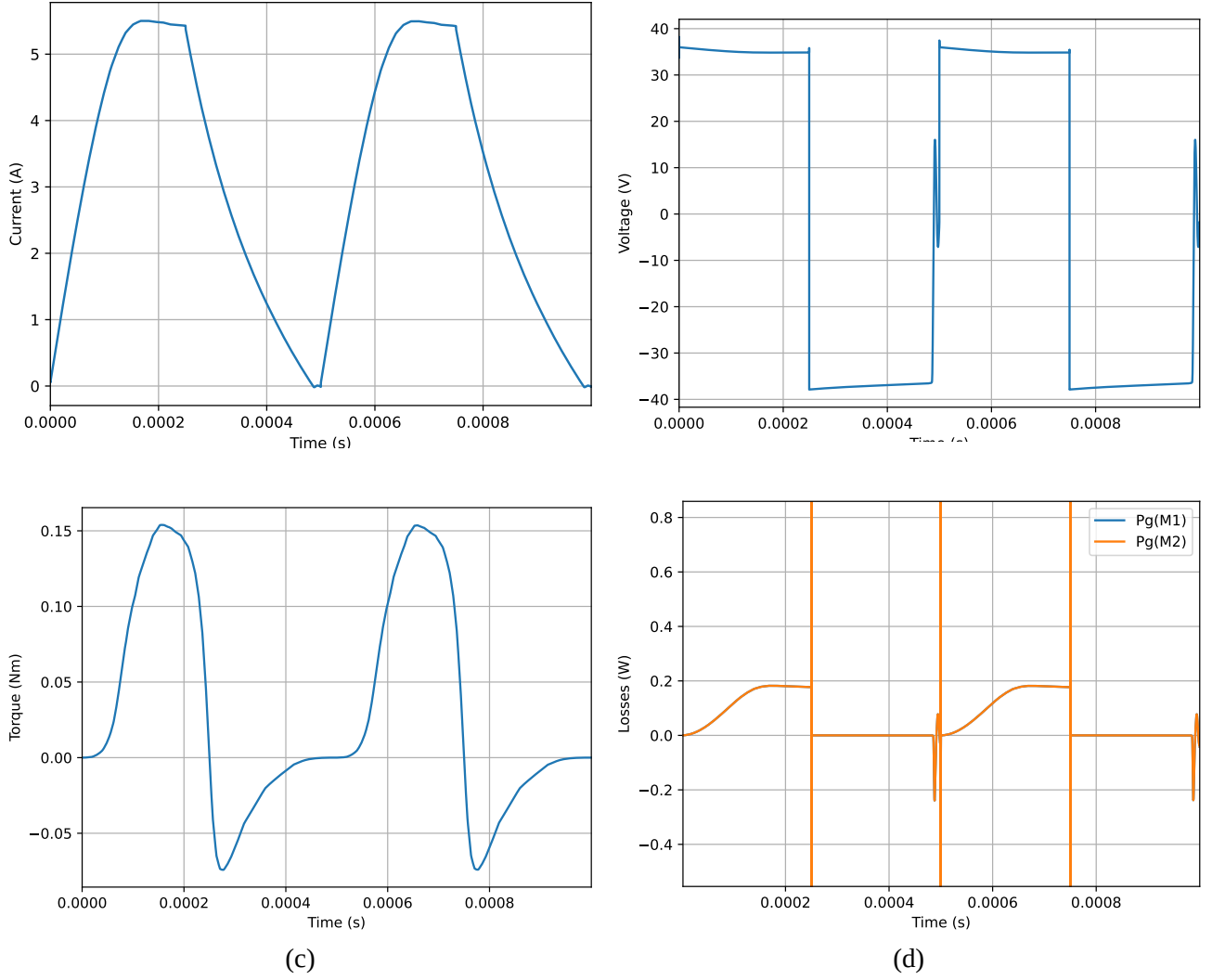


Figure 13: SRM drive waveforms obtained for the operating mode with reference current of 8 A and rotor speed of 12000 rpm: (a) current, (b) voltage, (c) torque, (d) MOSFET losses

the LTspice interface is a lengthy process, the same calculation is performed practically instantaneously using Python. Repeated values of efficiency are observed in the table, particularly at higher operating speeds. This is due to the fact that a certain level of reference current is never reached at elevated speeds. Therefore, any further increase of the current setpoint is non-effective and all waveforms remain unchanged. According to the results of Table 1, the current does not even reach 4 A at the very high speed of 18000 rpm. Note that the converter efficiency is obtained with high accuracy. However, only resistive SRM losses are modelled, therefore there a substantial error may occur when calculating SRM efficiency.

5 Conclusions

An approach for implementing an SRM drive model using exclusively open-source software was devised and described in this paper. The non-linear machine model was developed using the FEMM 4.2 platform in unison with GNU Octave. This model was then implemented in LTspice along with the converter model. An original approach for implementing the SRM model in LTspice was developed for this purpose. The simulation procedure was automated using a dedicated Python library, which allowed various operating modes to be analysed in a short amount of time. Furthermore, Python enables

Table 1: SRM drive efficiency with respect to reference current and rotor speed

	2000 rpm	4000 rpm	8000 rpm	12000 rpm	18000 rpm
2 A	47.2%	64.38%	79.12%	85.66%	90.6%
4 A	52.81%	69.98%	83.75%	89.52%	93.33%
6 A	55.66%	72.98%	86.18%	91.03%	93.33%
8 A	57.52%	74.92%	87.81%	91.03%	93.33%
10 A	58.65%	76.19%	87.81%	91.03%	93.33%
12 A	58.97%	76.73%	87.81%	91.03%	93.33%

seamless processing and comprehensible representation of the simulation results.

The work presented here is only a small part of what may be achieved by integrating various open-source software platforms. Octave was only used to modify the FEM model inputs, run the simulations, and collect and process the output data. However, the model construction can also be performed using Octave, which would allow different designs to be developed and analysed more efficiently. The LTspice model generation can be further simplified, e.g., by using Python to automate the LUT forming process. This would reduce the time required for model construction. A major issue with SRM drives is the control optimization for different operating conditions. The developed model can be used in combination with Python’s Optimize library to determine the optimal control inputs (most commonly, the turn-on and turn-off angles) based on different optimization criteria. Complete cross-platform integration can be attempted to fully automate the entire process, from creating the FEM model to processing the LTspice output data.

More complex digital control algorithms such as torque and flux control can be implemented using LTspice, but this process may prove tedious. Other open-source alternatives such as OpenModelica or SciLab are more convenient in terms of control system composition and SRM modelling, but do not incorporate detailed switching device models, which is a major downside compared to LTspice. The most attractive choice may be the recently introduced QSPICE, which is compatible with the same device libraries as LTspice, but intended specifically for mixed-signal simulations. Moreover, QSPICE allows the control algorithm to be programmed in C++, thereby generating experimental implementation-ready code.

References

- [1] K.M. Rahman, B. Fahimi, G. Suresh, A.V. Rajarathnam, and M. Ehsani. Advantages of switched reluctance motor applications to ev and hev: design and control issues. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 36(1):111–121, 2000.
- [2] M. Krishnamurthy, C.S. Edrington, A. Emadi, P. Asadi, M. Ehsani, and B. Fahimi. Making the case for applications of switched reluctance motor technology in automotive products. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 21(3):659–675, 2006.
- [3] Akira Chiba, Kyohei Kiyota, Nobukazu Hoshi, Masatsugu Takemoto, and Satoshi Ogasawara. Development of a rare-earth-free sr motor with high torque density for hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(1):175–182, 2015.
- [4] Zhi Yang, Fei Shang, Ian P. Brown, and Mahesh Krishnamurthy. Comparative study of interior permanent magnet, induction, and switched reluctance motor drives for ev and hev applications. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 1(3):245–254, 2015.
- [5] T.J.E. Miller. *Switched Reluctance Motor and their Control*. Magna Physics Publishing, 1993.
- [6] S. Vukosavic and V.R. Stefanovic. Srm inverter topologies: a comparative evaluation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27(6):1034–1047, 1991.
- [7] M. Barnes and C. Pollock. Power electronic converters for switched reluctance drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 13(6):1100–1111, 1998.
- [8] Get up and running with ltspice. <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/>

- [get-up-and-running-with-ltspice.html](#). Accessed: 2024-30-8.
- [9] D. Meeker. Finite element method magnetics version 4.2 user's manual, May 2020. Available at <http://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>.
- [10] Gnu octave 9.2.0 manual, 2024. Available at <https://docs.octave.org/interpreter/>.
- [11] D. Meeker. Finite element method magnetics: Octavefemm version 1.2 user's manual, Mar 2018. Available at <http://www.femm.info/Archives/doc/octavefemm.pdf>.
- [12] Pyltspice 5.3.2 documentation, 2024. Available at <https://pyltspice.readthedocs.io/en/latest/modules/modules.html>.

Appendix

The Python code used to manipulate the LTspice model of the SRM drive is given below. Parts of the code not specific to the Python–LTspice interface are omitted and replaced by vertical dots. User defined functions `read_data` and `calcVals` dedicated to reading, processing, and plotting output data, are given after the main program.

Main program

```

1 # Import PyLTSpice modules
2 from PyLTSpice import SimRunner
3 from PyLTSpice import SpiceEditor
4 from PyLTSpice import LTSpiceLogReader
5 from PyLTSpice import RawRead, Trace, RawWrite
6 .
7 .
8 .
9 # Import user defined functions
10 from functions import *
11 .
12 .
13 .
14 # Define vectors of rotating speeds and currents
15 nmeh_vec = [2000, 4000, 8000, 12000, 18000] # rotating speeds (rpm)
16 Iref_vec = [2, 4, 6, 8, 10, 12, 14] # reference currents (A)
17
18 # Run the simulations for all speed and ref. current values
19 for Iref in Iref_vec:
20     for nmeh in nmeh_vec:
21
22         # Select Spice model and generate netlist
23         LTC = SimRunner(output_folder='./temp'+str(nmeh), timeout=6000.0)
24         LTC.create_netlist('AHB.asc')
25         netlist = SpiceEditor('AHB.net')
26
27         # Calculate speed in (deg/s) and define the angular period
28         ndegs = nmeh*360.0/60.0 # speed (deg/s)
29         theta_per = 36.0 # angle corresponding to one electrical period (deg)
30         tsim = 2.0*theta_per/(nmeh*360.0/60.0) # simulation length = two periods
31         # netlist.set_parameters(res=0, cap=100e-6)
32
33         # Set the values of operating speed, reference current, and hysteresis band
34         netlist.set_component_value('I1', str(ndegs))
35         netlist.set_parameter('Vt', Iref)
36         netlist.set_parameter('Vh', 0.2)
37
38         # Simulation settings
39         netlist.add_instructions(
40             "; Simulation settings",
41             ";.param run = 0",
42             ".tran 0 " + str(tsim) + " 0.1us 1e-6 uic" # makes a transient simulation
43         )
44         netlist.set_parameter('run', 0)
45
46         # Run the simulation
47         print("simulating test")
48         LTC.run(netlist, timeout=60.0)
49         netlist.reset_netlist()
50
51         # Sim Statistics
52         print('Successful/Total Simulations: ' + str(LTC.okSim) + '/' + str(LTC.runno))
53

```

```

54 # Read data from the output (*.raw) file
55 read_data("temp"+str(nmeh)+"/AHB_1.raw")
56
57 # Calculate the average losses of switching devices
58 gubici = calcVals("temp"+str(nmeh)+"/AHB_1.raw")
59 print(gubici)

```

Functions

```

1 #####
2 # read_data --> reads and plots the voltage, current, and torque waveforms
3 def read_data(filename):
4
5     # Import the RawRead module for reading output traces
6     from PyLTSpice import RawRead
7     from matplotlib import pyplot as plt
8
9     # Read the output traces
10    LTR = RawRead(filename)
11    IR1 = LTR.get_trace("I(R1)") # Current
12    Torque = LTR.get_trace("V(VTem)") # Torque
13    VSRM = LTR.get_trace("V(L1)") # Voltage
14
15    x = LTR.get_trace('time') # Gets the time axis
16    steps = LTR.get_steps()
17
18    # Plot the waveforms
19    for step in range(len(steps)):
20        # print(steps[step])
21        plt.figure()
22        plt.plot(x.get_wave(step), -IR1.get_wave(step), label=steps[step])
23        plt.grid()
24
25        plt.figure()
26        plt.plot(x.get_wave(step), Torque.get_wave(step), label=steps[step])
27        plt.grid()
28
29        plt.figure()
30        plt.plot(x.get_wave(step), VSRM.get_wave(step), label=steps[step])
31        plt.grid()
32
33    plt.show()
34
35    #####
36    # calcVals --> reads and plots switching device losses and calculates average losses
37    def calcVals(filename):
38
39        # Import the RawRead module for reading output traces
40        from PyLTSpice import RawRead
41        from matplotlib import pyplot as plt
42
43        # Read the output traces
44        LTR = RawRead(filename)
45        IM1 = LTR.get_trace("Ix(M1:DRAIN)")
46        IM2 = LTR.get_trace("Ix(M2:DRAIN)")
47        VM1H = LTR.get_trace("V(M1H)")
48        VM1L = LTR.get_trace("V(A)")
49        VM2 = LTR.get_trace("V(A)")
50
51        x = LTR.get_trace('time') # Gets the time axis
52        steps = LTR.get_steps()
53
54        # MOSFET losses
55        # Array initialization
56        PgM1 = []
57        PgM2 = []
58
59        # Loss calculation and data plotting
60        for step in range(len(steps)):
61            # Calculate losses at the current time step and add to array
62            PgM1.append ((VM1H.get_wave(step)-VM1L.get_wave(step)) * IM1.get_wave(step))
63            PgM2.append (VM2.get_wave(step) * IM2.get_wave(step))
64
65            # Plot the data
66            plt.figure()
67            plt.plot(x.get_wave(step), PgM1[step], label='Pg1')

```

```

68     plt.plot(x.get_wave(step), PgM2[step], label='Pg2')
69     plt.legend() # order a legend
70     plt.grid()
71     plt.show()
72
73     # Calculate the average losses over the simulation interval
74     PgM1_avg = sum(PgM1[0])/len(PgM1[0])
75     PgM2_avg = sum(PgM2[0])/len(PgM2[0])
76
77     # Return the average values of losses
78     return [PgM1_avg, PgM2_avg]

```

Review of open software for applications in optical spectroscopy

Aleksandar Ćirić¹

1: Centre of Excellence for Photoconversion, Vinča Institute of Nuclear Sciences – National Institute of the Republic of Serbia, University of Belgrade, P.O. Box 522, Belgrade 11001, Serbia

e-mail address: aleksandar.ciric@ff.bg.ac.rs

ABSTRACT

Open-source scientific software is essential for enhancing the reliability and openness of research. This paper reviews several key open-source tools for spectroscopic analysis, including GNU Octave, LabPlot, SciLab, Orange, LumThools, and JOES. GNU Octave, LabPlot, and SciLab provide robust, cost-free alternatives to commercial software for numerical computations and spectral analysis, with support from community contributions and institutional backing. Orange offers a user-friendly interface for data mining and machine learning, with its Spectral add-on enhancing spectroscopic data analysis. LumThools is tailored for temperature-dependent luminescence analysis, allowing flexible model fitting, while JOES aids in Judd-Ofelt analysis for rare-earth-doped materials. This comparative analysis highlights the influence of these open-source tools on the field and their role in improving research practices, as well as the benefits for their authors.

Keywords: spectroscopy software, Judd-Ofelt apps, thermometry fitting software, open Origin alternative, open MATLAB alternative.

1 Introduction

Open-source scientific software is crucial because it promotes transparency, reproducibility, and collaboration in research. Sharing the code allows other researchers to validate, expand, and refine the work, strengthening the credibility of the findings, while the open-source approach fosters community contributions that accelerate adoption, broaden the research's reach, and amplify the paper's overall impact.^{1,2} When a paper includes open-source software, it can significantly boost its visibility and citations, as researchers are more likely to reference and use tools that are freely accessible.

This study aims to review the most effective open-source scientific software for spectroscopic analysis, including tools developed by the Optical Materials and Spectroscopy Group. A comparison with commercial alternatives is provided, along with an analysis of the underlying academic motivations.

2 Methodology

2.1 GNU Octave, LabPlot, and SciLab

GNU Octave,³ LabPlot⁴, and SciLab⁵ are open-source software tools useful for numerical computations and spectroscopy. GNU Octave, with a MATLAB-like syntax, supports signal processing and spectral analysis, funded by donations through OpenCollective.⁶ LabPlot excels in data visualization and analysis, offering features for curve fitting and peak analysis, and is supported by donations via Liberapay.⁷ SciLab facilitates numerical computations and spectral analysis, allowing custom algorithm development, and is sustained by community contributions and institutional support. These tools are free alternatives to commercial software like MATLAB, OriginPro, Igor Pro, and LabVIEW.

2.2 Orange

Orange⁸ is an open-source, Python-based data analysis tool developed by the Bioinformatics Laboratory at the University of Ljubljana. It provides an intuitive, drag-and-drop interface for data mining and machine learning (see Figure 1), leveraging libraries like NumPy, SciPy, and scikit-learn. Spectral Orange is an add-on specifically for spectroscopic data analysis, offering tools for preprocessing, feature extraction, and machine learning. It allows tasks like baseline correction and peak detection, providing an open-source alternative to software like Origin. Both Orange, and its add-on, Spectral Orange are free, supported by community contributions, and funded through academic grants.

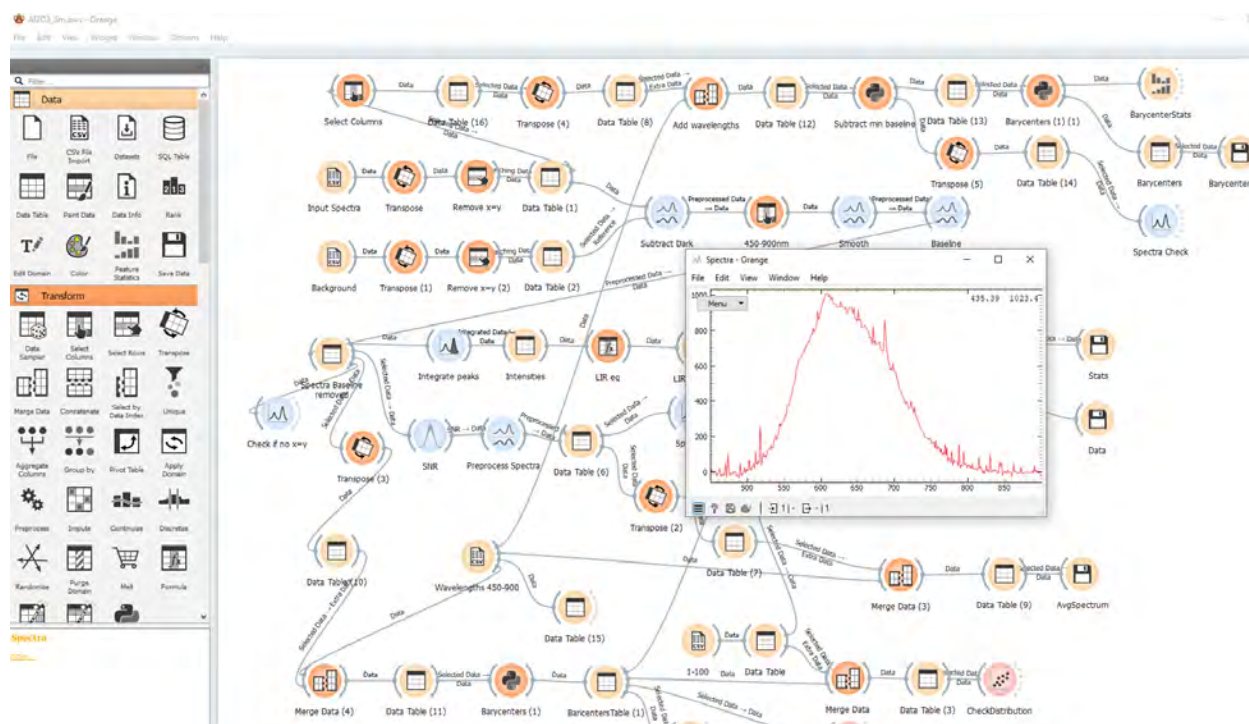


Figure 1. Example of Spectral Orange used for analysis of Sm^{2+} luminescence.

2.3 LumTHools

LumTHools⁹ is a Python-based software developed for the analysis of luminescence thermometry data, specifically designed to fit temperature-dependent models of luminescence. It allows researchers to process and analyze luminescence properties, such as intensities and decay

times, that vary with temperature (see Figure 2). Built with Python, LumTHools offers flexibility, making it easier for users to adapt or modify the tool to suit specific experimental needs. The main motivation behind its creation was to provide an accessible, powerful tool for accurately fitting temperature-dependent luminescence models. LumTHools has been highly successful, with the scientific paper describing it receiving a large number of citations, highlighting its significant impact in the field.

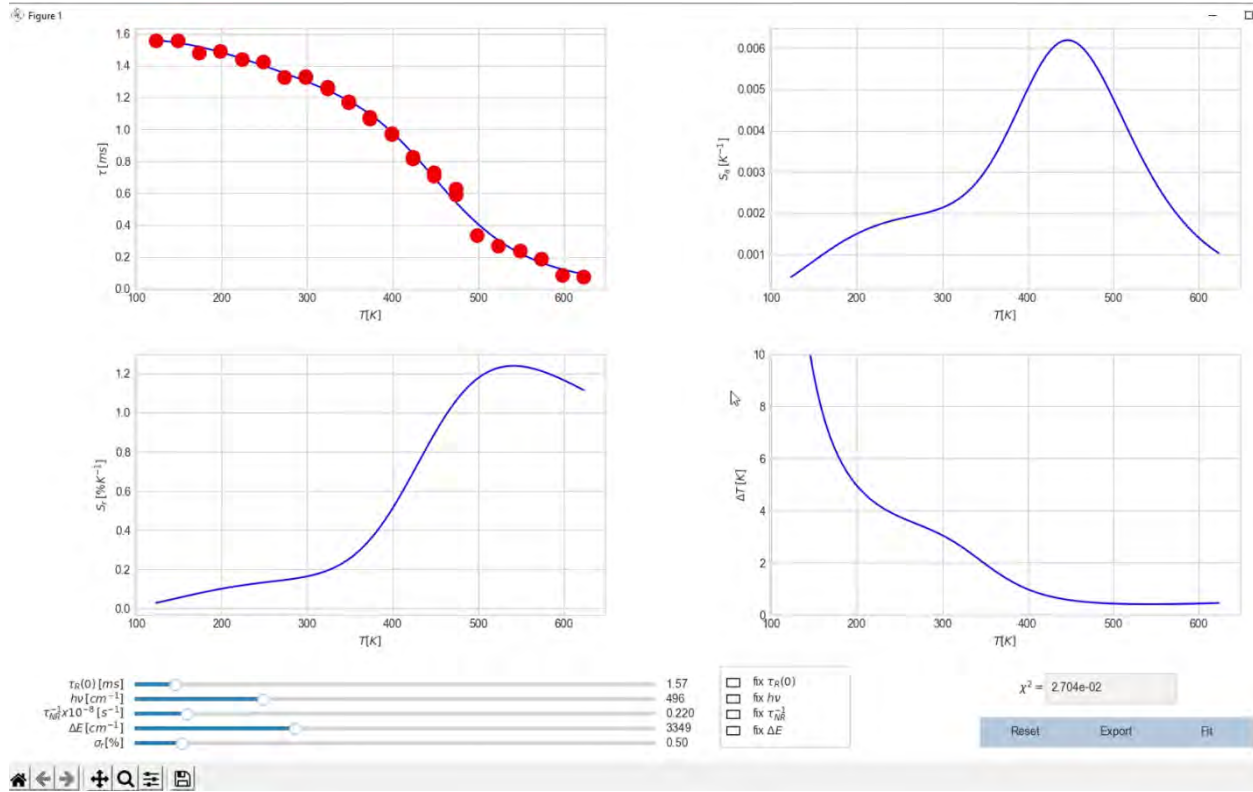


Figure 2. LumTHools used for fitting of Sm²⁺ luminescence lifetime vs temperature, and corresponding thermometric graphs.

2.4 Judd-Ofelt from the Emission spectrum

JOES¹⁰ (Judd-Ofelt Emission Spectra) is a Java-based software tool used for Judd-Ofelt analysis, which applies the Judd-Ofelt theory to study the optical properties of rare-earth-doped materials. The software facilitates the interpretation of emission and absorption spectra, providing key parameters such as radiative transition probabilities and branching ratios (see Figure 3). Developed to streamline the analysis process, JOES has become widely adopted in the scientific community, as reflected by its high citation count in related research papers.

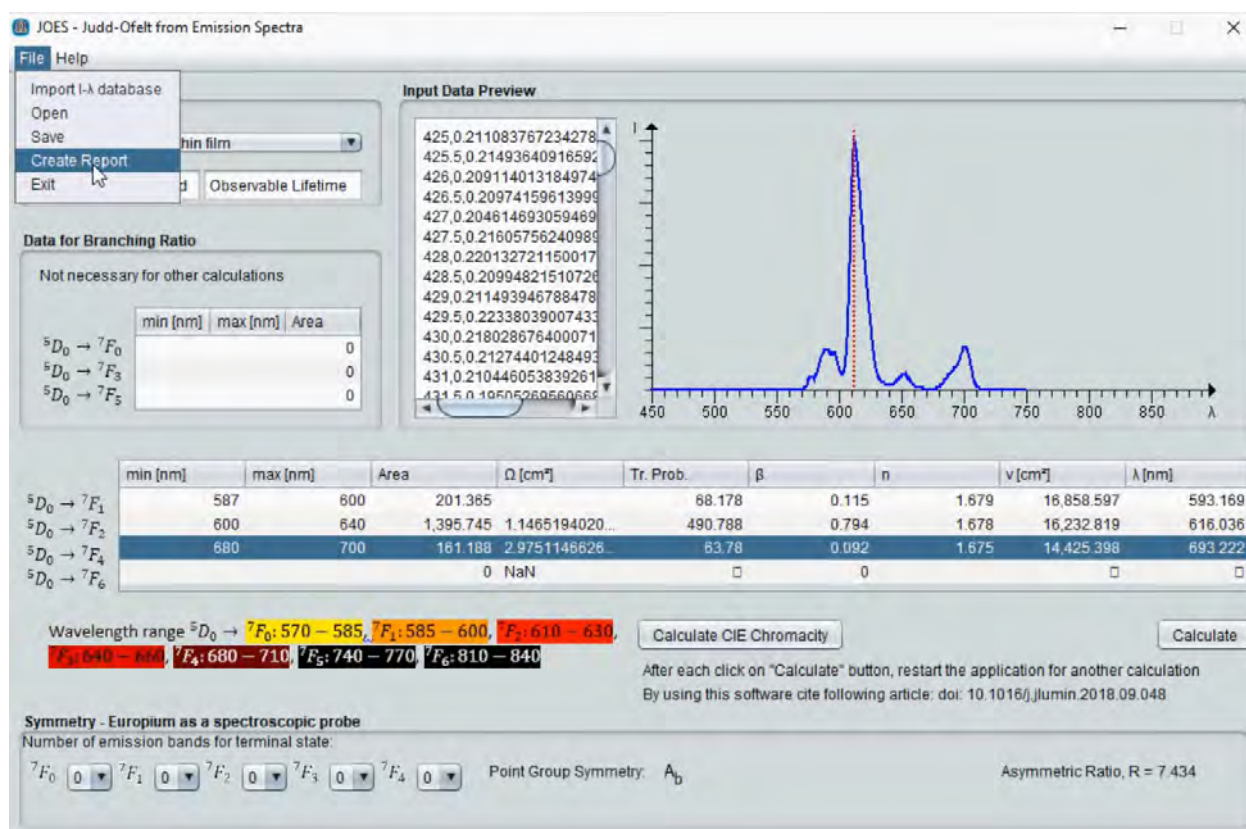


Figure 3. JOES software employed for JO analysis from TiO₂:Eu³⁺ emission spectrum.

3 Conclusion

The adoption of open-source scientific software in spectroscopic analysis represents a significant advancement in research methodology. GNU Octave, LabPlot, and SciLab offer robust, free alternatives to expensive commercial numerical computation tools, fostering greater accessibility and flexibility in spectral analysis. Orange enhances data mining and machine learning capabilities, particularly in spectroscopy, through its intuitive interface and specialized add-ons. LumThools addresses the specific needs of luminescence analysis with its customizable features for temperature-dependent model fitting. JOES provides valuable support for Judd-Ofelt analysis, streamlining the study of rare-earth-doped materials. Collectively, these tools not only contribute to the advancement of spectroscopic research but also underscore the value of open-source software in promoting scientific collaboration and innovation. The continued development and use of these tools are likely to further enrich the field and enhance the reproducibility and transparency of scientific research.

References

- [1] Fortunato, L.; Galassi, M. The Case for Free and Open Source Software in Research and Scholarship. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2021**, *379* (2197), <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0079>.
- [2] Bosin, A.; Dessì, N.; Fugini, M. G.; Liberati, D.; Pes, B. Open Source Environments for Collaborative Experiments in E-Science. In *Open Source Development, Communities and Quality*; Springer US: Boston, MA; pp 415–416. https://doi.org/10.1007/978-0-387-09684-1_41.
- [3] Eaton, J. W.; Bateman, D.; Hauberg, S.; Wehbring, R. {GNU Octave} Version 5.2.0 Manual: A High-Level Interactive Language for Numerical Computations. 2020. <https://www.gnu.org/software/octave/doc/v5.2.0/>.

- [4] Team, L. LabPlot: A FREE, Open Source, Cross-Platform Data Visualization and Analysis Software Accessible to Everyone. 2023. <https://labplot.kde.org>.
- [5] Scilab Enterprises. Scilab: Free and Open Source Software for Numerical Computation. 2024. <https://www.scilab.org>.
- [6] *Open Collective GNU Plot*. <https://opencollective.com/gnu-octave> (accessed 2024-09-28).
- [7] *LiberPay Labplot*. <https://liberapay.com/LabPlot/donate> (accessed 2024-09-28).
- [8] Demšar, J.; Curk, T.; Erjavec, A.; Gorup, Č.; Hočevár, T.; Milutinović, M.; Možina, M.; Polajnar, M.; Toplak, M.; Starič, A.; Štajdohar, M.; Umek, L.; Žagar, L.; Žbontar, J.; Žitnik, M.; Zupan, B. Orange: Data Mining Toolbox in Python. *J. Mach. Learn. Res.* **2013**, *14*, 2349–2353.
- [9] Ćirić, A.; Dramićanin, M. D. LumTHools - Software for Fitting the Temperature Dependence of Luminescence Emission Intensity, Lifetime, Bandshift, and Bandwidth and Luminescence Thermometry and Review of the Theoretical Models. *J. Lumin.* **2022**, *252*, 119413. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2022.119413>.
- [10] Ćirić, A.; Stojadinović, S.; Sekulić, M.; Dramićanin, M. D. JOES: An Application Software for Judd-Ofelt Analysis from Eu³⁺ Emission Spectra. *J. Lumin.* **2019**, *205*, 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2018.09.048>.

Analiza parametara leta i pokreta oka u izmenjenim uslovima simulacije korišćenjem slobodnog softvera – Eksperimenti sa primenom koncepta digitalne obuke i selekcije pilota

Aleksandar Knežević

Univerzitet odbrane – Vojna akademija, 11000, Beograd, Srbija
aleksandarknezevic75@gmail.com

REZIME

Potreba da se na avionima sa naprednim kokpitom obuka izvede na najefektivniji način dovela je do toga da se u obuci posveti veća pažnja korišćenju trenažera leta i sumulatora različitih nivoa vernosti. Procena napretka u obuci bitna je stavka u tom procesu kao i u realnoj obuci na avionima. Da bi se izbegla pristrasnost koju u ocenjivanje unosi ljudski faktor pored simulacionih softvera koji pokreću trenažere i simulatore moguće je primeniti niz manjih softvera koji mogu da zabeleže parametre leta i putanju aviona u simulaciji, koji se kasnije mogu iskoristiti za analizu uspešnosti leta. Pored performansi i putanje leta jedan od naprednijih načina za analizu primene znanja stečenih na teorijskim pripremanima u toku samog leta na trenažeru je i analiza interakcija između čoveka i mašine u vidu raspreda pomeranja pažnje, odnosno strategije osmatranja instrumenata i prenošenja pogleda sa jednog instrumenta na drugi. U ovom radu biće reči o upotrebi slobodnog softvera u R programskom jeziku koji pruža mogućnosti za izradu niza funkcija i potprograma za prikupljanje podataka o performansama leta i indikatorima pokreta oka u toku leta i njihovu kasniju analizu i prezentaciju.

Ključne reči: letačka obuka, parametri leta, pokreti oka, trenažeri, simulacija, slobodni softver.

1 Uvod

Zbog razvoja automatizacije i integracije sistema u kokpitima modernih civilnih aviona, prethodne metode obuke fokusirane na vežbanje specifičnih situacija putem ponavljanja više nisu dovoljne ukoliko se u letu pojavi potreba za reagovanjem u neočekivanim situacijama [1]. U skladu sa prethodnim tvrdnjama su i rezultati istraživanja Lefranciois i drugi [2] gde su kaže da su piloti postali „zavisni“ od automatizacije i zapostavili veštinu manuelnog letenja. Kao posledica toga došlo je do učestale pojave previda (ne kontrolisanja) pokazivanja instrumenta što je rezultovalo kritičnim situacijama posebno u toku sletanja. Sličan tip automatizacije u nekoj meri primenjen je u

izgledu kopita modernih aviona za obuku a koji se pre svega ogleda u primeni integrisanog Elektronskog sistema letnih instrumenata (EFIS – eng. *Electronic Flight Instrument System*). Ovakav tip aviona za obuku je poznatiji pod nazivom Tehnološki napredni avion (TAA- eng. *Technically Advanced Airplane*) [3]. Razlika koja je očigledna u odnosu na stariji tip instrumentalne table gde je postojalo šest osnovnih instrumenata kružnog oblika („six pack“) ,umesto dva ili tri digitalna ekrana kako izgleda sada, proteže se i izvan samog izgleda. Problem je u tome što niko od proizvođača nove avionske opreme nije prezentovao etiku korišćenja, odnosno osmatranja, digitalnih instrumenata na način kao što je to bilo razrađeno za stariju generaciju.

U mnogim studijama, konvencionalna simulirana okruženja visoke i niske vernosti korišćena su kao radna okruženja u eksperimentima sa indikatorima performansi leta i pomeranjem pogleda. Efikasnost simulatora različitih vernosti u obuci je uglavnom procenjena proučavanjem sposobnosti prenosa obuke (Transfer obuke eng. *TOT- Transfer of Training*) iz simulatora u stvarni avion. Međutim, oslanjanje na ljudske sakupljače podataka (Instruktore i Ispitivače) za proučavanje ovog prenosa obuke izazvalo je zabrinutost u vezi sa potencijalnim predrasudama koje mogu uticati na tačnost rezultata. Analizom rezultata i postavki prethodnih studija koje su se bavile tematikom napretka u obuci istraživački tim Vojne akademije je pokušao da otkloni neke nedostatke i uveo kontinuirano digitalno praćenje performansi leta u proceduru evaluacije napretka obuke kako bi se prikupio maksimalni uzorak podataka i na taj način prevazišli pre svega problemi sa malom grupom pilota kao veličinom uzorka.

Mogućnost prenosa obuke iz simulatora u stvarni avion zavisi od više faktora a jedan od njih je i vernost simulatora, odnosno mere do koje simulator oponaša stvarni avion. Prema jednoj studiji [4] postoje četiri kvalitativna pokazatelja koji određuju stepen vernosti i to:

- Vizuelna vernost (vernost prikaza scenarija van kabine aviona);
- Fizička vernost (vernost prikaza instrumenata i oblika i veličina poluga i prekidača u kabini);
- Kretna vernost (simulacija sila i momenata kretanja aviona kroz prostor);
- Kognitivna vernost (mogućnost izvođenja kompleksnih zadataka).

Variranjem stepena i odnosa pojedinih pokazatelja vernosti menjaju se uslovi simulacije, odnosno dobija se drugačiji tip simulatora. Poređenjem performansi tokom izvođenja letačkih zadataka na pravom avionu, koje polaznici obuke postižu, može se utvrditi razlika doprinosa obuci različitih tipova simulatora. Praćenje performansi izvođenja letačkih zadataka i napretka u obuci u simuliranom okruženju potrebno je da bi se identifikovali pokazatelji vernosti koji imaju uticaja na takav ishod.

Imajući u vidu da sve veću dostupnost trenažera zasnovanih na virtuelnoj tehnologiji i njihovu relativno laku dostupnost postavilo se pitanje da li oni mogu da obogate kurikulum letačke obuke i doprinesu povećanju prenosa znanja. Kako bi ispitao ovu mogućnost istraživački tim Vojne akademije napravio je eksperiment sa izmenjenim uslovima simulacije gde je konvencionalno vizuelno okruženje zamenjeno virtuelnim. Promenjena vizuelna vernost simulatora u kojem su kadeti-piloti leteli zahtevala je da se ispitanici podele u dve grupe. Na kraju studije, završni ispitni let je izveden korišćenjem konvencionalnog uređaja za obuku kako bi se uporedila dostignuća eksperimentalne grupe sa simulatora virtuelne stvarnosti sa onima iz kontrolne grupe. Ovakav tip studije naziva se i kvazi transfer tip studije. Dodatno su prikupljani podaci o pokretima očiju kako bi se proučili efekti strategija osmatranja instrumenata na performanse leta.

Za razliku od ranijih studija gde je prikupljanje podataka vršeno od strane instruktora letenja ili ispitivača i koje ima svojih nedostataka kao polaznu osnovu za istraživanje koja je vršio tim Vojne

akademije poslužile su neke od studija gde je prikupljanje podataka i kasnija ocena performansi vršena softverskim putem. Zbog velike sličnosti sa istraživanjima na Vojnoj akademiji izdvajaju se dve studije. U svojoj studiji Lawrynczyk [5] je koristila sličan scenario prilikom ispitivanja mogućnosti korišćenja VR za obuku pilota, umesto ili pored tradicionalnih simulatora letenja. Studija koju su radili Oberhauser i kolege [6] poredila je funkcionalnu vernost simulatora letenja virtuelne stvarnosti (VRFS eng. - *Virtual Reality Flight Simulator*) sa konvencionalnim simulatorom letenja. Ispitivana su vremena reakcije pilota da bi se dosegle kontrole u kokpitu, odstupanje od idealne putanje leta, radno opterećenje i bolest kretanja u simulatoru. Prikupljanje i ocenu performansi softverskim putem primenjivali su još i Ayala i drugi [7], Yang i drugi [8], McGowin i drugi [9], Reweti i drugi [10], Le Ngoc i drugi [11].

U ovom radu biće prikazan način na koji su bili razvijani eksperimenti i organizovano ispitivanje perceptivnih i motornih sposobnosti kadeta pilota u letovima u simuliranom okruženju a koje je kasnije nastavljeno ispitivanjem koncepta digitalne obuke i selekcije pilota. U prvom delu objašnjena je potreba za pouzdanijim prikupljanjem, obradom i prezentacijom podataka o parametrima leta koja se javila tokom istraživanja i mogućnostima slobodnog softvera da reši taj problem. Prezentovani su primeri studija dugih autora i upotreba konkretnih funkcija i paketa za rešavanje zadataka postavljenih u ispitivanjima koja su sprovedena na Vojnoj akademiji. U drugom delu rada prikazan je način na koji se pomoću slobodnog softvera u kombinaciji sa uređajima za praćenje pokreta oka mogu odrediti strategije osmatranja instrumenata i okoline aviona. Primeri strategija koje su detektovane kod ispitanika vizualizovane su pomoću slobodnog softvera i pomogle su da se uparivanjem sa prethodno zabeleženim performansama leta odredi njihova uspešnost.

2 Analiza podataka o parametrima leta dobijenih iz simulatora

U ovom poglavlju prikazan je eksperiment koji je sproveden sa kadetima pilotima Vojne akademije u letovima u simulatorima sa različitim vizuelnim okruženjem odnosno različitom vizuelnom vernošću. Suština je bila da uoče eventualne razlike u performansama leta i da se podaci prezentuju na najbolji način. Primer ove i sličnih studija poslužio je da se ispita upotreba slobodnog softvera u ove svrhe.



Slika 1 Trenažer aviona Lasta korišćen za potrebe proučavanja Strategije osmatranja instrumenata u digitalnom kokpitu (desno) sa uređajem za snimanje pokreta oka (zaokružen žutom bojom) i kontrolni ekran aplikacije Gazepoint Analysis (levo).

Za eksperiment u kojem je vršeno poređenje parametara leta (VA-TT/2/24-26), PC simulator letenja koji su u ranijim istraživanjima (VA-TT/5/13-15 i VA-TT-2/19-21) koristili istraživači sa Vojne akademije i koji je opisan u studiji Vlačić i ostali [12] posebno je nadograđen sa Centurion 270

PRO cilindričnim 270° vizuelnim sistemom kompanije Simpiti Technologies kako bi se povećala njegova vernost u pogledu vidnog polja. Eksperiment je koristio dodatak za avion Lasta, vojni avion za obuku koji spada u kategoriju tehnološki naprednih aviona zbog svojih integrisanih elektronskih instrumenata (EFIS). Nova hardverska konfiguracija računara komercijalno dostupna tokom eksperimenta omogućila je bolji rad sa više frejmova i sa zakrivljenom projekcijom spoljnog scenarija sa rezolucijom od 3080 puta 1024 piksela. Slika 1 prikazuje trenažer sa podešavanjima iz eksperimenta i uređajem koji snima pokrete očiju u pozadini.

Dodatak za softver Microsoft FSX za avion Lasta poboljšan je dodatnim softverom pod nazivom FlyInside FSX firme FlyInside Inc. 2018. To je omogućilo postavljanje modela aviona Lasta u virtuelnu stvarnost uz pomoć seta Oculus Rift Virtual Reality. Softver Flyinside koristi funkcije Microsoft Flight Simulatora i dodaje interfejs VR okruženja. Dinamika leta i karakteristike originalnog softvera ostaju isti. Slika 2 prikazuje spoljašnjost VR simulatora letenja (levo gore), i scenografiju leta i prezentaciju VR simulacije u kokpitu (desno).

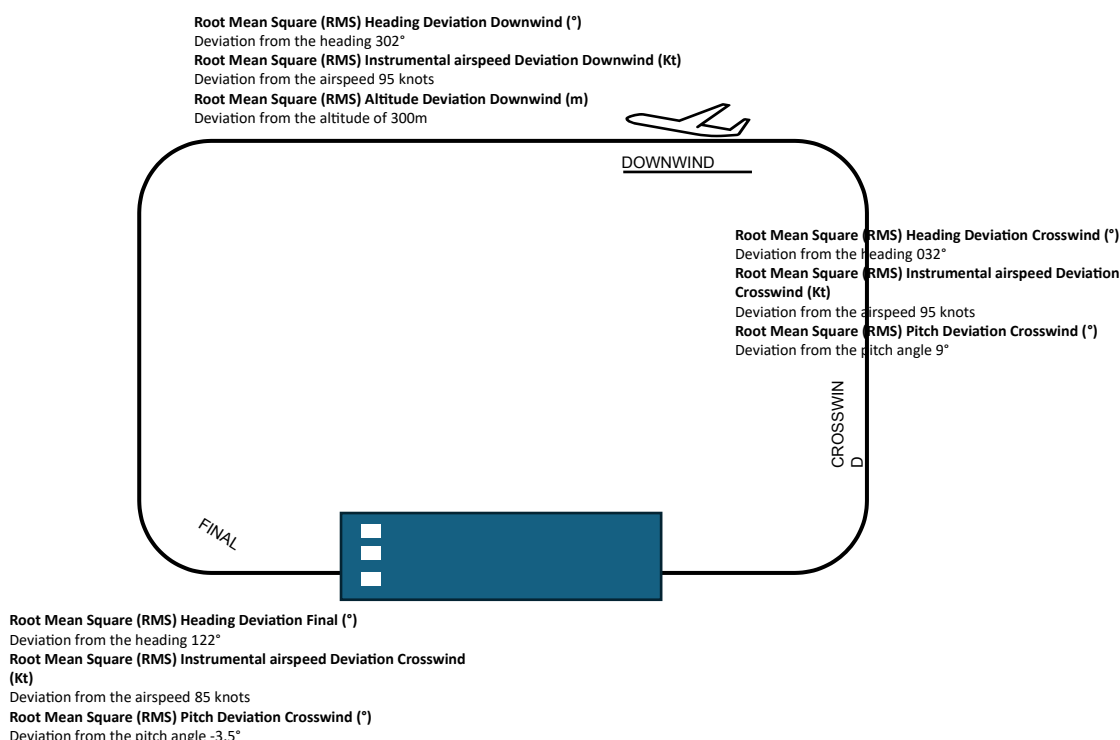


Slika 2 VR Testiranje trenažera aviona Lasta (levo gore) i izgled virtuelnog kabinskog prostora (desno). VR trenažer korišćen za eksperimentalnu grupu ispitanika za pri proučavanju strategija osmatranja instrumenata. Slika iz mešane realnosti softvera FlyInside FlyInside Inc. 2018 .

Na slici broj 3 nalazi se šematski prikaz konstrukcije školskog kruga koji se inače primenjuje u obuci za uvežbavanje poletanja i sletanja na avionu Lasta. Isti ovaj školski krug uvežbavan je od strane ispitanika koji su učestvovali u ispitivanju poređenja performansi leta i strategije osmatranja instrumenata na trenažerima različite vernosti.

U studiji [12] korišćen je Modul snimač podataka (FS Recorder) koji je stvorio Matthias Neusinger (2007-2010) da bi se zabeležili podaci o performansama leta sa simulatora. FS Recorder je slobodni softver koji dodaje funkcije snimanja i reprodukovanja letova osnovnom softveru. Ovaj softver je korišćen za snimanje parametara podataka o letu tokom svih letova u konvencionalnom simuliranom okruženju i VR. Može da snima i reprodukuje letove gotovo neograničene dužine. On čuva podatke u sopstvenom ".frc" formatu podataka. Osim toga, korišćen je FS Recorder konverter kreiran od strane Matthias Neusinger (2007-2010) za pretvaranje FS Recorder „.frc“ datoteke u tekstualne datoteke. Nakon konverzije, stvarni podaci o letu se formatiraju u redove i kolone, gde svaki red sadrži jedan skup parametara (u daljem tekstu nazvan uzorak podataka), a svaka kolona

predstavlja određeni parametar. Svaka linija predstavlja jedan uzorak podataka i sastoji se od niza vrednosti razdvojenih razmakom (tabulatori ili razmaci). Ove vrednosti moraju da odgovaraju definicijama kolona (tj, geografska širina, dužina, nadmorska visina, visina, nagib, smer, položaj zakrilaca, instrumentalna vazдушna brzina (IAS – *eng. Indicated Airspeed*), stvarna vazдушna brzina (TAS – *eng. True Airspeed*). Najvažnija kolona za sinhronizaciju snimaka praćenja očiju i performansi leta je kolona "vremenska oznaka", koja beleži vremenski broj (sekunde) od početka snimanja za svaki parametar koji čini taj red podataka (tj. geografska širina, dužina, nadmorska visina, visina, nagib). Na taj način, moguće je uporediti događaje u simulaciji sa tajmerom koji broji vreme unutar softvera za praćenje očiju, jer oni počinju da rade gotovo trenutno, odvojeni samo jednim klikom.



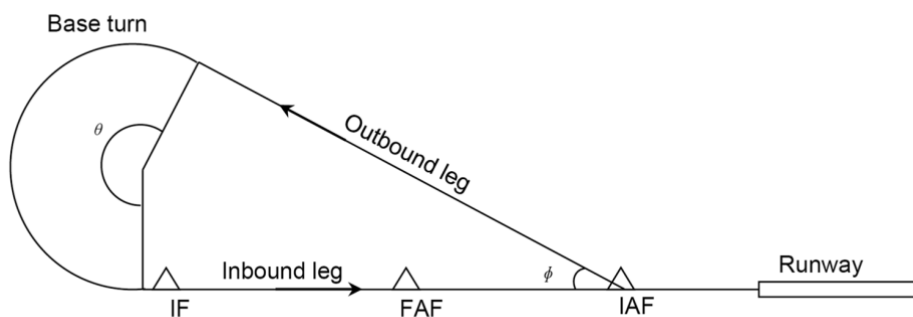
Slika 3 Prikaz konstrukcije školskog kruga (u horizontalnoj ravni) koji se primenjuje pri uvežbavanju procedure poletanja i sletanja na avionu Lasta i koji je korišćen kao postavka u eksperimentu sa trenažerima različite vernosti u studiji (VA-TT/2/24-26).

Oberhauser i drugi [6] su na sličnoj konstrukciji školskog kruga kao što je već prikazan na slici 3, koji je korišćen u istraživanjima tima Vojne akademije, ispitivali pored ostalih elemenata i performanse leta po sličnim segmentima (Crosswind, Downwind, itd. Slika 3). U samom radu [6] autori daju šematski prikaz arhitekture simulatora leta u virtuelnoj realnosti gde se vidi da je za prikupljanje i obradu podataka korišćen mrežni radni okvir slobodnog softvera pod nazivom robotski operativni sistem (ROS - *eng. Robot operating system*) koji su kreirali Quigley i drugi [13]. Sami autori robotskog operativnog sistema kažu da to nije operativni sistem već predstavlja komunikacioni sloj iznad osnovnog operativnog sistema koji povezuje heterogenu hardversku – softversku strukturu. U suštini je „jezički neutralan“ ali ima u sebi podršku za četiri potpuno različita programska jezika: C++, Python, Octave i LISP. U ovoj studiji [6] našao je svoju primenu obzirom da je pored simulacije scenarija školskog kruga u virtuelnoj realnosti i kabine aviona

simulator imao i hardverske komponente (pilotsku palicu i prekidače) koji su se nalazili na mestima gde bi bili i u virtuelnoj realnosti i na taj način su sačinjavali takozvani mešani model. Na osnovu datoteka izveštaja ROS autori su došli do određenih zaključaka koje ovde neće biti predmet razmatranja.

Druga studija koju su izveli Sun i kolege [1] je imala za cilj da kvantifikuje neke od pokazatelja novog tipa letačke obuke koja se još naziva i Obuka i procena zasnovana na kompetencijama (CBTA- eng. *Competency – based Training and Assessment*). Suštinski se kompetencija svodi na indikaciju ljudskih performansi koje mogu biti siguran pokazatelj uspešnog izvršenja nekog posla. S obzirom da je ovde reč o kompetencijama za bezbedno i sigurno upravljanje avionom definisano je 7 indikatora kompetentnosti (OB – eng. *Observable Behaviors*) u početnoj letačkoj obuci. Svi oni su procenjivani na osnovu toga koliko puta su se pojavljivali kod ispitanika i koliko često. Suštinske i osnovne za početnu obuku predstavljaju kompetencije vezane za merenje i ocenu performansi leta aviona kao što su kontrola položaja aviona, kontrola putanje aviona i bezbedno upravljanje po trajektoriji. Podaci iz letačke obuke analizirani su na principu teorije sličnosti krivih i algoritmom za brzo pronalaženje vremenskih serija. Kao scenario za procenu poslužio je nešto drugačiji patent za sletanje nego u prethodnim studijama a predstavlja konstrukciju zalaznog zaokreta u obliku kaplje koji služi za sletanje u instrumentalnim meteorološkim uslovima (Slika 4).

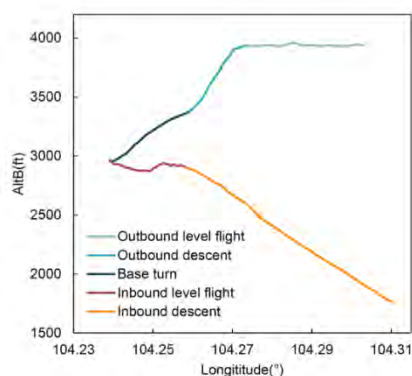
Kako autori navode u tekstu rada svi podaci su sakupljeni pomoću Snimača parametara leta na samom avionu (Cesna 172) i sačuvani u digitalnom obliku na memorijskoj kartici. Nakon sletanja je na zemlji vršeno filtriranje podataka da bi se dobili samo parametri koji su bili relevantni za sadržaj istraživanja, kao što su geografska dužina, geografska širina, visina, nagib i instrumentalna brzina. Drugo, na osnovu tačaka kao što su tačka početnog prilaza (IAF -Initial approach Fix), središnja tačka prilaza (IF – Intermediate Fix) i tačka završnog prilaza (FAF- Final Approach Fix) (Slika 4) i pozicije njihovih geografskih širina i dužina, kao karakteristika konstrukcije kaplje za sletanje dobijeni su podaci za istraživanje. Svi pomenuti procesi predobrade i naknadne analize podataka vršeni su u Python okruženju korišćenjem Visual Studio Code softvera [1]. Način na koji su prikupljeni podaci nije ništa drugo nego zapis parametara leta koji se može zabeležiti i na indikatoru parametara motora kao što je to slučaj sa uređajem MVP-50P koji se koristi u pravom avionu Lasta sa kojeg se mogu izvući sve potrebne norme koje su zabeležene u istoj formi kao na FS rekorderu koji je korišćen za snimanje podataka na simulatoru leta aviona Lasta.



Slika 4 Konstrukcija zalaznog zaokreta za sletanje u obliku kaplje koji je analiziran u radu Sun i ostali [1], <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Na osnovu podataka sa snimača leta, a nakon analize, autori su dobili predstavu kretanja vazduhoplova u horizontalnoj ravni u proceduri sletanja koja izgleda kao na slici 5. Poređenjem ocene odstupanja parametara leta koja je dobijena putem softvera i ocenama koje su instruktori

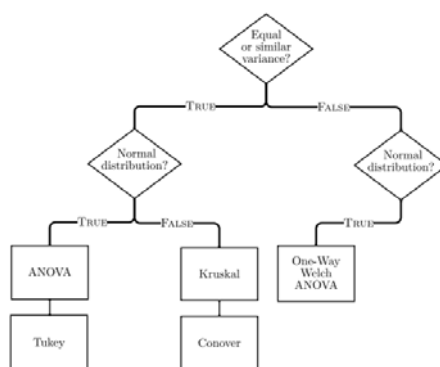
letenja dali učesnicima u samom letu dobijena je korelacija od 0.947 na osnovu čega su autori zaključili da ovakav model može biti korišćen za ocenu performansi leta pilota na obuci.



Slika 5 Horizontalna projekcija trajektorije vazduhoplova u proceduri za sletanje iz rada Sun i drugi [1], <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Kao što je već konstatovano na početku ovog rada u poslednje vreme došlo je do velike ekspanzije i prelaska sa obuke na pravim vazduhoplovima (živa obuka- *eng. Live training*) na obuku na simulatorima a to je posebno karakteristično za vojnu obuku koja je inače skupa i sa sobom nosi velike rizike. Ideja autora softvera „AsaPy“ čije ime predstavlja skraćenicu od naziva Python biblioteka za analizu Aeronautičkih simulacija (*A Python Library for Aerospace Simulation Analysis*) je bila da analizu gomile podataka koju generišu simulacije i koja može biti opterećujuća i nesavladiva pojednostave i učine ekspeditivnijom.

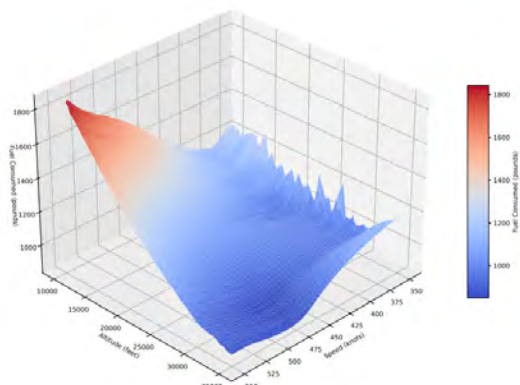
Kao rezultat toga nastala je, AsaPy, prilagođena Python biblioteka, dizajnirana u kontekstu vazduhoplovnih simulacija (*Aerospace Simulation Environment*) kako bi se pojednostavila i ubrzala analiza podataka sa vojnih simulacionih platformi, odnosno kako bi se podržao proces donošenja odluka [14]. Dijagram toka za testiranje hipoteza korišćenjem AsaPy softvera grupe autora Dantas i drugi [14] data je na slici 6 i može se videti da u sebi uključuje pre svega tehnike za proveru skupa podataka na određivanje normalnosti raspodele i kasnije podešavanje statističke distribucije podataka.



Slika 6 Dijagram toka za testiranje hipoteze korišćenjem „AsaPy“ softvera iz rada Dantas i drugi [14]. Slika iz rada dozvoljena za reprodukciju u nekomercijalne svrhe.

Kada je reč o predikciji performansi koja se dobija na osnovu proverenih hipoteza autori navode primer navigacijskog leta vojnog lovačkog aviona gde je istraživani međusobni uticaj visine leta,

brzine aviona i potrošnje goriva. Cilj je bio da se izdvoje momenti u kojima dolazi do vrhunca potrošnje goriva. Na slici 7 prikazani su rezultati.



Slika 7 3D dijagram koji ilustruje međusobni odnos između brzine, visine i potrošnje goriva iz rada Dantas i drugi [14]. Slika iz rada dozvoljena za reprodukciju u nekomercijalne svrhe.

Iz prethodno prezentovanih studija može se videti da je sem izuzetka ROS softvera koji je korišćen u Radu Oberhauser i ostali [6] korišćenje slobodnog softvera uglavnom svedeno na funkciju za obradu podataka, a to je proces koji može da se poistoveti sa statističkom analizom koja se može uraditi i u R programskom jeziku. Mnogi autori koriste R okruženje za statističku analizu i prezentaciju podataka obzirom da je R okruženje pogodno za razvoj brojnih alati za analizu simulaciju i prognozu [15].

Da bi uneli što više „pilotskog“ razmišljanja i poistovetili proces izdvajanja bitnih podataka o parametrima leta u određenim segmentima leta u studiji o analiza parametara leta i pokreta oka u izmenjenim uslovima simulacije koja je sprovedena na Vojnoj akademiji, napravljena je u R programskom jeziku funkcija „Proračun“. Napravljena je za izdvajanje i analizu podataka o performansama leta po segmentima školskog kruga, odnosno u nju je već unapred ubačen deo pilotskog znanja i iskustva. Jedan deo znanja potiče od toga da je način na koji se ocenjuju performanse leta u školskom krugu, to jest koji se parametri tačno posmatraju kod učenika, izdvojen iz niza drugih parametara. Drugi deo znanja potiče od toga da je veličina normi koje se ocenjuju i porede zadata prema zvaničnim metodičkim priručnicima koji služe kao vodiči u obuci i koji su napisani iz iskustva iz niza letova koji su tome prethodili. Odnosno, veoma bitna stvar koja je primenjena u ovoj studiji je broj letova koji se daju za uvežbavanje kao norma koja je definisana metodičkim priručnicima i predstavljaju niz znanja koja se prenose i uvežbavaju iz leta u let.

Svaki let uvežbavanja po vežbi školskih krugova sadrži šest školskih krugova, odnosno šest poletanja i sletanja. Nakon što se csv. datoteka za jednog od ispitanika uveze u R okruženje, za početak, bitno je izdvojiti vremenski okvir u kojem se svaki pojedinačni školski krug odvija. To se postiže filtriranjem na osnovu promenljive koja sadrži vrednost 0 ako je avion u vazduhu ili 1 ako je avion na zemlji. Pošto je avion u ovom slučaju kratko vreme na zemlji pogodnije je da se filtrira na osnovu vrednosti 1. Dobijene krajnje vrednosti kolone vremenska oznaka, između kojih postoji prekinuti vremenski niz predstavljaju početak odnosno kraj jednog školskog kruga. Funkcija filtrira ovu promenljivu i upisuje delove originalne tabele u tabelu „Vremena“ koja ima poseban dodatak imenu za svakog ispitanika i za svaki njegov let. Ispod je dat primer za ispitanika broj pet i za njegov let broj 2.

```
Vremena_Ispitanik5_test2<- mydata %>% filter(onground==1)
```

Nakon toga se za date vremenske okvire u kojima se odvijaju školski krugovi na osnovu filtriranja po više zadatih kriterijuma dolazi se do određenih segmenata školskog kruga, kao što je prikazano na primeru ispod, koji predstavlja poslednji korak filtriranja za segment završnog prilaženja (final) koji se može videti na slici 3.

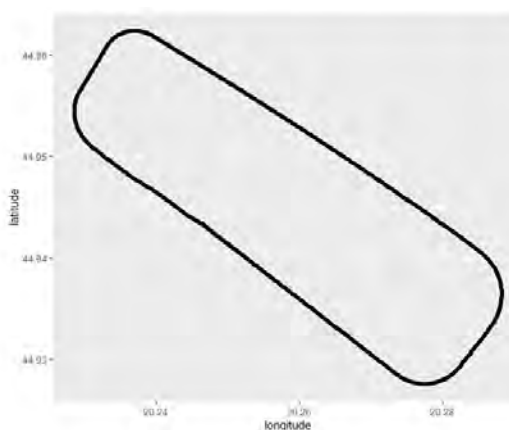
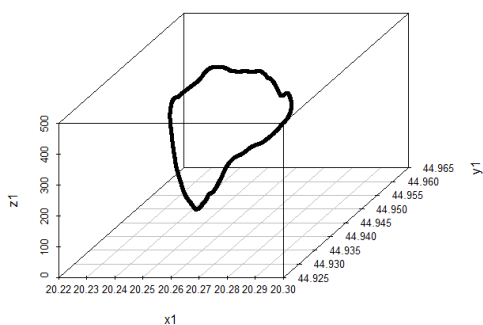
```
final16<- mydata %>% filter(between(timestamp,f,g))
```

Ovde je posebno pogodna upotreba Pipe operatora „%>%“ koji je u stvari deo paketa „dplyr“ [16] i pomoću kojeg se gotov proizvod jedne funkcije može koristiti kao argument naredne pa je tako moguće na koncizan način povezati više operacija u jednu.

Na kraju se za svaki od segmenata školskog kruga odnosno za svaki parametar leta koji je bitan mogu se odrediti odstupanja od potrebne vrednosti. Na primeru ispod prikazano je kako se računa srednje kvadratno odstupanje kursa leta od zadane vrednosti 122° u završnom prilaženju (segment „Final“ na slici 3.)

```
else{ if(l!="final"){
  p6<- abs(fww$heading-122) #daje promenljivu vrednost u odnosu na zadani kurs#
  prenos6<- data.frame(p6)
  rms_final_head<- sqrt(mean(prenos6$p6^2))
  Zapis_final$head_sixth_circle<- prenos6$p6
  Zapis_final$alt[6]<- fww$altitude[1]
  Zapis_final$hdg[6]<- fww$heading[1]
  Zapis_final$rms[6]<- rms_final_head
  print("rms_final_head")
  print(rms_final_head)
```

Kako bi se prikazala putanja leta po školskom krugu moguće je analizirati podatke po svim tačkama putanju leta u okviru zadatog vremenskog okvira i po geografskim koordinatama pomoću paketa „ggplot“ [17] prikazati na 2d grafikonu (Slika 8 desno) ili u 3d prikazu sa vrednostima visine (Slika 8 levo) pomoću niza naredbi ispod.



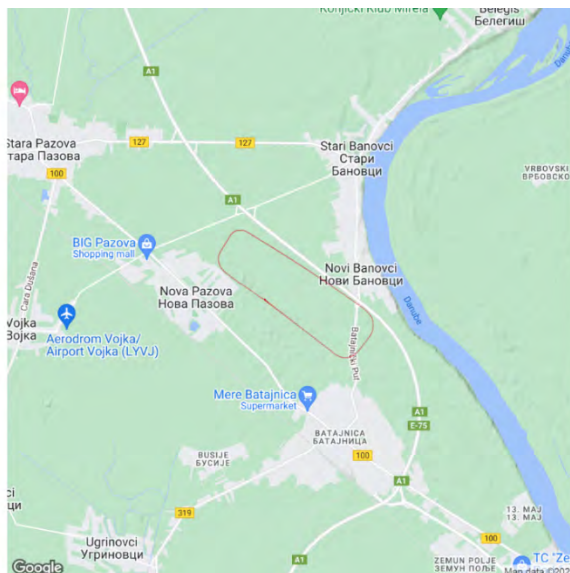
Slika 8 2D prikaz putanje leta po školskom krugu aviona Lasta u geografskom koordinatnom sistemu (desno) 3 D prikaz putanje leta po školskom krugu aviona Lasta u geografskom koordinatnom sistemu sa prikazom visine (levo). Izvor: Aleksandar Knežević.

```
ggplot(mydata, aes(x=longitude, y=latitude))+
  coord_quickmap()+
  geom_point()
```

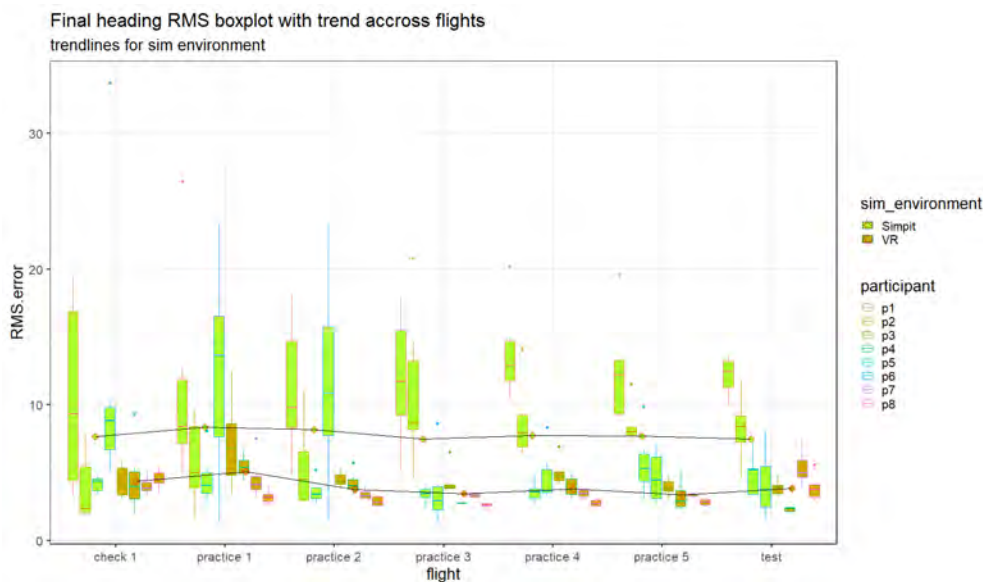
Na sličan način, pomoću funkcije „ggmap“ moguće je crtati podatke na Google mapama za koje je prethodno potrebna registracija kod kompanije Google kao „developer“, da bi se dobio API ključ sa

kojim se pomoću niza naredbi, datih ispod, putanja sa slike 8 (desno) može ucrtati na Google mapu. Putanja školskog kruga iznad aerodroma Batajnica na Google mapi prikazana je na slici 9.

```
mapimagedata1 <- get_googlemap(center= c(lon=mean(mydata$longitude), lat=mean(mydata$latitude)), zoom=12,
size=c(640,640),scale=2, format="png8", maptype=c("terrain"))
```



Slika 9 Prikaz putanje školskog kruga aviona Lasta iznad aerodroma Batajnica na Google mapi kreiran pomoću funkcije „ggmap“ u R programskom jeziku.



Slika 10 Sumarna statistika za srednje kvadratno odstupanje od kursa završnog prilaženja za svakog ispitanika iz eksperimentalne grupe (VR)- gore i kontrolne grupe (Simpit)- dole, sa linijom trenda po letovima za grupe ispitanika.

Na kraju istraživanja, podaci dobijeni analizom zapisa sa datoteka snimača leta u konvencionalnom i virtuelnom okruženju otkrivaju nam da je izrazit i karakterističan napredak grupe koja je uvećavala školski krug u virtuelnom okruženju. Bolji rezultati ove grupe su evidentirani čak i kada

su nakon uvežbavanja vraćeni na testiranje na konvencionalnom simulatoru zajedno sa kontrolnom grupom. Primer preciznijeg izlaska u pravac sletanja, odnosno manjeg odstupanja od idealne putanje zadanog kursa u završnom prilaženju dat je na slici 10. Grafički prikaz dat je korišćenjem funkcija „ggplot“ paketa i paketa „RColorBrewer“ u R programskom jeziku.

3 Analiza podataka dobijenih iz uređaja za snimanje pokreta oka

U ovo poglavlju biće objašnjen način na koji se tradicionalne mere tranzicije pogleda koje se snimaju uređajima za praćenje pokreta oka, pomoću slobodnog softvera mogu zameniti naprednijim prezentacijama i parametrima što je poslužilo kao osnova za izvođenje studije unapređenja selekcije pilota na Vojnoj akademiji. Studija koje je uspešno dokazala upotrebu uređaja za praćenje pokreta oka poslužila je kao pomoć pri izvođenju studije sa praćenjem parametara leta koja je prezentovana u prethodnom poglavlju.

Strategije pomeranja pogleda se definišu kao pokreti očiju koje pojedinac može da izvrši i koji su relevantni za letenje avionom. Konkretno, dva relevantna pokreta očiju su fiksacije (tj. Vreme koje protekne dok je nečiji pogled usmeren na jednu određenu lokaciju, ili broj pogleda u tu istu tačku) i sakade (tj. Brzo kretanje očiju iz jedne tačke fiksacije u drugu) [18]. U praksi se, barem kada je reč o vazduhoplovstvu tačka u kojoj se meri broj pogleda ipak definiše kao područje, odnosno kao područje od interesa (AOI – Area of Interest).

Sekvenca kretanja pogleda može početi od bilo kog drugog AOI i predstavlja povratnu putanju skeniranja ili "ponovnu posetu" sa bilo kojim drugim AOI. U rezultatima studije Lijing i ostali [19] gde su vršena istraživanja indikatora pokreta očiju u korelaciji sa tehnikom skeniranja instrumenata i performansama leta sa iskusnim pilotima i početnicima, posebno je objašnjeno kako amplituda sakade, ugao sakade i vreme kao indikatori fiksacije oka koreliraju sa veštinama letenja.



Slika 11 Izgled kokpita aviona Cesna 152 u simulaciji Microsoft flight simulator i 10 AOI za koje je sniman raspored osmatranja u studiji Ayala i ostali [7], <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

U studiji koju je istraživala uticaj težine letačkog zadatka na strategiju osmatranja instrumenata kod pilota sa manjim letačkim iskustvom vršena je analiza na bazi entropije na 10 AOI (Slika 11) u simuliranom scenariju sletanja [7]. Zatim je generisan niz lokacija fiksacije za svaki let. Potrebni kodovi su napisani su u Python okruženju za izračunavanje statičke entropije pogleda SGE (Static Gaze Entropy) i Entropije tranzicije pogleda GTE (Gaze Transition Entropy). SGE je mera disperzije pogleda koja se izračunava u datom periodu gledanja. Što su više ravnomerno raspoređene fiksacije širom AOI (tj. šira disperzije pogleda), to je veća entropija. Entropija

tranzicije pogleda (GTE) ispituje složenost sekvence fiksacije kroz analizu matrica tranzicije pogleda.

Sličan pristup kao što je mera Entropija tranzicije pogleda razvili su Mandal & Kang [20] u svojoj studiji. Primenjena je mrežna analiza pokreta oka za dinamičke zadatke, gde su različiti AOI prikazani kao vrhovi mreže (čvorovi), a tranzicija pogleda među njima je predstavljena usmerenim putanjama između vrhova mreže. Razvijanje vizualizacije zasnovane na mreži i ostali slični pokušaji su težnja da se tradicionalne mere tranzicije pogleda kao što su broj i trajanje fiksacija, koje nisu davale dovoljno pouzdano pokazivanje razlike u strategijama osmatranja, zamene pouzdanijim. Vizualizacija i merenje tranzicije pogleda zasnovano na mreži zahteva prvo kreiranje AOI matrice tranzicije, koja je tabelarna prezentacija prelaza fiksacije oka koji se javljaju između različitih AOI parova. Nakon toga, ove informacije o matrici tranzicije se koriste za razvoj mrežne prezentacije, koja vizualizuje strategiju vizuelnog skeniranja kod ispitanika.

Način prezentacije podataka za statičku mrežu kao u Mandal, Kang, & Millan [21] sa određenim prilagođavanjima korišćena je u radu Vlacic, Knezevic, Mandal, Rodjenkov, & Vitsas [12]. Predložena četiri AOI na simuliranom kokpitu aviona Lasta za potrebe ove studije vide se na slici 12. Snimanje pokreta oka vršeno je pomoću uređaja GP3 Desktop Eye Tracker firme Gazepoint (Slika 1) sa brzinom uzorkovanja od 60 Hz, i ugaonom preciznošću od 0.5°– 1°. U momentu startovanja simulacije i softvera FS Recorder startuje se i funkcija snimanja u softveru Gazepoint Analysis tako da se može uporediti vremenska linija snimanja parametara leta i tranzicije pogleda. Zanimljivo je napomenuti da razlika između broja AOI u primeru iz studija Ayala i drugi [7] (gde ih je bilo 10) potiče iz toga što je kokpit aviona Lasta opremljen elektronskim instrumentima koji objedinjuju pokazivanje više parametara na jednom prostoru što je upravo i navedeno u uvodu kao potreba da se sprovedu istraživanja. Za potrebe ove studije korišćen je „igraph“ paket [22] u R programskom jeziku za konverziju AOI matrica tranzicije (Tabela 1) u grafove. Postoji razlika sa predloženim bojama čvorova u odnosu na predloženi princip u Mandal, Kang, & Millan [21]. Na osnovu RGB palete RColorBrewer paketa u R programskom jeziku definisano je da: crvena boja znači nisko trajanje fiksacije, narandžasta boja znači duže trajanje fiksacije a žuta boja znači najduže trajanje fiksacije.

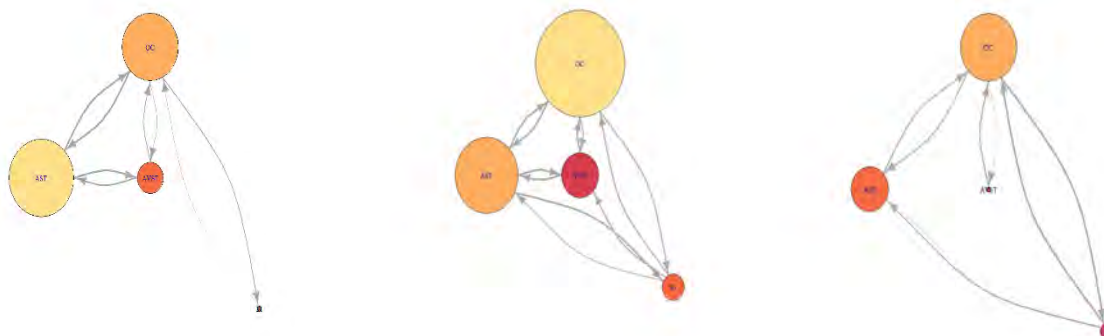


Slika 12 Izgled kokpita aviona Lasta u Microsoft Flight Simulator i 4 AOi za koje je sniman raspored skeniranja instrumenata u radu Vlačić i ostali [12] <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Tabela 1 Matrica tranzicije pogleda između AOI za ispitanika broj 9 u horizontalnom letu iz rada Vlačić i ostali [12] <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

FROM AOI	TO AOI			
	AST	AVST	EI	OC
AST	0	1	2	6
AVST	1	0	1	8
EI	1	0	0	3
OC	7	8	2	0

Rezultat konverzije matrica u grafove je jasna vizualizacija različitih strategija osmatranja instrumenata koja se može videti na slici 14 za ispitanike broj 2, broj 9 i broj 8 (slike sa leva na desno). Boje od crvene ka žutoj prikazuju duže trajanje fiksacija unutar pojedinog AOI. Dodatno, površina kruga predstavlja broj fiksacija unutar pojedinog AOI a debljina usmerenih putanja predstavlja broj tranzicija pogleda između AOI.



Slika 13 Vizualizacija strategija osmatranja instrumenata mrežnom metodom za ispitanike broj 2, broj 9 i broj 8 iz rada Vlačić i ostali [12], <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Da bi se različite strategije koje su vizualizovane na ovaj način statistički ispitale sprovedeni su proračuni središnjosti čvorova unutar grafova pomoću paketa „Igraph“ u R programskom jeziku. Ove mere svojstvene grafovima određuju relativnu važnost čvora u odnosu na graf. U pomenutoj studiji to su bile mere stepena središnjosti (eng. Indegree), središnjosti po bliskosti (eng. Closeness) i relaciona središnjost (eng. Betweenness). Dodatno, ove mere su normalizovane da bi se ustanovilo koliko je svaka od ovih mera udaljena od maksimalno zabeležene vrednosti unutar datog vremenskog intervala, odnosno u ovom slučaju faze leta.

4 Slobodni softver u studijama o avijaciji

Tabela 2 prikazuje pregled studija koje su prezentovane u ovom radu u kojima je korišćen slobodni softver za prikupljanje, obradu i prezentaciju podataka. Tabela pored tipa softvera sadrži i aktivnost za koju je korišćen kao i link sa kojeg taj softver može biti preuzet.

Tabela 2 Pregled studija o avijaciji u kojima je korišćen slobodni softver

Studija	Slobodni softver/paket/funkcija	aktivnost	link
Dantas i drugi (2024)	Python/ AsaPy	obrada podataka /predikcija/prezentacija	https://www.python.org/downloads/
Sun i drugi 2023	Python/Visual Code softver	obrada podataka/prezentacija	https://www.python.org/downloads/ https://code.visualstudio.com/
Oberhauser i drugi 2018 Quigley i drugi	C++, Python, Octave i LISP/ROS (Robot Operating System)	prikupljanje podataka/obrada podataka/prezentacija	https://code.visualstudio.com/ https://www.python.org/downloads/ https://octave.org/download https://common-lisp.net/downloads
Ayala i drugi 2023	Python	obrada podataka/prezentacija	https://www.python.org/downloads/
Vlačić i drugi 2020	R/igraph, RColorBrewer	obrada podataka/prezentacija	https://cran.r-project.org/bin/windows/base/ https://r.igraph.org/ https://cran.r-project.org/web/packages/RColorBrewer/index.html
Mandal i Kang 2018	R/igraph, RColorBrewer	obrada podataka/prezentacija	https://cran.r-project.org/bin/windows/base/ https://r.igraph.org/ https://cran.r-project.org/web/packages/RColorBrewer/index.html
Mandal. Kang i Milan 2016	R/igraph, RColorBrewer	obrada podataka/prezentacija	https://cran.r-project.org/bin/windows/base/ https://r.igraph.org/ https://cran.r-project.org/web/packages/RColorBrewer/index.html
Eksperimenti sa primenom koncepta digitalne obuke i selekcije pilota	R/dplyr, ggplot, ggmap, RColorBrewer, igraph/filter,Proracun	obrada podataka/prezentacija	https://cran.r-project.org/bin/windows/base/ https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html https://cran.r-project.org/web/packages/ggmap/index.html

5 Zaključak

Na nekoliko primera koji su navedeni u ovom radu može se videti da je upotreba otvorenog softvera dostigla visok nivo kada je reč o primeni u avijaciji ili vojnoj industriji. Poseban osvrt koji je napravljen a tiče se upotrebe otvorenog softvera u obuci pilota potvrđuje neke od prednosti njegove upotrebe.

Otvoreni softver kao što je R okruženje sa svojim paketima i funkcijama omogućuje rad sa velikom količinom podataka kao što su zapisi iz registratora parametara leta, bilo sa pravog aviona ili iz simulatora. U prvi plan dolazi mogućnost detaljne statističke obrade podataka koja može poslužiti u svrhu dokazivanja neke hipoteze ili poređenja grupa ispitanika. Na ovaj način mogu se stvoriti takozvane brze alatke koje mogu doprineti donošenju odluka u kom pravcu treba da se nastave eksperimenti. Sa druge strane mogućnost grafičkih prezentacija i simulacija procesa može da posluži boljem razumevanju odvijanja kompletnih procesa za one koji treba da postanu korisnici usluga obrade podataka.

U svakom slučaju to što su ovi softveri otvorenog tipa omogućavaju široku primenu bez ograničenja na neku granu nauke ili prakse i to ih preporučuje za upotrebu.

Zahvalnica

Ovaj rad je nastao iz niza eksperimenata koji je tim istraživača Vojne akademije izvodio za potrebe istraživanja na projektima Univerziteta odbrane u Beogradu „Primena digitalnog kabinskog prostora u obuci pilota“ (VA-TT/5/13-15), „Istraživanje perceptivnih i motornih osobina kadeta-pilota u instrumentalnom letenju na klipnim i mlaznim avionima“ (VA-TT/2/19-21). Primeri korišćenja R programskog jezika deo su istraživanja na projektu Univerziteta odbrane „Primena koncepta digitalne obuke i selekcije pilota“ (VA-TT/2/24-26). Trenažer leta aviona Lasta koji je korišćen u ovoj studiji je hardverska komponenta čiji se razvoj i izrada finansira iz sredstava Fonda za inovacionu delatnost Republike Srbije po projektu „Razvoj prototipa tranažera aviona Lasta“ TT-1083.

Želeo bih da zahvalim vanr. prof. dr Nadici Miljković na pozivu i podršci za ovaj rad.

Literatura

- [1] H. Sun, X. Zhou, P. Zhang, X. Liu, Y. Lu, H. Huang и W. Song, „Competency-based assessment of pilots' manual flight performance during instrument flight training.,“ *Cognition, Technology & Work*,, т. 25, бр. 4, pp. 345-356, 2023.
- [2] O. Lefranciois, N. Matton, G. Yves, V. Peysakhovich и M. Causse, „The role of Pilots' monitoring strategies in flight performance.,“ y European Association for Aviation Psychology Conference EAAP32, Cascais, Portugal, 2016.
- [3] AOPA Air Safety Foundation, „Technologicaly Advanced Aircraft Safety and Training,“ AOPA, Frederick, Maryland, 2007.
- [4] M. K. Kaiser и J. A. Schroeder, „Flights of fancy: the art and science of flight simulation.,“ y *Principles and Practice of Aviation Psychology*, CRC Press, 2003, pp. 435-471.

- [5] A. Lawrynczyk, Exploring virtual reality flight training as a viable alternative to traditional simulator flight training, Ottawa, Ontario, 2018.
- [6] M. Oberhauser, D. Dreyer, R. Braunstingl и I. Koglbauer, „What’s Real About Virtual Reality Flight Simulation? Comparing the Fidelity of a Virtual Reality With a Conventional Flight Simulation Environment,“ *Aviation Psychology and Applied Human Factors*, т. 8, бр. 1, pp. 22-34, 2018.
- [7] N. Ayala, A. Zafar, S. Kearns, E. Irving, S. Cao и E. Niechwiej-Szwedo, „The effects of task difficulty on gaze behavior during landing with visual flight rules in low-time pilots,“ *Journal of Eye Movement Research*, т. 16, бр. 1, 2023.
- [8] J. Yang, Z. Qu, Z. Song, Y. Qian, X. Chen и X. Li, „Initial Student Attention-Allocation and Flight-Performance Improvements Based on Eye-Movement Data,“ *Applied Science*, 2023.
- [9] G. McGowin, Z. Xi, B. O. Newton, G. Sukthankar, S. M. Fiore и K. Oden, „Examining Enhanced Learning Diagnostics in Virtual Reality Flight Trainers,“ y *Proceedings of the 2020 HFES 64th International Annual Meeting*, 2020.
- [10] S. Reweti, A. Gilbey и L. Jeffrey, „Efficacy of low-cost pc-based aviation training devices,“ *Journal of Information Technology Education: Research*, т. 16, pp. 127-142, 2017.
- [11] L. Le Ngoc и R. S. Kalawsky, „Visual Circuit Flying with Augmented Head-tracking on Limited Field of View Flight Training Devices,“ y *AIAA Modeling and Simulation Technologies (MST) Conference*, Boston, 2013.
- [12] S. Vlacic, A. Knezevic, S. Mandal, S. Rodjenkov и S. Vitsas, „Improving the pilot selection process by using eye-tracking tools,“ *Journal of Eye Movement Research*, т. 12, бр. 3, 2020.
- [13] M. Quigley, K. Conley, P. B. Gerkey, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, E. Berger, R. Wheeler и A. Ng, „ROS: an open-source Robot Operating System,“ y *ICRA Workshop on Open Source Software*, KObe, Japan, 2009.
- [14] J. P. A. Dantas, S. R. Silva, V. C. F. Gomes, A. N. Costa, A. R. Samersla, D. Geraldo, M. R. O. A. Maximo и T. Yoneyama, „AsaPy: A Python Library for Aerospace Simulation Analysis,“ y *SIGSIM-PADS '24: Proceedings of the 38th ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*, Atlanta GA, USA, 2024.
- [15] S. Krstonijevic, „General Additive Model for Electricity Load Prediction in R,“ y *PSSOH Proceedings 2020*, Belgrade, 2020.
- [16] H. Wickham, R. François, L. Henry, K. Müller и D. Vaughan, *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*, 2023.
- [17] H. Wickham, *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*, New York: Springer-Verlag, 2016.
- [18] G. Ziv, „Gaze Behavior and Visual Attention: A Review of Eye Tracking Studies in Aviation,“ *Journal of Aviation Psychology*, т. 26, бр. 3-4, pp. 75-104, 2016.
- [19] W. Lijing, L. Hongpeng, D. Dayong и S. Xiuly, „Relationship between the technical skills and eye-movement indicator of pilots,“ y *Preceedings of the 19th Triennial Congress of the IEA*, Melbourne, 2015.

- [20] S. Mandal и Z. Kang, „Using Eye Movement Data Visualization to Enhance Training of Air Traffic Controllers: A Dynamic Network Approach,“ Journal of Eye Movement Approach, т. 11, бр. 4, pp. 1-20, 2018.
- [21] S. Mandal, Z. Kang и A. Millan, „Data Visualiation of Complex Eye Movements Using Directed Weighted Networks: A Case Study on a Multi-Element Target Tracking Task,“ y Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 2016 Annual Meeting, Washington DC, 2016.
- [22] G. Csardi и T. Nepusz, „The Igraph Software Package for Complex Network Research,“ InterJournal, p. 1695, 2005.

Pregled odabranih alata slobodnog softvera za uređivanje video i audio zapisa

Nikolina Škorić

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 11000, Beograd, Srbija
elektronska pošta: nikolina.skoric01@gmail.com

REZIME

U vreme kada digitalna produkcija postaje sve prisutnija, analiza alata slobodnog softvera za uređivanje video i audio zapisa od suštinskog je značaja za širu dostupnost navedenih tehnologija. Ovaj rad pruža detaljan pregled pet odabranih alata slobodnog softvera s ciljem da se korisnicima ponude informacije o glavnim karakteristikama, prednostima i manama svakog alata. Odabrani alati su Shotcut, OpenShot Video Editor, Kdenlive, Blender i VidCutter. Kroz sprovedenu analizu, korisnicima se pomaže da odaberu alat prema sopstvenim potrebama i nivoima veštine koje poseduju. Na kraju, rad nudi uporedni pregled i preporuke alata za različite tipove korisnika u zavisnosti od slučajeva upotrebe, od osnovne montaže do napredne obrade.

Ključne reči: slobodan softver, video i audio obrada, Shotcut, OpenShot Video Editor, Kdenlive, Blender, VidCutter.

1 Uvod

U svetu digitalne produkcije, obrada video i audio zapisa postala je sastavni deo kreativnog procesa, ne samo za profesionalce, već i za amatere. Sa sve većim brojem dostupnih alata, korisnici imaju priliku da biraju između komercijalnog i slobodnog softvera. Slobodan softver nudi korisnicima pristup naprednim funkcijama bez finansijskih ulaganja, čime omogućava većem broju korisnika da se bave obradom multimedijalnih sadržaja. Slobodan softver predstavlja važan deo oblasti digitalne obrade.

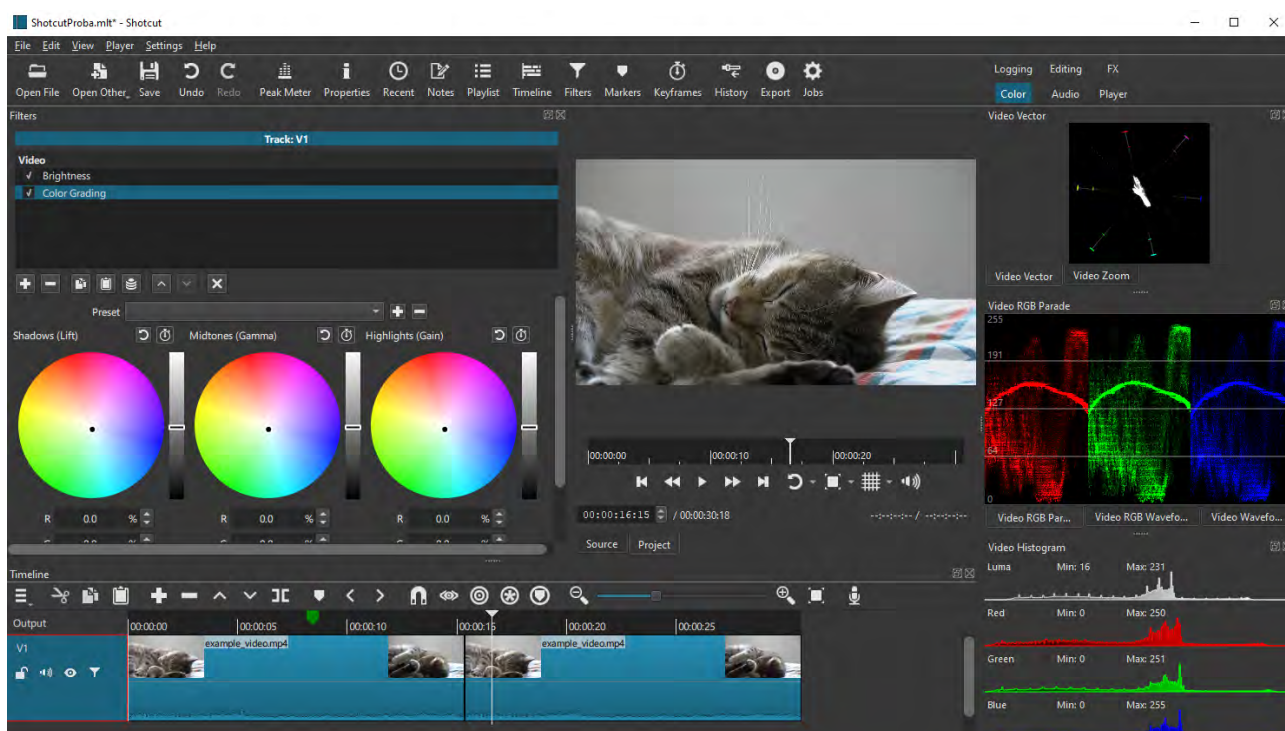
Cilj rada je pružiti pregled odabranih alata slobodnog softvera čija je namena uređivanje video i audio zapisa. Analiziraće se pet alata: Shotcut, OpenShot Video Editor, Kdenlive, Blender i VidCutter. Navedeni alati odabrani su prema svojoj popularnosti, funkcionalnosti i dostupnosti na različitim operativnim sistemima. Kroz detaljan pregled odabranih alata, rad će prikazati glavne karakteristike, prednosti i nedostatke svakog alata, kako bi korisnici mogli da odaberu odgovarajući alat prema svojim potrebama. Rad će pružiti i uporedni pregled svih odabranih alata, analizirajući ključne karakteristike. Na kraju, biće izložene preporuke alata za različite tipove korisnika.

2 Pregled odabranih alata

U ovom poglavlju, predstavljeni su odabrani alati slobodnog softvera za uređivanje video i audio zapisa. Svaki od odabranih alata nudi specifične funkcionalnosti, koje mogu zadovoljiti različite potrebe korisnika. Pregled uključuje analizu ključnih karakteristika alata, prednosti i mane svakog alata, kao i mogućnosti alata u različitim slučajevima upotrebe. Ovaj pregled pomoći će korisnicima da steknu bolji uvid u neke od dostupnih slobodnih softvera za uređivanje video i audio zapisa, čime se olakšava izbor odgovarajućeg alata u skladu sa potrebama korisnika.

2.1 Shotcut

Shotcut [1] pruža intuitivan korisnički interfejs prilagođen početnicima i predstavlja jedan od najpoznatijih slobodnih softvera za uređivanje video i audio zapisa. Dostupan je za Windows, macOS i Linux operativne sisteme i objavljen pod GNU GPL v3 licencom. Alat Shotcut nudi jednostavnu upotrebu za početnike, dok istovremeno pruža niz naprednih opcija koje zadovoljavaju potrebe profesionalaca. Slika 1 prikazuje izgled prozora alata Shotcut.



Slika 1 Izgled prozora alata Shotcut. Video by Jake Hienemann via Pexels: <https://www.pexels.com/video/cute-cat-1481903/>

Shotcut se izdvaja širokim izborom funkcionalnosti, filtera i različitih efekata, uključujući naprednu korekciju boja i dodavanje prelaza između video zapisa. Nudi i osnovne opcije za uređivanje audio zapisa, kao što su podešavanje jačine zvuka, dodavanje efekata i filtriranje šuma. Softver koristi FFmpeg biblioteke [2] kao osnovu za podršku različitih video i audio formata, kao i formata slika, što omogućava korisnicima rad sa mnogim standardnim, ali i nekonvencionalnim formatima. Shotcut podržava i obradu video zapisa u 4K rezoluciji, pružajući visok kvalitet kreiranih projekata. Međutim, alat u sebi ne sadrži ugrađenu biblioteku gotovih efekata, muzike, slika, audio i video zapisa, što korisnici moraju sami da obezbede.

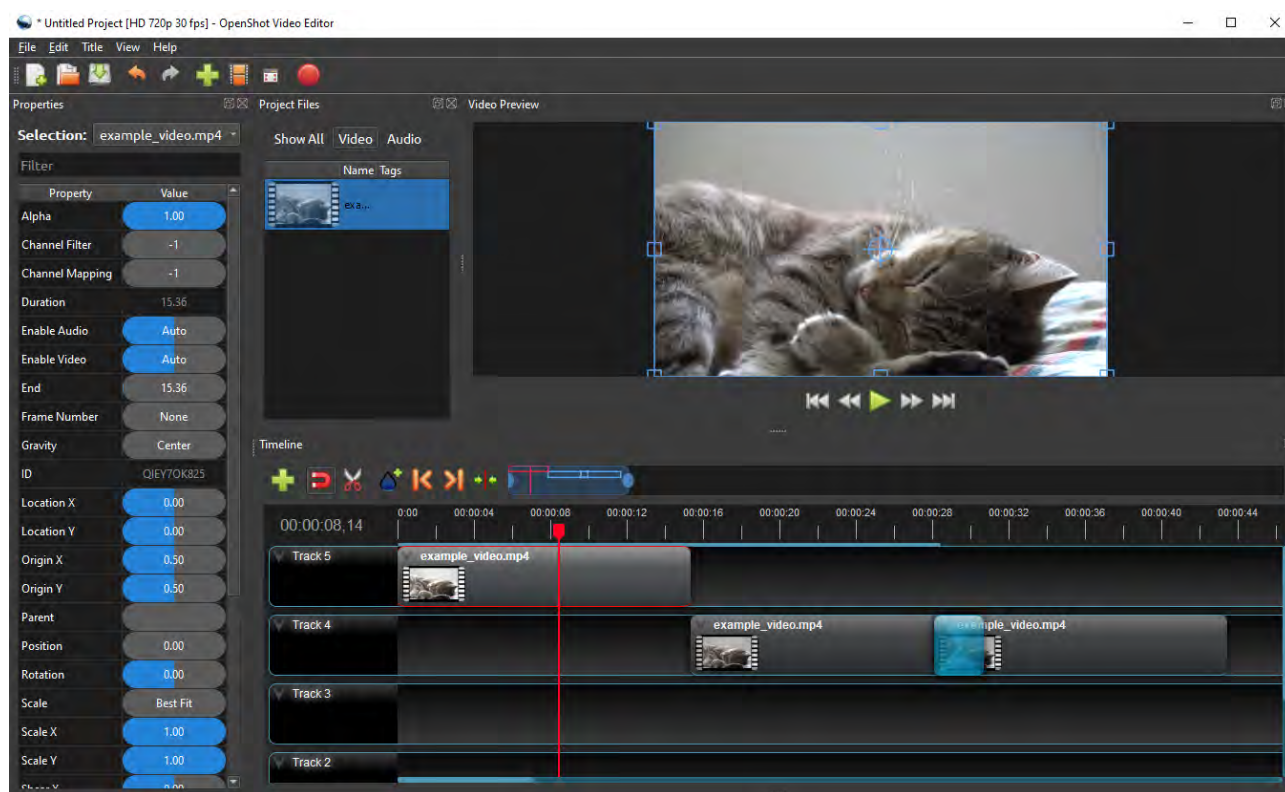
Jedan od ključnih aduta Shotcut alata predstavlja fleksibilnost i svestranost u pogledu opcija za uređivanje. Pored osnovnih opcija, Shotcut omogućava napredne opcije poput višeslojne video i

audio obrade i zamene pozadine unutar video zapisa. Redovna ažuriranja softvera donose nove funkcionalnosti i doprinose povećanju stabilnosti i efikasnosti alata, čineći Shotcut pouzdanim alatom za dugoročnu upotrebu. Ipak, složeniji projekti mogu zahtevati značajne računarske resurse, što može predstavljati izazov za korisnike sa slabijim sistemskim konfiguracijama.

Ključne prednosti Shotcut softvera su jednostavan interfejs i veliki broj funkcionalnosti koje alat pruža. Redovna ažuriranja softvera i rad sa različitim formatima video i audio zapisa dodatno doprinose softveru da bude konkurentan na tržištu alata za uređivanje video i audio zapisa. Ipak, nedostatak ugrađene biblioteke sadržaja i visoki zahtevi za računarske resurse mogu predstaviti izazov pojedinim korisnicima. Shotcut je alat koji nudi širok spektar opcija i može zadovoljiti potrebe različitih korisnika, od početnika do profesionalaca. Osnovne funkcionalnosti alata Shotcut detaljno su prikazane u uputstvu [3] koje je ranije kreirano.

2.2 OpenShot Video Editor

OpenShot Video Editor [4] jedan je od najpopularnijih slobodnih softvera za uređivanje video i audio zapisa. Poznat je po svojoj jednostavnosti, što alat čini pogodnim za početnike u svetu video i audio obrade. Dostupan je za operativne sisteme Windows, macOS i Linux. Softver je objavljen pod GNU GPL v3 licencom. Slika 2 prikazuje izgled prozora alata OpenShot Video Editor.



Slika 2 Izgled prozora alata OpenShot Video Editor

Jedna od ključnih karakteristika alata OpenShot Video Editor jeste intuitivan korisnički interfejs, koji omogućava jednostavno snalaženje i brz početak rada. Softver koristi FFmpeg biblioteke, nudeći širok spektar različitih formata obrade, uključujući i 4K rezoluciju video zapisa. OpenShot Video Editor sadrži relativno veliki broj funkcionalnosti za uređivanje video zapisa, kao što su odsecanje, skaliranje i rotacija, kao i dodavanje naslova i efekata unutar zapisa. Izdvaja se po tome što nudi funkcionalnost zamene pozadine unutar video zapisa, što je korisno za profesionalne projekte. Sadrži i osnovne opcije za obradu audio zapisa, uključujući sečenje zapisa, podešavanje

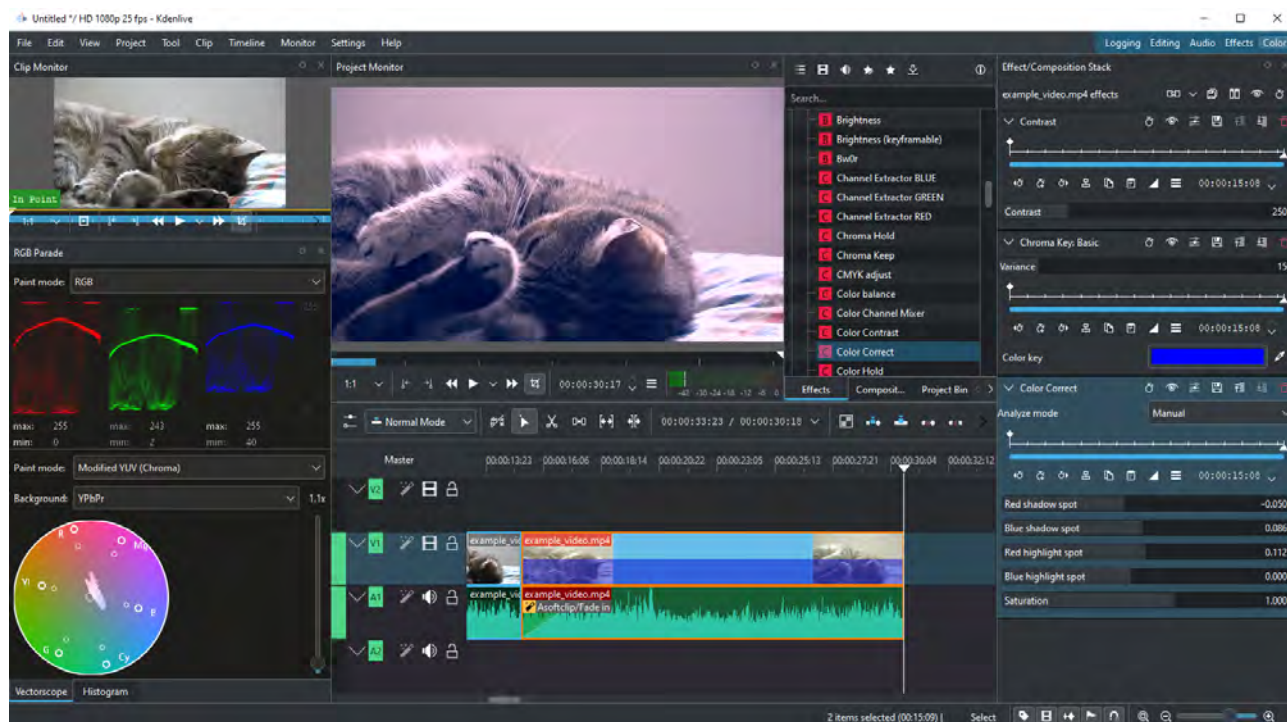
jačine zvuka, dodavanje efekata i sinhronizaciju audio i video zapisa. Pruža mogućnost višeslojne video i audio obrade.

Iako je bogat funkcionalnostima, OpenShot Video Editor ima i određene nedostatke koji mogu uticati na korisničko iskustvo. Softver povremeno može biti nestabilan i pored redovnog održavanja i ažuriranja, što dovodi do prestanka rada softvera, pogotovo u slučaju složenijih projekata. Obrada u 4K rezoluciji može biti spora kod korisnika sa slabijim računarima. Nedostatak naprednih funkcija za kontrolu zvuka i složenijih video efekata može odvratiti iskusnije korisnike od alata, pogotovo korisnike koji traže profesionalne alate.

Ukratko, OpenShot Video Editor korisnicima nudi relativno veliki broj osnovnih funkcionalnosti. Intuitivan interfejs koji pruža i veliki broj podržanih formata omogućavaju brzo i lako uređivanje. Međutim, nedostatak pojedinih naprednih opcija i povremeni problemi sa stabilnošću mogu uticati na korisničko iskustvo. Bez obzira na nedostatke, OpenShot Video Editor predstavlja solidan alat za uređivanje video i audio zapisa kod korisnika sa osnovnim potrebama. Osnovne funkcionalnosti alata OpenShot Video Editor detaljno su prikazane u uputstvu [3] koje je ranije kreirano.

2.3 Kdenlive

Kdenlive [5] je napredan softver za uređivanje video i audio zapisa, namenjen korisnicima koji zahtevaju profesionalne alate za složene projekte. Dostupan je pod GNU GPL v2 licencom. Alat je prvobitno kreiran za korisnike Linux operativnih sistema, ali nudi i podršku za korisnike Windows i macOS operativnih sistema. Međutim, verzija za operativni sistem macOS može biti nestabilna zbog nedovoljno redovnih unapređenja. Na Slici 3 prikazan je izgled prozora alata Kdenlive.



Slika 3 Izgled prozora alata Kdenlive

Alat Kdenlive izdvađa vrlo prilagodljiv interfejs, koji omogućava korisnicima da podese svoje radno okruženje prema potrebama. Kdenlive koristi FFmpeg biblioteke, čime pruža bogat izbor različitih formata. Alat nudi i obradu video zapisa u 4K rezoluciji. Osnovne funkcionalnosti alata uključuju višeslojno uređivanje video zapisa i naprednu korekciju boja. Softver takođe podržava uređivanje

koristeći privremene datoteke (eng. *proxy editing*), čime se dodatno povećavaju performanse alata, bez uticaja na kvalitet završnog proizvoda. Navedena opcija omogućava video obradu visoke rezolucije na računarima sa slabijim performansama. Kdenlive nudi i napredne opcije audio obrade, uključujući višeslojno audio uređivanje, detaljno filtriranje i dodavanje različitih efekata. Korisnici imaju potpunu kontrolu nad audio slojevima, uključujući precizno kombinovanje i automatsku sinhronizaciju sa video zapisima. Navedene funkcionalnosti su posebno značajne za profesionalne korisnike, jer pružaju veliku fleksibilnost u video i audio obradi.

Izuzetno napredne funkcionalnosti koje nudi alat Kdenlive zahtevaju da se odvoji vreme za savladavanje alata, što može predstavljati izazov korisnicima bez iskustva u oblasti video i audio obrade. Potrebno je uložiti trud i za razumevanje načina na koji se interfejs alata prilagođava potrebama korisnika. Dodatni nedostatak alata je odsustvo automatskih ažuriranja, iako se unapređenja sistema redovno izvršavaju.

Kdenlive je moćan alat u svetu uređivanja video i audio zapisa. Namenjen je naprednijim korisnicima i profesionalcima koji traže besplatno rešenje za svoje projekte. Pruža širok spektar funkcionalnosti i veoma prilagodljiv interfejs, što alat čini jednim od najboljih izbora u svetu slobodnog softvera. Međutim, korisnici koji traže jednostavnost ili su novi oblasti video i audio obrade, verovatno će se opredeliti za alternativni alat.

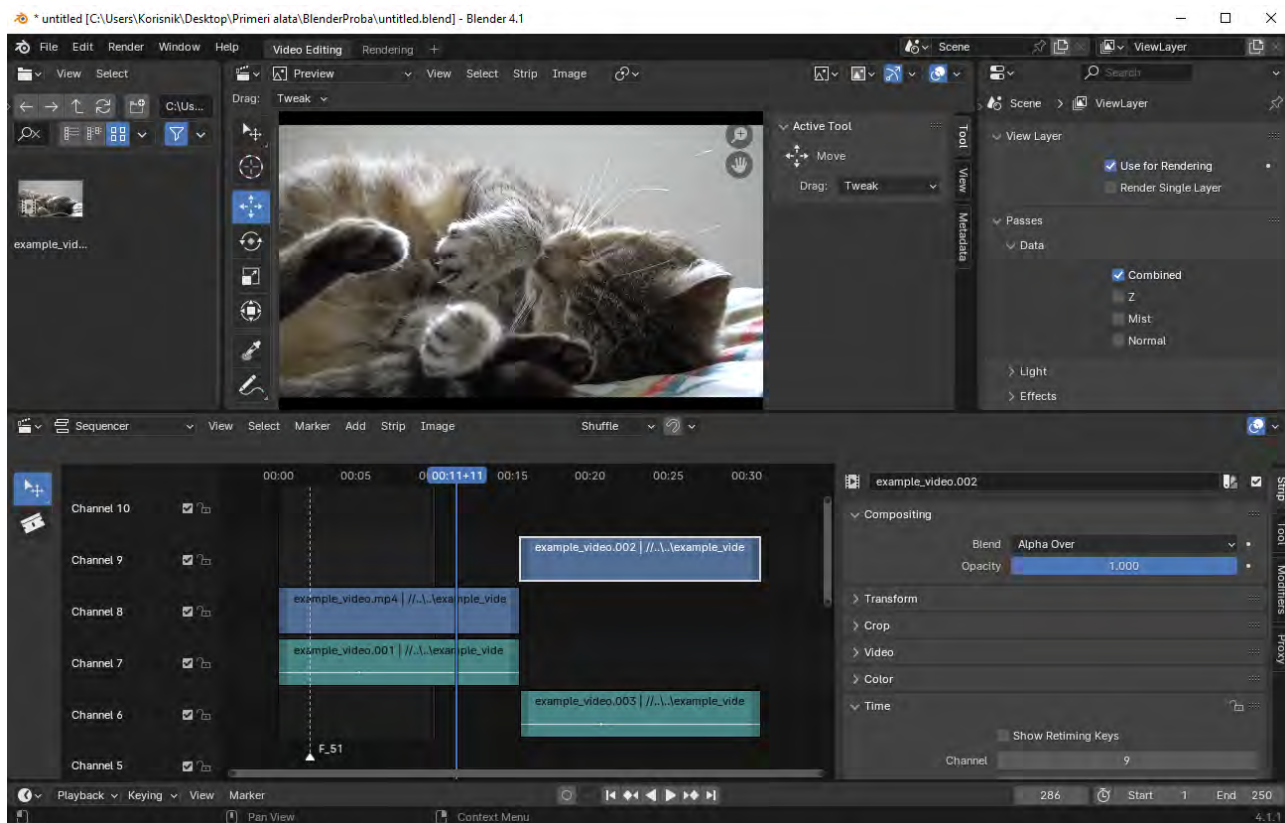
2.4 Blender

Blender [6] je moćan i sveobuhvatan alat za 3D animaciju i uređivanje video i audio zapisa, idealan za profesionalne korisnike koji žele da kombinuju dve navedene oblasti. Softver je dostupan na Windows, macOS i Linux operativnim sistemima i objavljen je pod GNU GPL v2 licencom. Sadrži bogat skup funkcionalnosti i pogodan je za izradu visokokvalitetnih projekata. Blender korisnicima pruža fleksibilnost u modelovanju, animaciji i video montaži, što alat čini sveobuhvatnim rešenjem za multimedijalne projekte. Slika 4 prikazuje izgled prozora alata Blender.

Blender donosi veoma veliki broj različitih funkcionalnosti, od osnovnih do naprednih. Ipak, cena za širok spektar funkcionalnosti je izuzetna složenost alata i kompleksnost korisničkog interfejsa. Potrebno je da korisnici izdvoje vreme za savladavanje alata, što može predstavljati veliku prepreku početnicima u oblasti video i audio obrade. Blender koristi kao osnovu FFmpeg biblioteke, čime pruža širok spektar različitih video i audio formata za obradu, uključujući i obradu video zapisa u 4K rezoluciji. Ogroman broj mogućnosti koje su na raspolaganju korisnicima zahtevaju velike računarske resurse, što može biti prepreka za korisnike sa slabijim sistemima. Međutim, Blender nudi opciju uređivanja koristeći privremene datoteke, čime omogućava jednostavniju obradu na slabijim računarima.

Alat korisnicima omogućava višeslojno uređivanje sa podrškom za 32 trake za audio i video zapise, kao i relativno veliki broj opcija za video i audio obradu. Iako je korisnički interfejs kompleksan, Blender pruža mogućnost prilagođavanja interfejsa prema potrebama korisnika. Moguće je menjati modove rada, prilagoditi izgled i raspored alatki u prozoru, kao i prečica na tastaturi. Novija ažuriranja alata dodatno su poboljšala prilagođavanje interfejsa korisnicima, čime Blender postaje konkurentan najboljim komercijalnim alatima za video i audio obradu.

Ukratko, Blender je izuzetno moćan alat za sve korisnike spremne da ulože vreme i trud kako bi savladali sve mogućnosti koje alat pruža. Nudi veoma širok raspon najrazličitijih funkcionalnosti koje zadovoljavaju potrebe profesionalaca u različitim oblastima, od 3D modelovanja do video i audio montaže. Iako nije idealan za početnike, predstavlja jedan od najboljih slobodnih softvera za obradu video sadržaja dostupnih na tržištu.



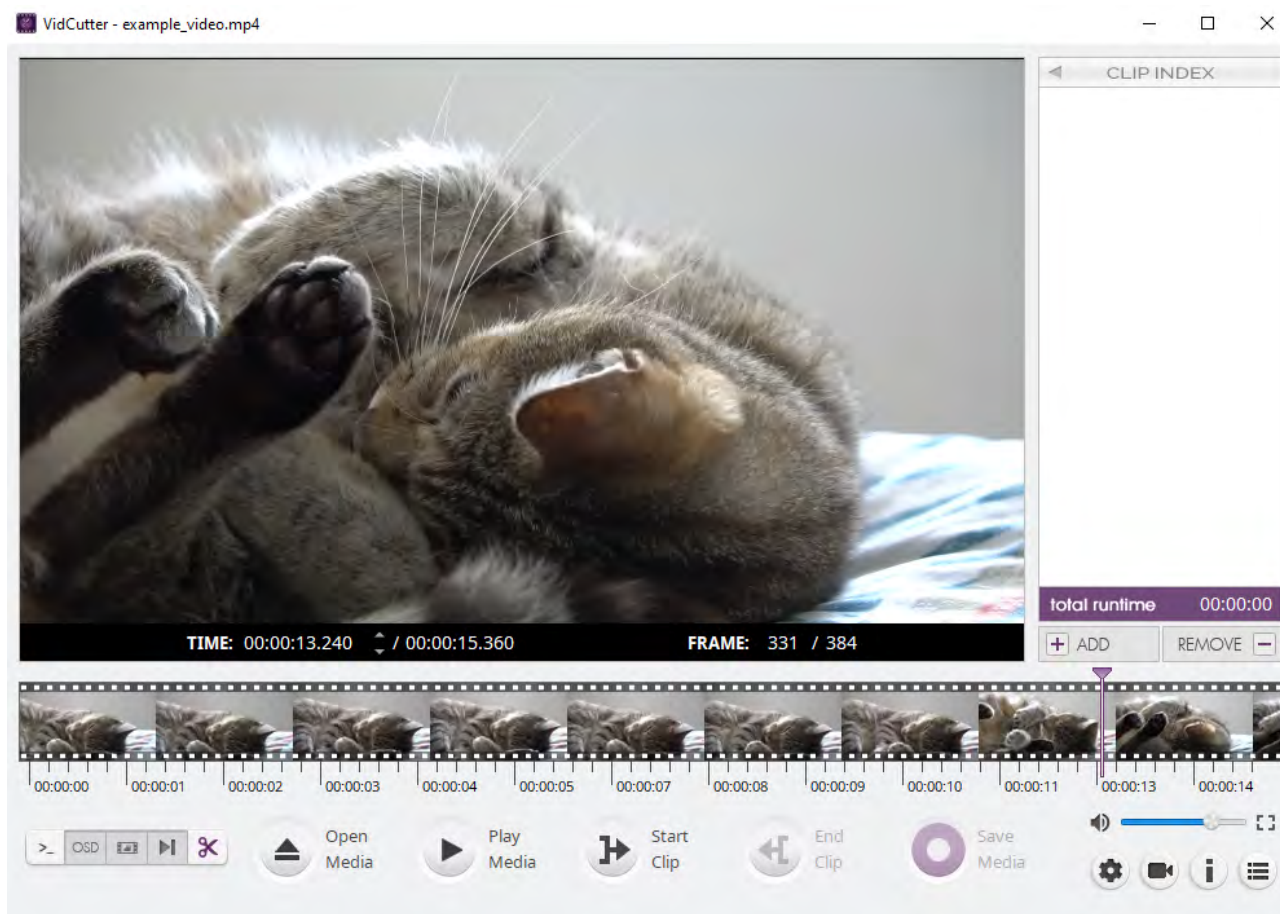
Slika 4 Izgled prozora alata Blender

2.5 VidCutter

VidCutter [7] je jednostavan, ali efikasan alat za osnovno uređivanje video zapisa. Idealan je za početnike u uređivanju video zapisa, kao i korisnike kojima su neophodne samo osnovne funkcionalnosti. Softver je dostupan za Windows, Linux i macOS operative sisteme. Objavljen je pod GNU GPL v3 licencom. Alat omogućava korisnicima da lako uklone neželjene delove iz video zapisa ili spoje više zapisa u jedan, bez potrebe za prethodnim iskustvom u uređivanju video zapisa. Na Slici 5 prikazan je izgled prozora alata VidCutter.

Iako VidCutter ne nudi napredne opcije poput specijalnih efekata ili prelaza, pruža mogućnost korišćenja širokog spektra video formata zahvaljujući FFmpeg bibliotekama. Ne sadrži opcije za uređivanje audio zapisa, ali dozvoljava uklanjanje audio komponente iz video zapisa. Interfejs je prilagođen apsolutnim početnicima u oblasti video obrade, intuitivan je i lak za snalaženje. Ipak, ograničenja VidCutter alata očigledna su kada se poredi sa profesionalnim softverima za uređivanje video i audio zapisa. Nedostatak naprednih funkcija velika je prepreka korisnicima koji traže sveobuhvatno rešenje za uređivanje video sadržaja.

VidCutter predstavlja solidan izbor za korisnike kojima je potrebna osnovna obrada video zapisa, kao što su sečenje i spajanje video zapisa. Nedostatak naprednih funkcionalnosti i opcija za uređivanje audio zapisa ograničava mogućnosti koje alat pruža. Ipak, jednostavnost softvera i veliki broj formata video zapisa koje nudi čine ovaj alat savršenim izborom za početnike u oblasti uređivanja video zapisa.



Slika 5 Izgled prozora alata VidCutter

2.6 Usporedni pregled

Ovo potpoglavlje sadrži usporedni pregled odabranih alata slobodnog softvera za uređivanje video i audio zapisa. Svaki od odabranih alata nudi specifične funkcionalnosti koje mogu zadovoljiti različite potrebe korisnika. Svi odabrani alati dostupni su na tri osnovna operativna sistema, Windows, Linux i macOS. Izuzetak je alat Kdenlive, kod koga su unapređenja za operativni sistem macOS neredovna. Odabrani alati koriste biblioteke FFmpeg, čime pružaju raznovrsne formate za video i audio obradu. Tabela 1 sadrži usporedni pregled osnovnih osobina odabranih alata slobodnog softvera za uređivanje video i audio zapisa.

3 Zaključak

Na osnovu prethodnog pregleda pet odabranih alata slobodnog softvera za uređivanje video i audio zapisa, može se zaključiti da svaki od alata ima svoje specifične karakteristike, prednosti i mane, što analizirane alate čini pogodnim za različite tipove korisnika. Izbor alata zavisi od specifičnih potreba korisnika. Za početnike ili korisnike sa osnovnim potrebama, OpenShot Video Editor i VidCutter su dobri izbori. Za naprednije korisnike koji traže ozbiljnije alate i veću fleksibilnost, Kdenlive i Blender su odlični izbori, dok Shotcut nudi balans između jednostavnosti i naprednih

opcija. Pri odabiru alata, potrebno je uzeti u obzir nivo iskustva korisnika, zahteve projekta i raspoložive računarske resurse.

Tabela 1 Uporedni pregled odabranih alata slobodnog softvera za uređivanje video i audio zapisa

Naziv alata	Interfejs prilagođen početnicima	Jednostavno savladavanje alata	Višeslojno uređivanje	Napredna video obrada	Mogućnost audio obrade
Shotcut	da	da	da	da	da
OpenShot Video Editor	da	da	da	da	da
Kdenlive	ne	ne	da	da	da
Blender	ne	ne	da	da	da
VidCutter	da	da	ne	ne	ne

Zahvalnica

Želim da izrazim svoju duboku zahvalnost Uredničkom odboru PSSOH konferencije na ukazanoj prilici da učestvujem na PSSOH 2024 konferenciji i predstavim rezultate svog istraživanja.

Literatura

- [1] Shotcut, <https://www.shotcut.org/>, pristupljeno 22. avgusta 2024. godine
- [2] FFmpeg, <https://www.ffmpeg.org/>, pristupljeno 22. avgusta 2024. godine
- [3] Škorić N. Uputstvo za korišćenje softvera za uređivanje video i audio zapisa Shotcut i OpenShot Video Editor. Zenodo; 2024. DOI: 10.5281/zenodo.11075252
- [4] OpenShot Video Editor, <https://www.openshot.org/>, pristupljeno 22. avgusta 2024. godine
- [5] Kdenlive, <https://kdenlive.org/>, pristupljeno 22. avgusta 2024. godine
- [6] Blender, <https://www.blender.org/>, pristupljeno 22. avgusta 2024. godine
- [7] VidCutter, <https://github.com/ozmartian/vidcutter>, pristupljeno 22. avgusta 2024. godine

Spisak autora(ki) i predavača / List of Authors and Speakers

B

Brković Bogdan, 7

Ć

Ćirić Aleksandar, 25

I

Ivanović Mateja, 7

K

Knežević Aleksandar, 30

L

Lazarević B. Ljiljana, 6

M

Majstorović Milovan, 7

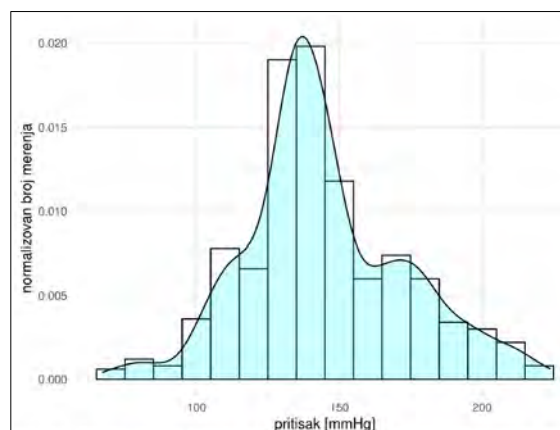
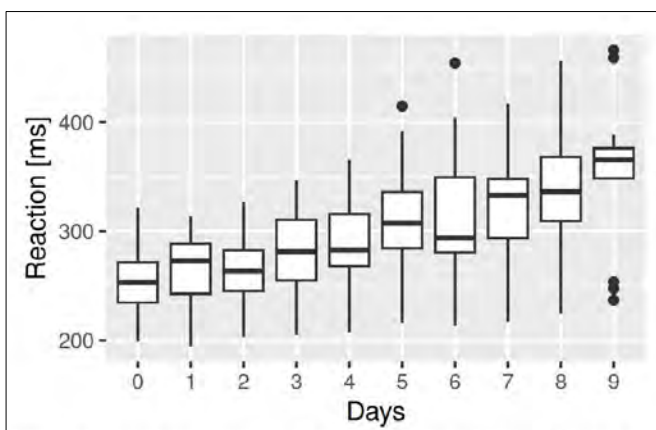
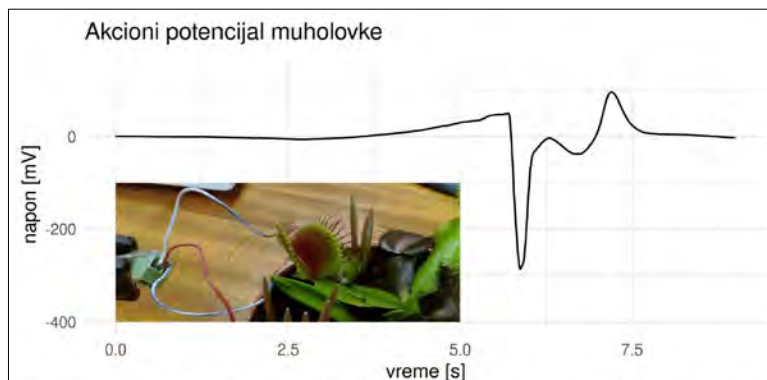
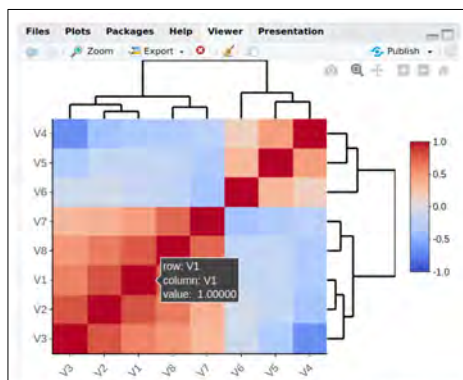
Š

Škorić Nikolina, 47

T

Terzić Mladen, 7

OTVORENI NASTAVNI MATERIJALI / OPEN EDUCATIONAL RESOURCES



"Udžbenik je namenjen studentkinjama i studentima koji slušaju predmet Tehnike obrade biomedicinskih signala na master – akademskim studijama Elektrotehničkog fakulteta, Univerziteta u Beogradu (ETF). Takođe, delovi udžbenika sadrže i elemente koji mogu biti od koristi ... svima koje zanima obrada signala, nauka o podacima i biomedicinsko inženjerstvo."

iz Predgovora

Nadica Miljković, Analiza biosignala sa praktičnim primerima u programskom jeziku R, udžbenik Univerziteta u Beogradu – Elektrotehničkog fakulteta, 2024, ISBN: 978-86-7225-098-5, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.12731353>.¹

¹ Udžbenik je podeljen pod otvorenom CC BY licencom, a ilustracija je sastavljena kao mini kolaž slika iz udžbenika.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

004(082)

**НАЦИОНАЛНА конференције са међународним учешћем
Примена слободног софтвера и отвореног хардвера (7 ;
2024 ; Београд)**

Zbornik sedme nacionalne konferencije sa međunarodnim
učešćem pod nazivom Primena slobodnog softvera i otvorenog
hardvera PSSOH 2024, [Beograd] / [urednički odbor, editorial
board Nadica Miljković, Miloš Cvetanović, Miloš Bjelić]. - Beograd :
Univerzitet, Elektrotehnički fakultet : Akademska Misao =
Belgrade : University, School of Electrical Engineering : Academic
Mind, 2025 (Beograd : Akademska Misao = Belgrade : Academic
Mind). - 56 str. : ilustr. ; 30 cm

Na spor. nasl. str.: Proceedings of the Seventh National Conference
with International Participation titled Application of Free
Software and Open Hardware PSSOH 2024.

- Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 35. - Bibliografija uz svaki
rad. - Registar.

ISBN 978-86-6200-066-8 (AM)

a) Рачунарство – Зборници

COBISS.SR-ID 176828169

KONFERENCIJU PODRŽALI



Varius



9 788662 000668