

An Intercomparison of the Broadband Electrical Field Meter NARDA NBM 550

Nenad Munić, Aleksandar M. Kovačević, Nenko Brkljač, Ljubiša Tomić

Abstract— This paper presents the intercomparison of five broadband electric field meters from the three laboratories. The intercomparison was performed in broadband frequency range at different level of the electric field meter. The measurement results were compared using the z-score criteria. The intercomparison was performed with the aim of confirming the accuracy of broadband electric field meters, until the realization of calibration in an accredited metrology laboratory.

Index Terms — Intercomparison, Broadband Electric Field Meter, z-score, Calibration.

I. INTRODUCTION

DIFFERENT measuring equipment can be used during the tests. Their accuracy can significantly affect the reliability of the measurements. Therefore, the measuring equipment must be calibrated before use [1]. In doing so, each laboratory must establish a program and procedure for calibrating its measuring equipment. Due to all the above, the Technical Testing Center (TTC) [2], a specialized military scientific research institution, in accordance with the requirements of the quality management system [3], developed a Procedure [4] for periodic calibration of measuring equipment.

One of the ways to determine and review the deadline for periodic calibration of measuring equipment are intermediate checks [1, 4]. In that case, the method of checking certain metrological characteristics of measuring equipment between two calibrations is used, in one of the following ways: a) using a references instrument; b) using a specially designed test device; c) participation in interlaboratory comparisons; e) participation in intercomparison.

Participation in intercomparison is one of the requirements for laboratories that are entering the accreditation process or have already been accredited [5]. Positive results of intercomparison are confirmation of the accuracy of measurements performed in the laboratory and the competence of that laboratory.

Intercomparison of meters is performed at the request of the user of the meter. In doing so, the intercomparison is performed by the laboratory user of the meter, and if

Nenad Munić, , Nenko Brkljač, Ljubiša Tomić– Tehnički opitni centar, Generalštab Vojske Srbije, Vojvode Stepe 445, 11000 Beograd, Srbija (email: nenadmunic@yahoo.com).

Aleksandar M. Kovačević– Fakultet tehničkih nauka Čačak, Univerzitet u Kragujevcu (email: aleksandarkovacevic1962@yahoo.com).

necessary, other laboratories and the competent metrological laboratory can also participate [4]. Measurement intercomparison means the comparison of metrological characteristics of meters of the same type and approximately the same measurement uncertainty under established conditions.

Due to the complicated procedure of calibration in foreign accredited metrological laboratories, and for the needs of measuring in the field of electromagnetic compatibility (EMC), the Department of Electromagnetic Compatibility and Environmental Impacts in TTC initiated and organized intercomparison of broadband EM field meter NBM-550 with other broadband electric field S.A 43, manufactured by CHAUVIN ARNOUX [6].

In the meantime, the number of intercomparison participants increased, at the request of laboratories dealing with risk assessments at workplaces and in the work environment, (non-ionizing radiation), the Institute of Occupational Medicine of the Military Medical Academy (MMA) [7] and the Military Hospital in Nis [8]. A total of five meters from three laboratories were used in this intercomparison.

Intercomparison was performed for two cases: in the first case when setting defining value of electric field from the frequency range of meter and in the second case by measuring several different values of electric field at a certain frequency. Measurement results were compared using the z-score criterion.

The goal of the intercomparison is to extend the use of the broadband EM field meter NBM-550, manufactured by NARDA, until the realization of calibration in an accredited metrological laboratory. Namely, the aim of processing the results of intercomparison of these measures is to analyze the results according to the criteria for measures of the same type and approximately the same measurement uncertainty, under established conditions, then to determine the acceptability of results, and thus confirm their applicability to measure electric field strength.

II. INTERCOMPARISON CONDITIONS

The intercomparison was performed in the Faraday cage of the Technical Experimental Center, as shown in Fig. 1.

The subject of intercomparison are broadband EM field meters, as follows:

- Narda NBM-550, s/n: B-0503, with antenna (sensor) EF0391, s/n: A-0610 (Sen 1);
- Narda NBM-550, s/n: B-0594 with antennas (sensors):

- EF0391, s/n: A-0700 (Sen 2);
- EF6091, s/n: 01084 (Sen 3);
- Narda NBM-550, s/n: H-0386 with antennas (sensors):
- EF0691, s/n: H-0550 (Sen 4);
- EF5091, s/n: 01606 (Sen 5);



Fig. 1. Electric field strength measurement with electric field meter, transmitting Ultra log antenna.



Fig. 2. NBM-550, „NARDA“ [6].

Intercomparison was performed by comparing the measured values of the electric field of different antennas (sensors) of EM field meters for the case when changing:

- transmission signal frequency (constant transmission power level),
- transmission signal strength (fixed transmission frequency).

EM field meters NBM-550, with its corresponding antenna (EF0391, EF6091 or EF5091), are mounted on a non-conductive styrofoam bracket mounted on a conductive table in a Faraday cage at a distance of 1.45 m from the transmitting antennas: Ultra log antennas (Fig. 1) or double-crest antennas (Fig. 3). The height of the transmitting antennas of 1.385 m corresponds to the height at which the antenna of the EM field meter is located.



Fig. 3. Electric field strength measurement with electric field meter, double-ridge transmitting antenna.

The NBM-550 meter is controlled by an application installed on a PC, NBM-TS PS Transfer software V 2.1.1. EM field meters are connected via a suitable optical cable and converter to a PC to monitor the value of the electric field.

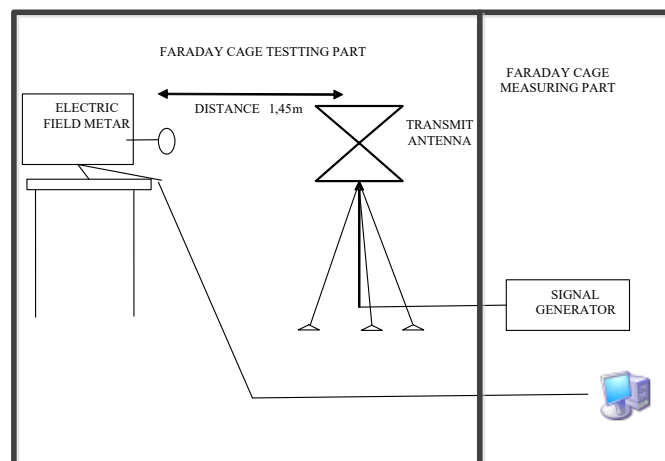


Fig. 4. Block diagram of measuring the strength of electric field, for different frequencies and fixed power level of signal generator.

The measurement is first performed when the excitation frequency is variable, by setting the transmit power level to the maximum value allowed by the signal generator. The block diagram of measuring the value of the electric field strength with the NBM-550 "NARDA" meter, in case when

the frequency of the excitation signal was being changing is shown in Fig. 4.

For fixed frequency measuring, a signal amplifier was used while the excitation power level changed. The operating frequency is determined in the previous measurement by selecting the frequency from the middle of the measuring range at which the highest values of the electric field were achieved. In this case, the frequency of 600 MHz is selected. The block diagram of this measurement is shown in Fig. 5.

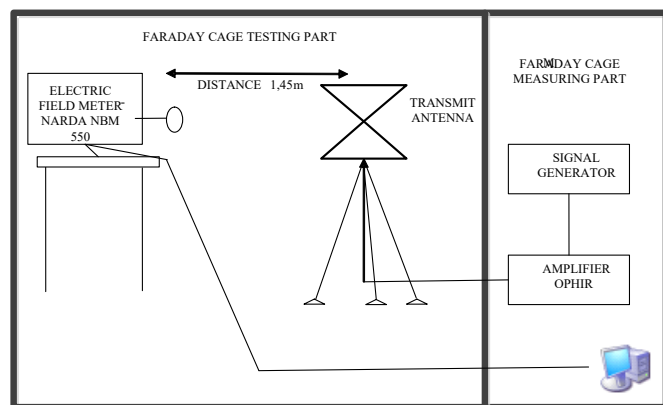


Fig. 5. Block diagram of measuring the strength of electric field, for different values of power levels and at a fixed frequency of signal generator.

The following measuring instruments and equipment were used for testing purposes:

- Broadband EM field meters NBM-550, "NARDA", listed in Chapter II,
- Signal generator SMB100, R&S, s/n. 1406.6000K03-178572-eW,
- RF amplifier 5126, „OPHIR“, from 20 MHz to 1000 MHz, s/n. 1020,
- ULTRALOG antenna HL562, R&S, ser. num. 1000324
- double-ridge antenna 960001, AILTECH, ser. br. 2097,
- Optical cable, 115200 Bd, length of 20 m,
- Cables RG-214/U (N-N), length of 10 m and 1,5 m,
- Wooden stand (tripod).
- Laptop with NBM-TS PS Transfer software V 2.1.1

At the same time, the characteristics of the measuring equipment meet the prescribed standards [9, 10].

Environmental conditions:

- temperature: 24 °C ± 2 °C,
- relative humidity: 50 % ± 15 %.

III. INTERCOMPARISON CRITERIA

As a criterion for evaluating the results of intercomparison, taking into account all the specifics of the measurement, the z-score was adopted, in accordance with the standard ISO 13528: 2005 [9, 10]. As five test samples participated in the comparison, the mean value of the test results for all samples was taken as the assigned (reference) value X_{ref} . The z-score should indicate whether the measured value deviates significantly from the assigned value, in our case from the

mean value of the test results, taking into account the standard deviation σ .

The z-score is calculated as follows [10]:

$$z_i = \frac{x_{lab_i} - X_{ref}}{\sigma}, i = 1, 2, \dots, 5. \quad (1)$$

where:

x_{lab_i} test results for each sample ($i = 1, 2, \dots, 5$);

X_{ref} the assigned (reference) value is the mean value of the test results of all samples,

$$x_{ref} = \frac{\sum_{i=1}^n x_{lab_i}}{n}, n = 5; \quad (2)$$

σ standard deviation for non-repeat testing,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{lab_i} - x_{ref})^2}{n}}, n = 5. \quad (3)$$

The z-score coefficient can be positive or negative and determines the number of standard deviations of the data set from the arithmetic mean. A negative result indicates a value less than the mean, and a positive result indicates a value greater than the mean, with the average of each z-score weighing to zero.

The value of z-score is interpreted as follows:

- A result that gives $|z| \leq 2,0$ is considered to be acceptable;
- A result that gives $2,0 < |z| < 3,0$ is considered to give a warning signal;
- A result that gives $|z| \geq 3,0$ is considered to be unacceptable (or action signal) and the participants should be advised to check their measurement procedures following warning signals in case they indicate an emerging or recurrent problem [10].

IV. RESULTS OF INTERCOMPARISON

The results of intercomparison at a given maximum signal level of the signal generator and different frequency values are shown in Table I. Based on the results obtained from Table I and the calculation of mean and standard deviation, and using formula (1) obtained values of z-score coefficient, shown in Table II.

TABLE I
RESULTS OF MEASUREMENT THE STRENGTH OF ELECTRIC FIELD, FOR DIFFERENT FREQUENCIES AND FIXED POWER LEVEL OF SIGNAL GENERATOR

f (MHz)	E_{sen1} (V/m)	E_{sen2} (V/m)	E_{sen3} (V/m)	E_{sen4} (V/m)	E_{sen5} (V/m)
100	5,59	5,63	4,409	5,954	/
200	6,176	6,194	4,696	6,272	/
300	17,89	17,68	15,26	18,36	15,52
400	16,93	17,14	14,93	15,77	16,15

f (MHz)	E_{sen1} (V/m)	E_{sen2} (V/m)	E_{sen3} (V/m)	E_{sen4} (V/m)	E_{sen5} (V/m)
500	10,45	11,02	8,529	9,725	7,103
600	22,14	21,7	21,27	21,9	21
700	11,92	13	11,2	12,56	9,8
800	7,73	7,654	5,118	7,465	5,18
900	18,48	19,01	19,46	21,5	16,14
1000	20,54	20,81	18,83	21,71	19,11
1200	12,89	13,05	12,84	14,84	10,52
1400	10,5	9,947	6,758	9,835	5,836
1600	10,85	10,55	8,499	10,34	5,912
1800	8,366	9,512	8,485	8,831	8,154
2000	11,61	12,05	12,78	12,11	12,23
2200	11,58	10,89	4,124	10,18	4,918
2400	9,145	8,299	12,26	10,23	13,45
2600	5,356	3,989	2,642	4,322	2,234
2800	11,76	9,156	7,031	10,57	5,24
3000	7,669	6,529	7,422	7,858	5,421
3500	/	/	6,643	10,07	4,511
4000	/	/	5,906	13,16	4,112
4500	/	/	10,41	6,313	8,919
5000	/	/	5,396	6,085	4,136
5500	/	/	6,942	6,548	5,377
6000	/	/	4,875	5,005	3,158
7000	/	/	2,041	/	1,287
8000	/	/	3,957	/	2,921
9000	/	/	2,436	/	3,427
10000	/	/	1,58	/	2,756
11000	/	/	0,6134	/	1,72
12000	/	/	0,8626	/	2,786
13000	/	/	0,258	/	2,819

TABLE II
RESULTS OF Z-SCORE, FOR DIFFERENT FREQUENCIES AND FIXED POWER LEVEL OF SIGNAL GENERATOR

f (MHz)	z_{sen1}	z_{sen2}	z_{sen3}	z_{sen4}	z_{sen5}
100	0,330	0,399	-1,681	0,951	/
200	0,518	0,546	-1,729	0,664	/
300	0,735	0,572	-1,305	1,100	-1,103
400	0,930	1,192	-1,563	-0,516	-0,042
500	0,772	1,178	-0,595	0,256	-1,610
600	1,296	0,236	-0,800	0,718	-1,451
700	0,198	1,158	-0,440	0,767	-1,684
800	0,908	0,845	-1,247	0,689	-1,195
900	-0,253	0,053	0,3143	1,496	-1,610
1000	0,314	0,564	-1,268	1,398	-1,009
1200	0,045	0,161	0,008	1,465	-1,680
1400	1,015	0,723	-0,958	0,664	-1,444
1600	0,874	0,712	-0,394	0,599	-1,792
1800	-0,639	1,773	-0,388	0,339	-1,085
2000	-1,452	-0,282	1,660	-0,122	0,196
2200	1,026	0,807	-1,334	0,583	-1,083
2400	-0,798	-1,239	0,825	-0,232	1,445

f (MHz)	z_{sen1}	z_{sen2}	z_{sen3}	z_{sen4}	z_{sen5}
2600	1,446	0,246	-0,936	0,538	-1,295
2800	1,275	0,171	-0,729	0,771	-1,488
3000	0,763	-0,499	0,489	0,972	-1,726
3500	/	/	-0,188	1,308	-1,119
4000	/	/	-0,465	1,389	-0,923
4500	/	/	1,100	-1,319	0,219
5000	/	/	0,235	1,089	-1,325
5500	/	/	0,982	0,389	-1,372
6000	/	/	0,62	0,78	-1,41

The results of the intercomparison of the measurement of the electric field value with the NARDA NBM-550 meter, for different values of the power level at a fixed frequency of the signal generator, are shown in Table III. Based on the results obtained from Table III and the calculation of the mean and standard deviation, and using formula (1), the values of the z-score coefficient were obtained, which are shown in Table IV.

TABLE III
RESULTS OF MEASUREMENT THE STRENGTH OF ELECTRIC FIELD, FOR DIFFERENT VALUES OF POWER LEVELS AND AT A FIXED FREQUENCY OF SIGNAL GENERATOR

P_{gen} (dBm)	E_{sen1} (V/m)	E_{sen2} (V/m)	E_{sen3} (V/m)	E_{sen4} (V/m)	E_{sen5} (V/m)
-20	5,016	5,212	5,215	5,947	/
-15	8,879	9,202	9,362	10,58	2
-10	15,62	16,29	17,02	18,69	14,66
-5	27,88	28,66	31,99	32,99	30,15
0	50,4	51,33	61,92	58,16	55,56
5	90,37	92,69	114,6	104,1	94,89
10	161,1	161,1	203,5	189,7	167,2
15	255,1	253,3	309,7	310,9	262,1

TABLE IV
RESULTS OF Z-SCORE, FOR DIFFERENT VALUES OF POWER LEVELS AND AT A FIXED FREQUENCY OF SIGNAL GENERATOR

P_{gen} (dBm)	z_{sen1}	z_{sen2}	z_{sen3}	z_{sen4}	z_{sen5}
-20	0,341	0,431	0,433	0,771	/
-15	0,286	0,391	0,444	0,842	-1,964
-10	-0,614	-0,121	0,414	1,641	-1,319
-5	-1,270	-0,866	0,857	1,375	-0,095
0	-1,184	-0,967	1,505	0,627	0,020
5	-1,001	-0,742	1,707	0,533	-0,496
10	-0,901	-0,901	1,576	0,770	-0,544
15	-0,877	-0,945	1,194	1,239	-0,611

Table V gives the budget of measurement uncertainty of electric field strength measurement, measuring instruments NBM-550 "NARDA". For the stated influential quantities (sources of measurement uncertainty), the estimation of measurement uncertainty was performed on the basis of data

from the manufacturer's specification and calibration certificates.

TABLE V
UNCERTAINTY MEASUREMENT BUDGET FOR THE CASE OF MEASURING THE STRENGTH OF THE ELECTRIC FIELD WITH THE METER NBM-550 „NARDA” [6]

Uticajna veličina X_i	Procena X_i (x_i)		Standardna nesigurnost $u(x_i)$	Koefficient osetljivosti c_i	Doprinos standardnoj nesigurnosti $u_i(y)=c_i u(x_i)$
	Vrednost (dB)	Funkcija raspodele			
Merni prijemnik: Tačnost prijema sinusnog signala	±3,0	normalna $k = 2$	1,5	1	1,5
Antena – merni prijemnik	+0,9 -1,0	U-oblika $k = 1,414$	0,67	1	0,67
Korekcije mernog prostora					
Nesavršenost mernog prostora	±4,0	trougona $k = 2,449$	1,63	1	1,63
Varijacije mernog rastojanja	±0,2	pravougaona $k = 1,732$	0,1	1	0,1
Visina antenskog postolja na kome se nalazi merni prijemnik	±0,1	normalna $k = 2$	0,05	1	0,05
Ponovljivost sistema merenja (tip A)	±0.006910	Standardna devijacija	0.006910	1	0.006910
Kombinovana standardna nesigurnost $u_c(y)$		normalna	$u_c(y) = \sqrt{\sum_i u_i^2(y)}$		2,3
Proširena merna nesigurnost U		normalna $k_p = 2$	$U = k_p u_c(y)$		4,63 dB

V. CONCLUSION

Due to the complicated procedure of calibration in foreign metrological laboratories, and due to the need to confirm the accuracy of five EM field meters NBM-550, the Department of Electromagnetic Compatibility and Environmental Impacts in TTC, initiated and organized intercomparison. The intercomparison was also attended by laboratories that deal with risk assessments at workplaces and in the work environment, from the point of view of non-ionizing radiation, the Institute of Occupational Medicine of the Military Medical Academy and the Military Hospital in Nis.

The result of intercomparison according to frequencies and electric fields strength is represented by the numerical value of the z-score model in Tables 3 and Table 5. Based on the presented results, we conclude that the values of z-score, $|z| \leq 2$ and that the results are satisfactory (acceptable), and no corrective measures are needed. This shows that the deviations in the measurements, the values of the electric field between the five meters are acceptable in the entire frequency range of the meters.

The goal of the intercomparison, which was to extend the use of the broadband EM field meter "NARDA" NBM-550, until the realization of calibration in the accredited metrology laboratory is fulfilled. NBM-550 "NARDA" meters can be used to measure the strength of the electric field, until the realization of calibration in an accredited metrological laboratory.

Based on the above and the analysis of the conducted procedure and the results of the comparison of meters, it can be concluded that the conducted intercomparison procedure is currently sufficient to consider the metrological characteristics of NBM-550 "NARDA", but not metrological confirmation in terms of SRPS ISO / IEC 17025: 2006.

REFERENCES

- [1] Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje, SRPS ISO/IEC 17025:2017/Ispr.1:2018.
- [2] <http://www.toc.vs.rs>.
- [3] Sistemi menadžmenta kvalitetom — Zahtevi, SRPS ISO 9001:2015.
- [4] Procedura za preispitivanje rokova periodičnog etaloniranja merne opreme TOC, Interni dokument B.00.081, TOC, 2005.
- [5] Pravila o učešću u programima za ispitivanje osposobljenosti i međulaboratorijskim poređenjima, ATS-PA02, Akreditaciono telo Srbije, Beograd, jul 2021.
- [6] Aleksandar M. Kovačević, Ljubiša Tomić, Nenad Munić, Veljko Nikolić „Interkomparacija širokopojasnog merača električnog polja“, ETRAN 2016.
- [7] <http://www.vma.mod.gov.rs/>
- [8] <http://www.vbnis.mod.gov.rs/>
- [9] Conformity assessment – General requirements for proficiency testing, ISO/IEC 17043:2010,
- [10] Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparisons, ISO 13528:2005.

LiDAR measurements in Maritime transport safety and navigation of the deep seafloor

Dijana Džever, Marjan Urekar, *Member, IEEE*

Abstract— This paper provides an insight into how LiDAR can be applied for the benefit of shipping, sea and ocean traffic, as well as for navigation and detection of the deep seafloor. The current measuring and control methods of this sensor are presented along with the used equipment. The principles of sensor operation are described. The aim of this paper is to emphasize the future applications of LiDAR in ocean transport and its safety, as well as the detection and visualization of the underwater world and its hidden objects.

Index Terms—LiDAR; maritime; safety; seafloor; sensor; airborne; shipping; bathymetry; laser.

I. INTRODUCTION

Nowadays, LiDAR (*Light Detection and Ranging*) is widely used in order to examine various properties of the atmosphere, in autonomous driving and many other aspects such as mapping and topography. LiDAR's possibilities in autonomous driving are highly evolving these days but, if we think about the other types of traffic such as oceanic transport, or transportation and navigation in general, we can see that it is not developed and utilized enough to fulfill the needs for a safer transport. This topic is possibly disregarded because of the limitations in the underwater use, which seem to cause more issues regarding its development, in comparison to LiDAR's use in the atmosphere and earth's surface. In this paper, the discussion on how LiDAR can be used to benefit shipping, navigation, autonomous navigation, present weather measurements and detection, is made and some proposals are given. The scope of this work is to present the multiple usages that LiDAR can offer in shipping together with a total proposed solution for the deep seafloor and underwater world detection. New and unfamiliar usages of LiDAR that could change the future in many ways are given some thought. I would like to emphasize the possibility of LiDAR's role in coastline protection, biological analysis of deep seafloor species, animals, algae's and other water plants and sea sponges. Also, one of the interesting applications are detection of water salinity levels and the analysis of chemical properties of underwater minerals. Later, we will mention a few more applications of LiDAR with their advantages, that could bring humanity more knowledge regarding the underwater world.

Dijana Džever – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: dzeverdijana@gmail.com).

Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

II. WORKING PRINCIPLE OF LIDAR SENSOR

LiDAR represents a digital optical measuring device for the detection and range of light. It is a remote sensing method that uses light in the form of a pulsed laser beam to measure the range, more precisely the variable distance to Earth. This sensor emits laser output pulses that have variable frequencies and intensity, while pulsed rays pass through the project area. Outgoing impulses are reflected from the surface objects and from the ground, and later, they are detected and captured by the sensor itself. The time delay between transmission and detection of each feedback pulse provides the distance from the sensor to the surface object, producing its 3D model [8].

In general, when we speak about the working principle of LiDAR, it is similar to EDM devices [17], where a pulse, continuous wave or laser is fired from a transmitter, and later the reflected energy is captured.

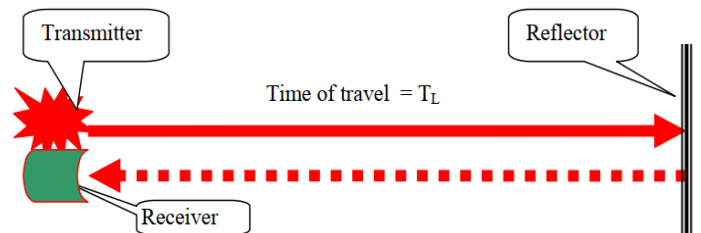


Fig. 1. Range measurement using laser principle [8]

The measuring distance from the transmitter and the reflector is determined by calculating the time of travel (T_L / ToT). In some specific cases, the role of the reflector can be some natural object or an artificial reflector such as a prism. A laser pulse is emitted from an aircraft, to measure the terrain elevation from the time between emission and reception of reflected pulses. Measuring distance provides the coordinates (x, y, z) of the reflector.

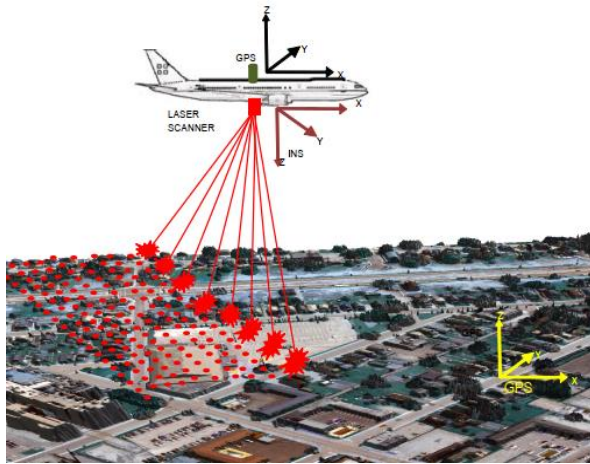


Fig. 2. LiDAR topographic system [8]

Flow diagram below indicates implemented sensors of various kinds in a LiDAR instrument, as well as the computation steps which form the ground and underwater coordinates.

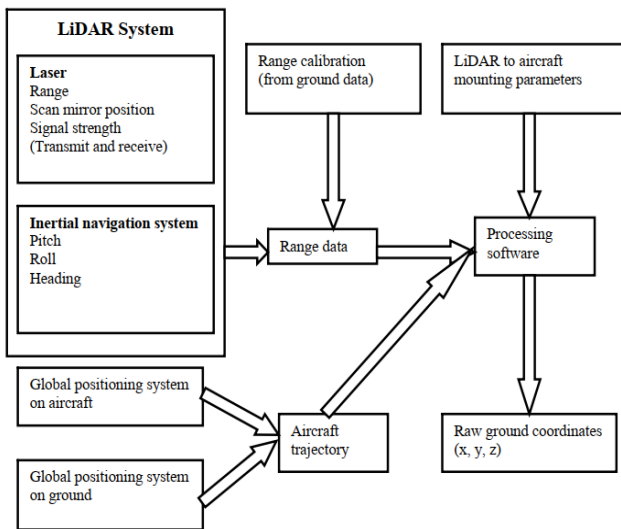


Fig. 3. An illustration of flow diagram used for computation of the ground coordinates [8]

III. AIRBORNE TOPOGRAPHIC LIDAR

Airborne LiDAR System or ALS which stands for Airborne Laser Scanning represent a remote sensing technique used to measure the distance to an object. The basic principle of measuring distance to an object using this type of LiDAR is by determining the time of flight for an emitted laser beam. Basically, a laser pulse is emitted from an aircraft in order to measure the terrain elevation, which is derived from the time between emission and reception of reflected pulses. Then, the x, y, and z coordinates are registered through laser altimetry. Technologies on which LiDAR relies for its operation on are Global Positioning System (GPS) and Inertial Measurement Unit

(IMU). The importance of these technologies plays the crucial part in airborne LiDAR scanning because it provides LiDAR with the location and orientation of the remote sensor which is located on the airborne platform. This technique has a special application in shallow waters.

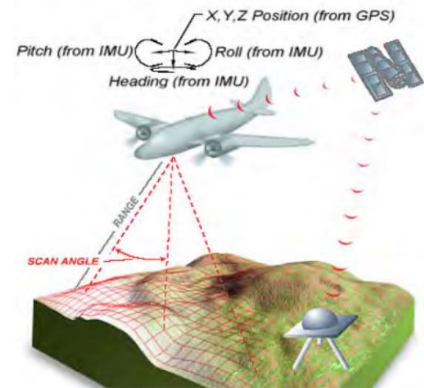


Fig. 4. Airborne LiDAR technology in the process of providing the location of the airborne platform, using a laser beam, GPS and IMU systems [7]

A. Bathymetric LiDAR

When there is a need for scanning water bodies or even some ocean traffic points such as bridges, piers, dams and other infrastructure, topographic LiDAR does not complete this task. In order to accomplish sensing of these areas and objects, bathymetric LiDAR is commonly used. The main difference between these two types of LiDAR sensors is that a bathymetric LiDAR has the ability to shoot green laser pulses, while every other component of the bathymetric LiDAR is the same as the topographic one.

The basic principle implies the action of the pulses penetrating the water surface and then returning back to the sensor which is attached to the airborne vehicle. Estimated depth of the water and water bodies is attained by processing the collected data. As it is mentioned already, a laser pulse is transmitted to the water surface, where a portion of the energy is recaptured back to the optical receiver. The remainder of the pulse continues to penetrate to the water bottom through the water column and later, is reflected back to the receiver. Two main factors that defines the maximum depth penetration for a laser are water clarity and bottom reflection. LiDAR can measure various depths from 0.9 m to 40 m with a vertical accuracy of ± 15 cm and horizontal accuracy of ± 2.5 m, depending on the water clarity. It is important to mention that the elapsed time between the bottom pulses and the received surface allows determination of the water depth.

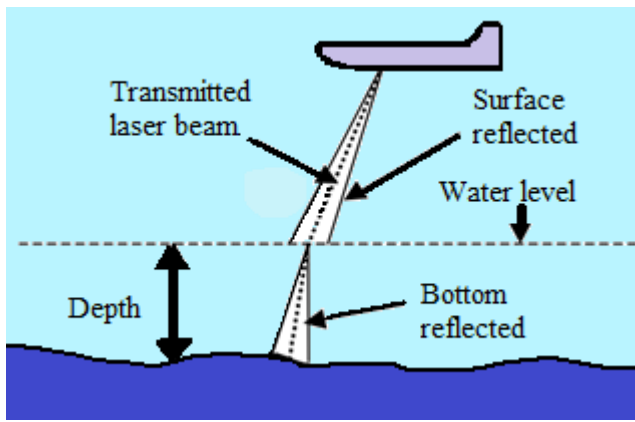


Fig. 5. Basic principle of bathymetric LiDAR [8]

Among all of those parameters mentioned before, water turbidity [18] is the most important one. It is defined as a factor caused by suspended or dissolved particles in water. Those particles scatter light in the water, making it appear cloudy. As far as water penetration is concerned, it is equal to two to three times the Secchi depth [19], which means three times the penetration depth of natural sunlight in a given water column. To be able to compute the water depth, the bottom and surface signals should be clearly distinctive, but in case of shallow depths, these signals overlap. This situation makes determination of the water depth unavailable.

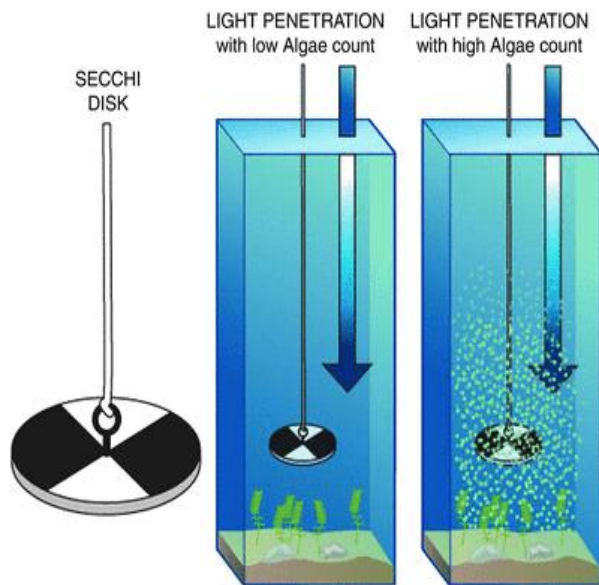


Fig. 7. Display of Secchi disk which is used to measure water clarity [19]

B. Bathymetric LiDAR Sensor Characteristics

When we discuss modern bathymetric LiDAR sensors, it should be noted that it can measure topography in addition to bathymetry, which is a double feature and a great advantage over

a traditional topographic LiDAR sensor. It can measure both shallow and deep water systems.

The limit for shallow water is < 10 m and the lower limit for deep water systems is > 10 m. Characteristics of the shallow water systems are a higher measurement frequency, they have a higher resolution, and they have less laser power per pulse and smaller laser footprint diameter. A smaller receiver FOV (field of view) is also characteristic for them and they can only measure water depths within the visible water column. Opposite to this, the deep-water bathymetric LiDAR systems have a lower measurement frequency, low resolution, and they use more laser power per pulse. Also, a larger receiver field of view and a larger laser footprint is used within deep water LiDAR systems.

Depth penetration capability of the laser varies in between 2.0 to 3.0 times the Secchi depth measurement, as it was mentioned before. It is common for survey operators to utilize both sensors for shallow and deep water systems simultaneously, in order to achieve maximal coverage and detail. It is managed by combining those sensors in twin optical port survey aircraft.

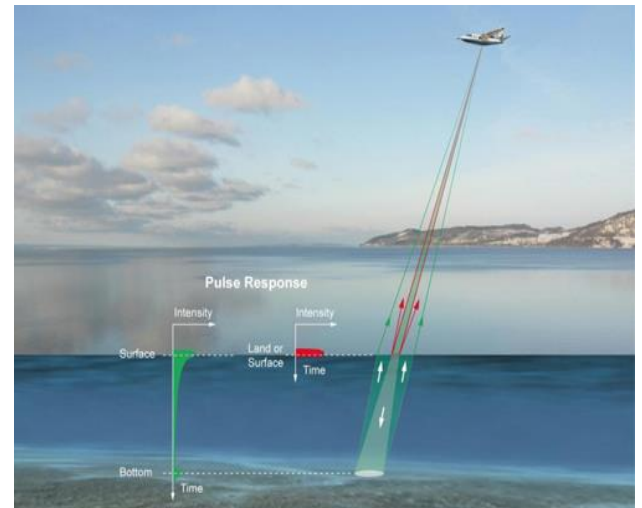


Fig. 6. Illustration of bathymetric LiDAR measurement [17]

We can see that the most important factor when bathymetric LiDAR systems are employed, is its laser energy per pulse, because the laser power represents the strongest influence on depth penetration, when it's combined with the pulse duration. This is important because the combination of high laser power and pulse duration, can provide us with a result even in deeper water column penetration. All of this mentioned influences a full insonification of the seabed, besides the fact that a high resolution laser's energy per pulse and low measurement frequency will result in a lower point density.

C. Advantages and disadvantages of bathymetry

In comparison to methods of topographic data collection such as land surveying, GPS, interferometry, and photogrammetry, LiDAR technology has some great advantages. Over time, LiDAR technology is rapidly improving, as well as its sensors characteristics. Some of them are listed below:

- Higher accuracy and data density
- Fast acquisition and processing
- Minimum human dependence
- Weather/Light independence (not dependent on the sea state)
- Canopy penetration possibilities
- Additional data storage
- High costs
- Fast method (up to 70 km² per hour over large linear areas)
- Reflectivity gives information on seafloor characteristics

Also, like every other sensor or detector used nowadays, these sensors have some disadvantages likewise. With that being said, some disadvantages of the LiDAR sensor are:

- Aircraft usage is weather dependent
- Applicable in clear shallow water only
- Less resolution than multibeam unless resolution survey is very high
- Limited penetration in high turbidity areas such as sandy shores
- Hard to use in shallow water depths (< 0.5 m)

IV. ENVIRONMENTAL CONSIDERATIONS

All of the external environmental effects can impact the water column in bathymetric LiDAR measurements. It makes them more sensitive and can lead to data errors, gaps, bad measurement quality and reduced data coverage. It can produce problems and increase cost. Preparations for a successful bathymetric LiDAR survey and measurements, imply numerous factors that needs to be considered in order to minimize unfavorable impacts. These include tides, turbidity, vegetation condition, sea state, ground control accessibility, traffic controls and last but not least weather conditions for flying the aircraft. Important conditions which impact shallow-water laser penetration from bathymetric LiDAR sensors, need to be properly understood and managed before measurement and processing of data. One major hindrance for this process is water clarity, which can either be satisfactory or insufficient. The lack of water clarity can cause great problems for the bathymetric LiDAR sensor. Furthermore, there are other factors that can disrupt the sensor, such as sea grass, low-reflectance and high turbidity.

Considerations of environmental factors and individual characteristics of the system are very important when selection and employment of LiDAR is in focus. Some important

attributes and points of a best system for a survey are environment, survey area, sensor availability and project requirements. Point density, coverage, maximum depth, final product requirements and intended purpose for the data are some of the most important aspects that determine the choice of sensor. Even when the choice is the right one, the knowledge and experience of the operator is the key to a successful survey.

V. AUTONOMOUS SHIPPING

Since LiDAR is not very widespread and investigated around the world, so it had recently paved a path towards a better understanding and greater investigation as well as exploration. We are surrounded by deep waters and oceans that are considered as mysterious areas in the manner of exploration, even in the 21st century with all of technological opportunities and achievements.

Exploration of deep oceans is a complex process. Maritime transport requires knowledge of terrestrial parameters, climate change and accurate weather forecasts in order to ensure safe trips. In addition, all of these conditions need to be fulfilled to achieve accurate LiDAR measurements. Protecting marine and coastal environment, bridges and various objects, is considered as one of the more important tasks of this sensor. However, it can serve for the purpose of updating nautical charts, cable landing sites which are connected to undersea fiber communication projects and off-shore wind farms.



Fig. 8. EchoBoat-240 seafloor system [13]

EchoBoat-240 Unmanned Surface Vessel dockside will eventually be demonstrated by Seafloor Systems. It excels in mapping shallow bodies of water. EchoBoat-240 has navigation abilities that led it into the real of fully-autonomous vehicles. A portable multibeam survey vessel will be displayed by the Seafloor System as a new platform which combines heightened portability and high-resolution data quality of a multibeam sonar.

Predictions assume that LiDAR will be crucial in mapping and monitoring of coastlines which could bring us many new improvements in safety transport, investigation of the seafloor and even in ecology.

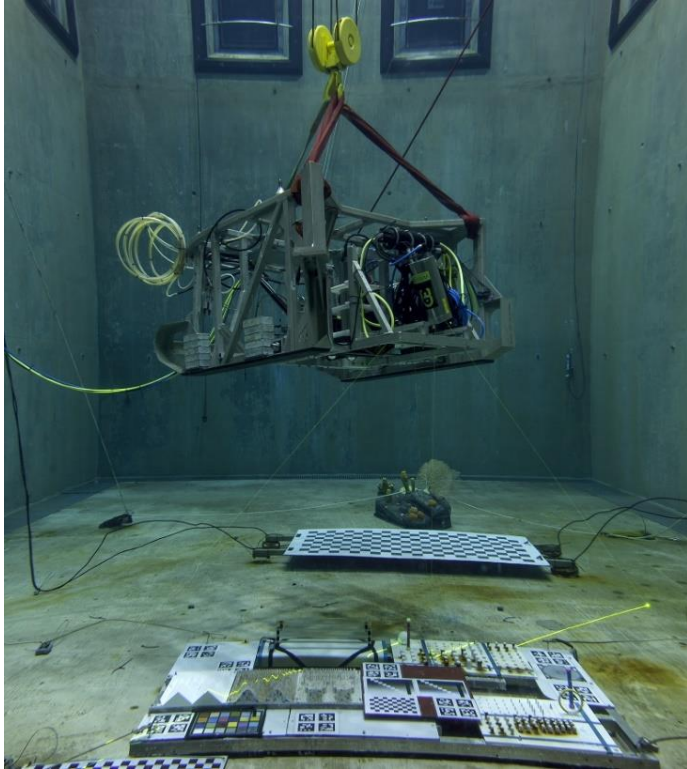


Fig. 9. Wide Swath Subsea LiDAR system in a test tank flown at a low altitude to achieve much higher resolutions than systems imaging from further off the bottom [2]

The Wide Swath Subsea LiDAR sensor, called WiSSL is able of mapping large areas at a 1 cm resolution. Its lasers are capable of pulsing 40,000 times per second in order to produce discrete surroundings. 90 degree wide field of view is made possible due to the WiSSL being equipped with two optical heads. With that being said, it is possible to achieve full bottom coverage at a maximum velocity of 1 m/s. Therefore, it is concluded that WiSSL is the first subsea LiDAR optimized for efficient mapping in the deep ocean [2].

Automated guided vehicles that are capable of providing real-time position data on port infrastructure, people, and objects, have one of the important roles in LiDAR application. The role of LiDAR sensors is to provide and enhance predictability and reliability, being a valuable component to port equipment. It can also improve efficiency and reduce risks and costs in marine transport and seafloor exploration processes.

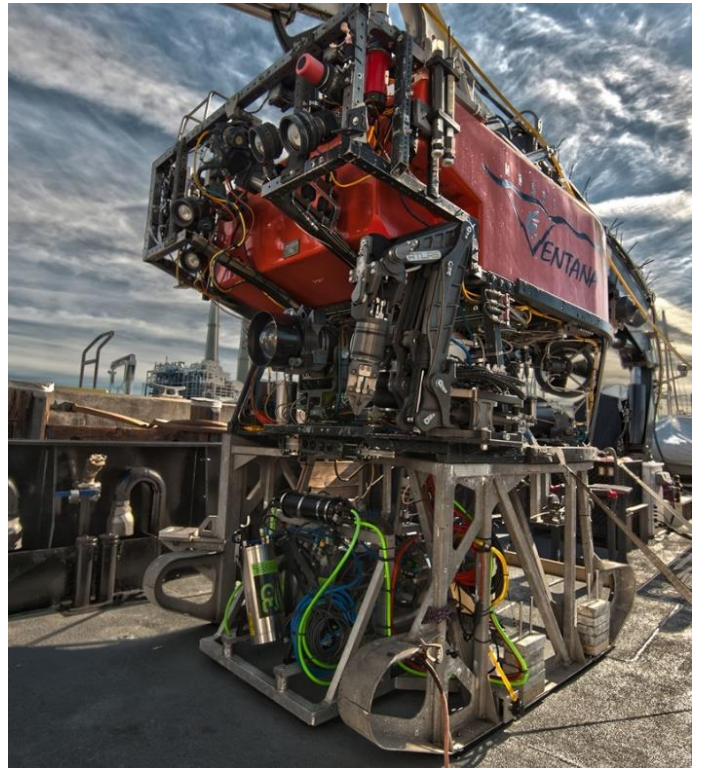


Fig. 10. This photo shows launching the ROV Ventana into the ocean [2]

VI. CURRENT APPLICATIONS IN MARITIME TRANSPORT

One of the newest applications regarding maritime transport and safety is helicopter-mounted laser that scans and detects underwater mine targets. The US Navy is the first user of this system which brings faster detection and a wider FOV to countermine investigating missions.

LiDAR type that enables high-speed shallow water mine detection and efficient results and data processing, is called Airborne Laser Mine Detection System. When echo is returned to the sensor, the data is collected, and next step is choosing the method of destroying the mine. For example, a detected mine can be either destroyed or brought out and transported to another place safely. Cameras underneath an aircraft are receiving reflections of emitted laser beams, from the water and later, processed reflections produce images that are displayed on an airborne console.

This system can work either in day or at night, regardless of light conditions, and without worrying about submerged equipment. This action can provide identification of objects on the bottom of the ocean and pursue attack with a much lower risk of mine-attack and mine explosion.



Fig. 11. An illustration of Stanford's photoacoustic airborne sonar system [3]

VII. CONCLUSION

LiDAR is currently experiencing an expansion. The contribution and value of this technology can change the future in which we will live. Changes in humanity are inevitable if we want to live longer and healthier, as well as save the planet. This sensor can help us succeed in that with its techniques that could provide us with data on inaccessible parts of the planet. Opportunities for research and protection of nature and humankind, transportation development among other things are growing as LiDAR becomes more effective, widespread and autonomous.

In this paper, the emphasis was put on safer maritime traffic and transport, as well as on the research of sea floor and hidden or buried objects. Airborne LiDAR can help improve coastal operations, along with signalling other ships at sea of a potential hazard detected by the sensor. That hazard could be a natural obstacle or perhaps an underwater mine, even a bridge that is not visible at night under some circumstances. Given that climate change is beginning to seriously threaten the planet, contributing towards the battle against climate change is necessary, and this could be achieved with the benefits of Industry 4.0 and novel measurement techniques and analysis.

A future application of this sensor, could be to help in the removal of carbon dioxide from the oceans. Using this technology, we can direct laser beams to determine where heavy seaweed is cultivated and enrich the water with alkaline compounds that would equalize the pH levels. By doing this, we can accelerate the restoration of underwater ecosystems, and remove excess carbon dioxide from water via electrochemical purification. In addition, another potential use can be found in analysis of seafloor and underwater rocks, minerals and various underwater species. One more idea worth mentioning is submarine and hazardous liquid detection, such as oil spills. It would be delightful to see the industry reap the benefits of this development, as that would provide additional valuable information to the end user. It is certain that LiDAR technology is already benefiting from open data, artificial intelligence and

machine learning. These advantages should be utilized as much as possible as an overture to the solution for the near future.

REFERENCES

- [1] J. Van Rens, "The Future of Lidar is Critical to the Future of Our World", gim-international.com.
- [2] Monterey Bay Aquarium Research Institute, "Visualizing fine details of the deep seafloor", annualreport.mbari.org.
- [3] C. Konowe, "Lidar Helps to illuminate the Future of Oceans", marinetechologynews.com.
- [4] N.D. Quadros, "Technology in Focus: Bathymetric Lidar", gim-international.com.
- [5] "The Different Types of LiDAR Systems", lidarradar.com
- [6] K. Osborn, "BANG: The Navy PLans To Detect Sea Mines Using Lasers", nationalinterest.org
- [7] "Airborne Topographic LiDAR Help", ez-pdh.com
- [8] B. Lohani, "Airborne Altimetric LiDAR: Principle, Data collection, processing and Applications", Dept. of Civil Engineering, IIT Kanpur, India. home.iitk.ac.in/~blohani/LiDARSchool2008/Downloads/LiDAR_notes/LiDAR_Full_Notes.pdf
- [9] "LiDAR", splashcos.org, [splashcos.org, splashcos.org/sites/splashcos.org/files/downloads/9_Lidar.pdf](http://splashcos.org/sites/splashcos.org/files/downloads/9_Lidar.pdf)
- [10] A. Pantazis, "LiDARs Usage in Maritime Operations and ECO – Autonomous Shipping, for Protection, Safety and Navigation for NATO allies Awareness", National Technical Univ. of Athens, Greece. cmre.nato.int/msaw-2019-home/msaw2019-papers/1376-msaw2019-pantazis-lidarsusageinmaritimeoperationsandecoautonomousshippingforprotectionsafetyandnavigationfornatoalliesawareness/file
- [11] "Surveillance of MARItime surroundings through lasER technology" cordis.europa.eu/project/id/718624
- [12] M. Melin, A.C. Shapiro, P. Glover-Kapfer. "LiDAR for ecology and conservation", wwf.org.uk. [wwf.org.uk. wwf.org.uk/sites/default/files/2019-04/Lidar-WWF-guidelines.pdf](http://wwf.org.uk/sites/default/files/2019-04/Lidar-WWF-guidelines.pdf)
- [13] C. Konowe, "To Clear the Air: Look Beneath The Waves", magazines.marinelink.com magazines.marinelink.com/nwm/MarineTechnology/202203/#page/6
- [14] Neuvition, "LiDAR-based Ship Safety Driving Assistance System", neuvition.com [neuvition.com neuvition.com/video/ship.html](http://neuvition.com/video/ship.html)
- [15] "An Airborne Sonar System for Underwater Remote Sensing and Imaging", Stanford University, airbornesonar.sites.stanford.edu/
- [16] "Airborne LiDAR", Photomapping.com.au, photomapping.com.au/airborne-lidar
- [17] "Lidar sheds light on ocean health", Electrooptics.com, Issue: June 2021. electrooptics.com/feature/lidar-sheds-light-ocean-health
- [18] "Turbidity: Description, Impact on Water Quality, Sources, Measures – A General Overview", Minnesota Pollution Control Agency, Water Quality/Impaired Waters #3.21, March 2008. pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-iw3-21.pdf
- [19] M.D. Harrison, "Secchi Disk", Springer. link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-94-017-8801-4_123

ACKNOWLEDGMENT

This paper is supported by the Faculty of Technical Sciences in Novi Sad, Department of Energy Electronics and Telecommunications, under the grant MPNTR 200156: "Innovative scientific and artistic research in the field of FTN activities".

Dvokoračna segmentna linearizacija kao deo mernog lanca termopara

Dragan Živanović, Milan Simić, Milica Stojanović i Dragan Denić

Apstrakt—Rad prikazuje implementaciju dvokoračne segmentne metode linearizacije za smanjenje greške aproksimacije termoparova. U prvom delu je opisana softverska obrada mernog signala pretvarača sa termoparom. Evaluaciju linearizacionih funkcija i analizu aproksimacionih grešaka vrši softverski paket virtualne instrumentacije LabVIEW. Osnovni princip ove metode je da se apscisa prenosne funkcije prvo transformiše pomoću tabela za segmentnu linearizaciju na takav način da se opseg ulaznih vrednosti proširuje na opsezima na kojima je nelinearnost karakteristike značajna, a zatim se vrši standardna linearizacija po segmentima. Na ovaj način, primena dvokoračne metode linearizacije na jednakim segmentima ima isti efekat kao i primena linearizacije na nejednakim segmentima. Za date primere prenosnih funkcija termoparova, predložena metoda daje značajno manju grešku aproksimacije, uz jednaku potrošnju memorije za linearizacione tabele. Jednostavna softverska implementacija ovog dvokoračnog metoda linearizacije omogućava da se primenjuje u mernim pretvaračima mikrokontrolera male procesorske snage, umesto standardne segmentne linearizacije.

Ključne reči— Dvokoračna linearna aproksimacija, prenosna funkcija termopara, smanjenje aproksimacione greške, virtualna instrumentacija.

I. UVOD

Nelinearna prenosna karakteristika senzora u inteligentnim mernim pretvaračima može se kompenzovati brojnim metodama zasnovanim na hardveru i softveru. Polinomna aproksimacija je standardni metod koji se koristi za linearizaciju prenosne funkcije termoparova. Jednačine pogodne za linearizaciju prenosne karakteristike svakog tipa termopara definiše NIST i BIPM u obliku polinomne aproksimacije osmog ili većeg reda, za više (do 5) segmenta linearizacije, sa veoma malom greškom aproksimacije [1, 2]. Ako je dozvoljena greška linearizacije manja od 1%, a prenosna funkcija izrazito nelinearna, potreban je veći broj segmenata kako bi se prenosna karakteristika linearizovala, pa samim tim i polinom većeg stepena, ukoliko se koristi polinomna aproksimacija [4]. Dozvoljena greška termopara,

dobijena u procesu proizvodnje i prouzrokovana starenjem pri upotrebi, je značajno veća [3], preko 1 °C. To znači da je za linearizaciju karakteristike moguće uspešno koristiti i polinomne funkcije [4], ili splajn funkcije [5] nižeg reda.

U radu [6] predložena je metoda progresivne polinomne kalibracije, gde se polinom određuje direktno, na osnovu mernih kalibracionih tačaka, što je posebno pogodno ukoliko prenosna karakteristika nije poznata. Sve nesavršenosti mernog sistema se zatim kompenzuju u istoj proceduri.

U nekoliko radova [7, 8] su, kao metode za linearizaciju, predložene veštačke neuronske mreže (Artificial Neural Networks - ANN). ANN metode su pogodne jer je moguće uzeti u obzir nesavršenost mernog sistema, kao i veličine koje utiču na merenje, poput temperature hladnog kraja [9].

Ukupni troškovi memorije i procesorske snage su veoma važni aspekti pri izboru optimalne metode linearizacije za određene primene. Za izračunavanje optimalnih koeficijenata linearizacije na osnovu poznatih funkcija ili kalibracionih tačaka, može se koristiti personalni računar (PC). Ako se za izračunavanje koriste resursi PC - a, kompleksnost algoritma ne predstavlja ograničenje. S druge strane, merni pretvarači obično imaju značajno male resurse u vidu memorije i procesorske snage, pa je veoma važno izabrati metodu za linearizaciju koja ne zahteva veliku memoriju i procesorsku snagu [10-12]. Kada mikroprocesor ima mogućnost povezivanja više ulaza ili direktnog multipleksiranja većeg broja senzora na ulazu, još je važnije odabrati metodu linearizacije koja zahteva mali broj mikroprocesorskih ciklusa za izračunavanje.

U mnogim aplikacijama može biti korisno da se izračunavanja vrše u celobrojnoj matematici, što je kompatibilno sa linearnom segmentnom aproksimacijom. Implementacijom aritmetike sa podacima koji se pamte u formatu sa pokretnim zarezom, može se zauzeti i do 1 KB memorije, što je dovoljno memorije da se zapamti do 500 segmenata u linearizacionoj tabeli sa celobrojnim tipom podataka [12]. Kako je proračun brži ukoliko se koristi celobrojni tip podataka, segmentna linearizacija koja koristi cele brojeve je efikasnija za korišćenje u odnosu na polinomnu aproksimaciju, i pogodna za implementaciju u mikrokontroleru za različite tipove senzora. Takođe je pogodna i za dvodimenzionalnu segmentnu linearizaciju (površinska), kada konačni rezultat zavisi od dve promenljive.

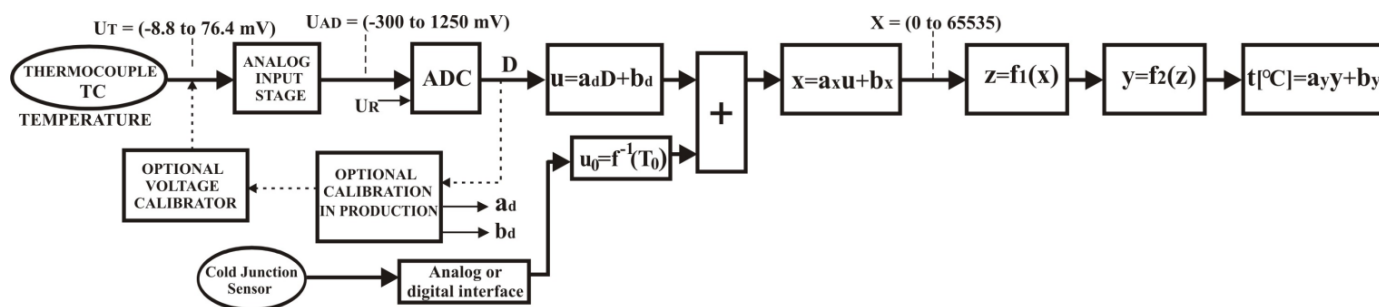
Linearizaciona metoda se u mnogim radovima kombinuje sa praktičnim implementacijama mernog sistema pretvarača

Dragan Živanović - Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dragan.zivanovic@elfak.ni.ac.rs).

Milan Simić - Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: milan.simic@elfak.ni.ac.rs).

Milica Stojanović - Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: milica.stojanovic@elfak.ni.ac.rs).

Dragan Denić - Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dragan.denic@elfak.ni.ac.rs).



Sl. 1. Protok signala unutar memnog pretvarača sa termoparom

[6, 7, 9, 11, 14].

Radovi [11, 15] daju dobru komparativu analizu primena većeg broja metoda linearizacije. U radovima [15, 16, 17] prikazana je hardverska implementacija segmentne linearizacije.

Pri poređenju metoda, pored tačnosti aproksimacije, treba uporediti potrošnju memorijskog prostora i brzinu odziva, a sve ovo dosta zavisi i od posmatrane prenosne karakteristike.

II. ULAZNI STEPEN TERMOPARA

Termoparovi se često koriste kao temperaturni senzori, zbog brzog odziva, robusne konstrukcije i temperaturnog opsega od $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$, značajno šireg nego kod otpornih i poluprovodničkih senzora [18, 19]. Nedostatak primene termoparova jeste nelinearnost prenosne karakteristike, kao i uticaj temperature hladnog kraja termopara na merenje.

Dve metalne žice, različitih termoelektričnih karakteristika su spojene na jednom kraju, koji je izložen visokim temperaturama, obično mnogo višim od drugog, otvorenog, kraja. Naponska razlika između žica na otvorenom kraju će zavistiti od materijala od kojeg su napravljene žice, kao i od temperature na oba kraja termopara. Tabela sa termoelektričnim naponima standardnih termoparova se daje pod pretpostavkom da se otvoreni kraj termoparova nalazi na temperaturi od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Izvan oblasti sa visokim temperaturama, krajevi termopara mogu se produžiti korišćenjem jeftinijih kompenzacionih kablova, koji će omogućiti da se termopar poveže sa elektronikom. Kako bi se merila temperatura na vrućem kraju, temperatura na otvorenom ("hladnom") kraju mora biti poznata. [9, 20]. Za rešavanje problema kompenzacije hladnog kraja, u praktičnim realizacijama se dodaje temperaturni senzor sa boljom tačnošću, ali sa mnogo manjim temperaturnim opsegom, na primer, otporni senzori PT100, ili poluprovodnički senzor TMP275, povezan pomoću I2C digitalnog interfejsa.

Dotadni senzor temperature mora biti smešten veoma blizu hladnog kraja termopara, po mogućstvu u termoizolovanoj komori sa konektorom. Tipičan postupak linearizacije prenosne karakteristike termopara uključuje konverziju temperature hladnog spoja T_0 , na napon U_0 , korišćenjem funkcije $U_0 = f(T_0)$. U sledećem koraku, napon U_0 treba dodati izlaznom naponu termopara U_T , zatim se inverznom funkcijom dobijeni napon konvertuje u temperaturu pomoću funkcije $T = f^{-1}(U_T + U_0)$ [9, 20]. Zbog nelinearnosti

karakteristike termopara, direktno dodavanje temperature hladnog kraja inverznoj funkciji napona termopara nije tačno, jer traženo $T = f^{-1}(U_T + f(T_0))$ nije isto što i $T = f^{-1}(U_T) + T_0$.

Blok dijagram na Sl. 1. prikazuje algoritam softverske obrade signala u mernom pretvaraču, pogodnom za merenje sa različitim tipovima termopara. Odnos između rezultata ADC konverzije i ulaznog napona je isti za sve tipove termopara. Uobičajeno, u toku procesa proizvodnje pretvarača, neophodno je podesiti koeficijente a_d i b_d kako bi se izvršila kalibracija. Nakon toga, vrednost napona termopara treba uvećati za vrednost napona hladnog kraja senzora. Kako bi se pojednostavio postupak linearizacije za različite tipove termoparova i smanjila greška u celobrojnim proračunima, signal se zatim skalira tako da pokrije maksimalan opseg korišćenjem neoznačenih int16 promenljivih, od 0 do 65535, za opseg napona za izabrani tip termopara i temperaturni opseg.

Sledeći korak je primena inverzne funkcije za određeni tip termopara. U datom blok dijagramu, ova inverzna funkcija je podeljena na funkcije f_1 i f_2 , prema predloženoj dvokoračnoj metodi linearizacije. Konačno, izračunata celobrojna vrednost temperature u opsegu od 0 do 65535 se konvertuje u konačni rezultat u formatu sa fiksnom decimalnom tačkom, a koeficijenti a_y i b_y (različiti za svaki tip termopara) obezbeđuju da rezultat bude predstavljen u obliku $yyyy.y[^{\circ}\text{C}]$.

III. METOD DVOKORAČNE LINEARNE APROKSIMACIJE PRIMENJEN NA STANDARDNE TIPOVE TERMOPAROVA

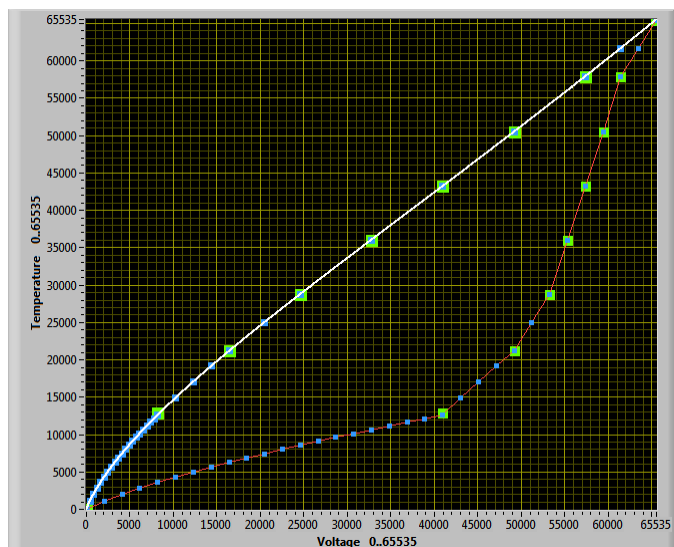
Glavni cilj korišćenja metode dvokoračne segmentne linearne aproksimacije, koja je prvi put predstavljena u ranije objavljenim radovima [12, 13, 21,], jeste izvođenje svih izračunavanja pomoću celobrojne aritmetike, kao i da se izbegne određivanje kom segmentu pripada ulazna vrednost, koja je obavezna kod metoda koje koriste podelu na nejednake segmente.

Nelinearna prenosna karakteristika se može aproksimirati pomoću više linearnih segmenata, pri čemu se zahteva da su linearni segmenti povezani, kako bi se obezbedilo da dobijena linearizovana karakteristika bude kontinualna.

Kod segmentne linearizacije, apscisa se deli na jednake segmente. Kako bi se smanjila greška aproksimacije, potrebno je povećati broj segmenata u delu u kome je prenosna karakteristika jako nelinearna. To dovodi do nejednakih veličina segmenata. Razlika u veličini segmenata dovodi do usporavanja metode linearizacije.

Jedan od načina da se zadrži mali broj potrebnih segmenata, a da se pri tom ne uspori proces linearizacije korišćenjem segmenata nejednake veličine, je korišćenje dvokoračne metode linearizacije, predložene u radu [12]. Kod ove metode, prvo se određuju delovi prenosne karakteristike u kojima je izražena nelinearnost. Zatim se vrši transformacija X – ose, tako što se segmenti u kojima je nelinearnost izražena razvuku u odnosu na ostatak karakteristike. Za transformaciju X – ose se takođe primenjuje segmentna linearizacija. Zatim se, na tako transformisanu karakteristiku, ponovo primenjuje segmentna linearizacija. Na taj način se smanjuje greška aproksimacije. Transformacija X – ose je ovde izvedena na drugačiji način u odnosu na postupak iz rada [12], korišćenjem iterativnog postupka.

Predloženi metod se može primeniti na različite tipove senzora. Glavni zahtev prilikom vršenja linearizacije jeste da greška aproksimacije bude manja od granične vrednosti greške, definisane NIST i BIPM standardima za termoparove [1, 2]. Konačna greška linearizacije u ovom radu će biti računata kao maksimalna razlika između vrednosti ordinate aproksimirane funkcije i vrednosti ordinate koja se dobija primenom inverzne polinomne funkcije koju definiše NIST, na celom opsegu vrednosti napona, za određeni tip termopara. Cela procedura, sa odgovarajućim grafičkim prikazima, se vrši korišćenjem razvijenih softverskih algoritama u programskom okruženju LabVIEW. Na Sl. 2. dat je Front panel virtuelnog instrumenta LabVIEW na kome je predstavljena normalizovana, inverzna, prenosna karakteristika termopara tipa E.



Sl. 2. Front panel LabVIEW – a, prikaz normalizovane, inverzne prenosne karakteristike termopara E tipa (bela linija) i karakteristika sa transformisanom X – osom (crvena linija)

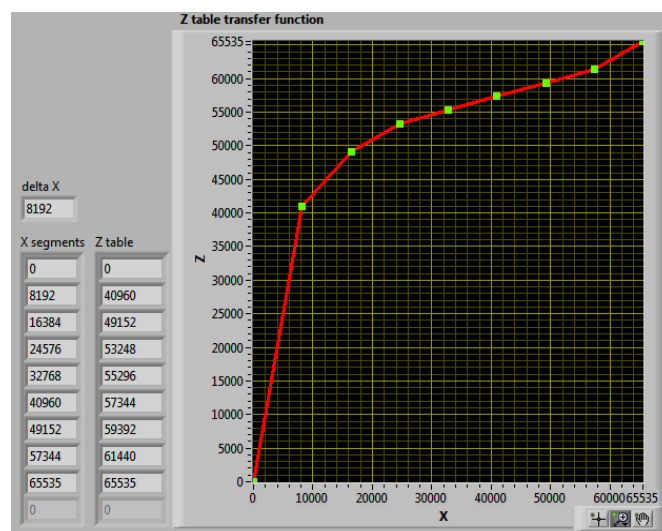
Zelene tačke na graficima odgovaraju početnoj podeli bele (početne) prenosne karakteristike na osam segmenata. Crvena prenosna karakteristika, nakon zamene X – ose sa Z, postaje $Y = f(Z)$. Ova prenosna karakteristika je podeljena na 32 jednaka segmenta, deljenjem apscise, Z – ose (plave tačke).

Vraćanjem plavih tačaka sa crvene na belu karakteristiku, može se uočiti da je praktično postignuta segmentna linearizacija sa podelom X – ose na nejednake segmente.

Konačno, linearizacija inverzne prenosne karakteristike termopara i izračunavanje temperature na osnovu normalizovane vrednosti ulaznog napona, vrši se prema relaciji:

$$Y = f_2(Z) = f_2(f_1(X)) = f_T(X) \quad (1)$$

Na Sl. 3. je prikazana funkcija $Z = f_1(X)$ koja transformiše X – osu na osam jednakih segmenata u opsegu od 0 do 65535.

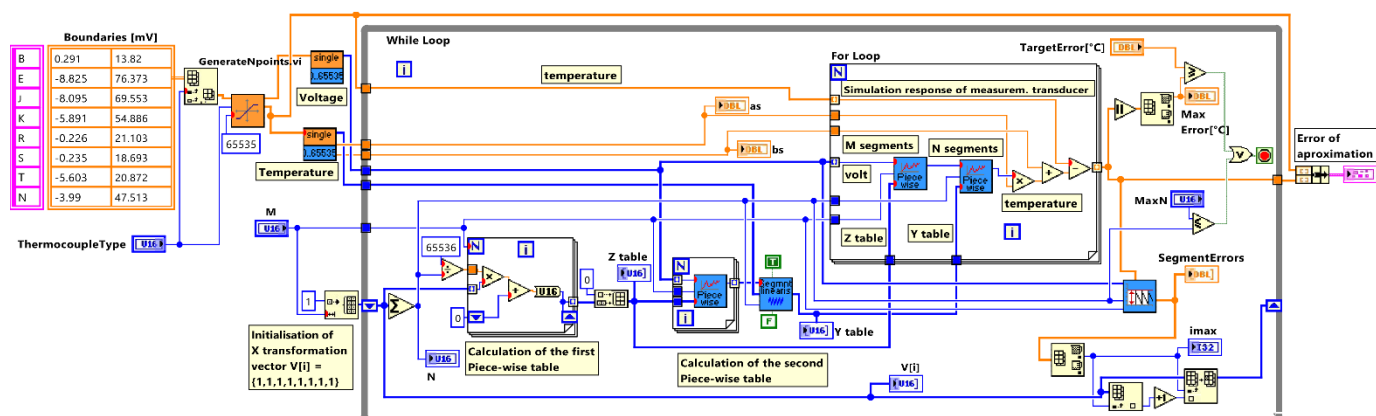


Sl. 3. Transformacija X – ose na 8 jednakih segmenata

Na Sl. 4. je dat prikaz LabVIEW blok dijagrama pomoću koga se vrše izračunavanja potrebna za primenu dvokoračne segmentne metode linearizacije karakteristike termopara, uključujući i računanje greške aproksimacije. U petljama se vrši iterativni postupak kako bi se dobile vrednosti potrebne za formiranje linearizacionih tabela. Ulazni parametri ove petlje su: broj segmenata u prvoj linearizacionoj tabeli, M, maksimalna dozvoljena greška aproksimacije (TargetError[°C] u LabVIEW blok dijagramu) i maksimalni dozvoljeni broj segmenata u drugoj linearizacionoj tabeli (MaxN). Petlja će se zaustaviti u iteraciji u kojoj je ispunjen jedan od dva uslova.

Na levoj strani blok dijagrama se bira jedan tip termopara, i u zavisnosti od izabranog tipa termopara, selektuje se odgovarajući opseg ulaznog napona. Zatim se, korišćenjem funkcije koju definiše NIST za polinomnu aproksimaciju, formira 65535 para tačaka napona i temperatura koje se nalaze u odgovarajućem opsegu, a nakon toga se vrednosti napona i temperature normalizuju na opseg od 0 do 65535.

Nelinearna prenosna karakteristika se deli na M jednakih segmenata, deljenjem X – ose, i određuju se segmenti u kojima je karakteristika izrazito nelinearna. Svaka tačka na X – osi se može izračunati kao $X_i = \Delta X \times i$, za $i=0, \dots, M$, pri čemu je veličina segmenata određena kao



Sl. 4. LabVIEW blok dijagram koji prikazuje iterativni postupak za određivanje linearizacionih tabela za dvokoračni metod linearizacije i konačne greške aproksimacije

$$\Delta X = \frac{65535}{M} \quad (2)$$

Zatim se vrši transformacija X – ose, tako što se segmentni u kojima je karakteristika izrazito nelinearna, razvuku, tj. formira se Z – osa, $Z_i = f_1(X_i)$.

$$Z_0 = 0, Z_i = Z_{i-1} + V[i]\Delta Z \quad (3)$$

Veličina segmenata na Z – osi, ΔZ , se izračuna pomoću jednačine:

$$\Delta Z = \frac{65535}{N} \quad (4)$$

U prvoj linearizacionoj tabeli je definisan vektor transformacije X – ose, $V[i]$, tj. niz koeficijenata u (3). Ukoliko se izabere $M=8$ segmenata za formiranje prve linearizacione table, početna vrednost ovog vektora će biti $V[i] = \{1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$. Ovo znači da će druga linearizaciona tabela imati po jedan segment u svakom od osam naponskih opsega. Tokom iterativnog procesa, vektor $V[i]$ se menja tako što se element vektora, kome odgovara segment sa izrazitom nelinearnošću, povećava.

Vektor transformacije X – ose, koji odgovara termoparu sa Sl. 3., nakon finalne iteracije će biti $V[i] = \{20, 4, 2, 1, 1, 1, 1, 2\}$. Suma svih elemenata vektora $V[i]$ je 32, ukoliko je izabrana vrednost za $N=32$, tj. ukoliko je izabrano da se za drugu segmentnu linearizaciju apscisa подели na 32 segmenta.

U ovom primeru, koristeći $V[i]$ prema (3), parametri u Z tabeli se računaju na sledeći način:

$$\begin{aligned} Z_0 &= 0, \\ Z_1 &= Z_0 + 20\Delta Z, \\ Z_2 &= Z_1 + 4\Delta Z = 20\Delta Z + 4\Delta Z = 24\Delta Z, \\ Z_3 &= Z_2 + 2\Delta Z = 24\Delta Z + 2\Delta Z = 26\Delta Z, \\ Z_4 &= Z_3 + \Delta Z = 26\Delta Z + \Delta Z = 27\Delta Z, \\ Z_5 &= Z_4 + \Delta Z = 27\Delta Z + \Delta Z = 28\Delta Z, \\ Z_6 &= Z_5 + \Delta Z = 28\Delta Z + \Delta Z = 29\Delta Z, \\ Z_7 &= Z_6 + \Delta Z = 29\Delta Z + \Delta Z = 30\Delta Z, \end{aligned} \quad (5)$$

$$Z_8 = Z_7 + 2\Delta Z = 30\Delta Z + 2\Delta Z = 32\Delta Z.$$

Transformisane X vrednosti, odnosno Z vrednosti, su izračunate na celom radnom opsegu, pomoću Z table (prve linearizacione table). Zatim se analizira inverzna kriva, tj. funkcija koja predstavlja transformisanu X – osu, kako bi se odredila 32 segmenta u drugom koraku linearizacije. Segmentna linearizacija koja se izvodi u drugom koraku je realizovana unutar Sub VI bloka, na isti način kao i određivanje vrednosti na osnovu prve linearizacione table, koja je u blok dijagramu nazvana “Segment Linearis” i “Pice_Wise”.

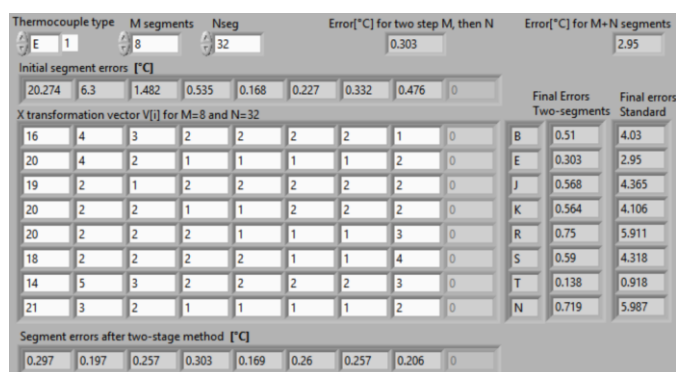
U desnom delu blok dijagrama nalazi se “For Loop” koja daje simulaciju odziva pretvarača, na osnovu linearizacionih tabela Z i Y. Na ulazu Sub VI se dovodi ulazni napon, čija je vrednost normalizovana na opsegu od 0 do 65535, i segmentna linearizacija se izvodi dva puta kako bi se aproksimirala inverzna prenosna karakteristika. Na kraju, dobijena vrednost se skalira na početni opseg temperature. Kako bi se izvršilo poređenje dobijene vrednosti sa vrednošću koju daje polinom koji propisuje NIST, računa se greška aproksimacije. Traženjem maksimalne greške aproksimacije na svakom od osam segmenata, u blok dijagramu se formira vektor “SegmentErrors”.

U donjem delu blok dijagrama, nalazi se funkcija čiji je zadatak da odredi u kom od osam segmenata je greška najveća. Kada se odredi segment sa najvećom greškom, “imax”, iterativni postupak povećava za jedan element vektora $V[imax]$. Petlja, u narednoj iteraciji, koristi izmenjenu vrednost vektora $V[i]$.

U primeru termopara tipa E, početne greške segmenta u stepenima Celzijusovim, za svaki od osam segmenata su 20.274, 6.3, 1.482, 0.535, 0.168, 0.227, 0.332 i 0.476, kao što se može videti na Sl. 5. Može se primetiti da je najveća greška aproksimacije u prvom segmentu, i iznosi 20.274 °C. Dakle, vektor $V[i]$ će u prvoj iteraciji da postane $\{2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1\}$. Nastavljajući iterativni postupak, dobija se krajnja vrednost za vektor $V[i] = \{20, 4, 2, 1, 1, 1, 1, 2\}$.

Primenom dvokoračnog segmentnog metoda linearizacije, dobija se maksimalna greška na celom radnom opsegu od 0.303 °C. Upoređivanjem greške koja se dobija primenom metode dvokoračne segmentne linearizacije, korišćenjem prvo

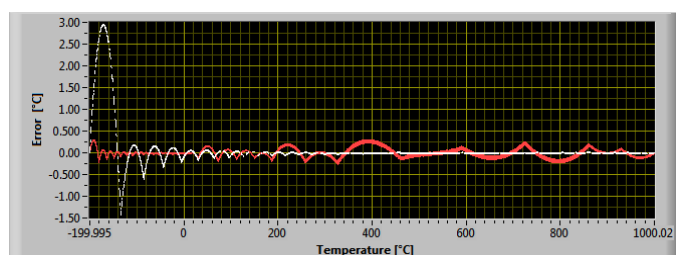
8, a zatim 32 segmenta, i metode segmentne linearizacije koja koristi 40 segmenata, zaključuje se da je greška smanjena 6 do 10 puta. Konačna greška aproksimacije za termopar tipa E je smanjena sa 2.95 °C na 0.303 °C, primenom metode dvokoračne segmentne linearizacije.



Sl. 5. Front panel sa koeficijentima prve linearizacione tabele i konačnim greškama, dobijenim primenom dvokoračne segmentne linearizacione metode koja koristi prvo 8, a zatim 32 segmenta i standardne segmentne aproksimacije sa 40 segmenata, za osam tipova termoparova,

Kako bi se izvršilo bolje poređenje metoda segmentne linearizacije i dvokoračne segmentne linearizacije, u tabeli 1 su date dobijene vrednosti greške aproksimacije za termopar tipa E, koje daju ove metode, za odabrane različite vrednosti broja segmenata M i N. Može se uočiti da povećanje broja segmenata, blago povećava prednost metode dvokoračne segmentne linearizacije, u odnosu na standardnu metodu sa M+N brojem segmenata.

Na Sl. 6. dat je Front panel na kome je prikazana greška aproksimacije dobijena primenom ove dve metode za termopar tipa E. Kriva označena belom bojom predstavlja grešku aproksimacije dobijenu korišćenjem standardne segmentne metode aproksimacije korišćenjem 40 segmenata. Kriva označena crvenom bojom predstavlja grešku aproksimacije koja je dobijena primenom dvokoračne segmentne metode linearizacije, korišćenjem prvo 8, a potom 32 segmenta. Može se primetiti da se primenom dvokoračne



Sl. 6. Greška aproksimacije dobijena primenom standardne metode linearizacije korišćenjem 40 segmenata (bela) i dvokoračne metode linearizacije korišćenjem prvo 8, zatim 32 segmenta (crvena), prikazana na Front panelu u LabVIEW

metode linearizacije značajno smanjuje greška aproksimacije.

Treba još napomenuti da je važno obratiti pažnju prilikom odabira vrednosti za M. Ukoliko je M malo, javlja se velika greška, a ako je suviše veliko, ne ostaje dovoljan broj segmenata za drugi korak linearizacije. Vrednost M je najbolje uzeti kao $M = (N + M)/4$, jer će u tom slučaju vrednost M biti u obliku 2^k . U svakom slučaju, dobijena greška je manja nego u slučaju primene standardne linearizacione metode.

Još jedna prednost ove metode jeste u tome što, ukoliko se ne koristi ceo temperaturni opseg termopara, već uži radni deo opsega, princip dvokoračne segmentne linearizacije je isti. Zadati opseg se na početku normalizuje na opseg od 0 do 65535, i primenjuje se linearizacija na prethodno opisan način. Smanjenje opsega će olakšati linearizaciju, jer se do željene tačnosti dolazi sa manjim brojem segmenata.

Uzimajući u obzir i druge izvore grešaka u mernom sistemu, vrednost greške od 0.2 °C se može opravdano uzeti za cilj za dati dvokoračni segmentni linearizacioni metod. U tabeli 2 je prikazan potreban broj segmenata za sve tipove termoparova kako bi se postigla greška aproksimacije od 0.2 °C, primenom standardne metode segmentne linearizacije i metode dvokoračne segmentne linearizacije.

TABELA 1

GREŠKE APROKSIMACIJE TERMOPARA TIPa E DOBIJENE PRIMENOM METODE SEGMENTNE LINEARIZACIJE I DVOKORAČNE SEGMENTNE LINEARIZACIJE

Vrednosti parametara M i N (broj segmenata)	Greška aproksimacije	
	Standardna linearizaciona metoda, M+N segmenata	Dvokoračna segmentna linearizaciona metoda, M, zatim N, segmenata
M=8, N=32	$\Delta T=2.95\text{ °C}$	$\Delta T=0.303\text{ °C}$
M=8, N=48	$\Delta T=1.79\text{ °C}$	$\Delta T=0.144\text{ °C}$
M=8, N=64	$\Delta T=1.20\text{ °C}$	$\Delta T=0.096\text{ °C}$
M=16, N=32	$\Delta T=2.26\text{ °C}$	$\Delta T=0.220\text{ °C}$
M=16, N=48	$\Delta T=1.44\text{ °C}$	$\Delta T=0.101\text{ °C}$
M=16, N=64	$\Delta T=1.00\text{ °C}$	$\Delta T=0.075\text{ °C}$

TABELA 2

POTREBAN BROJ SEGMENTATA KAKO BI SE DOBILA GREŠKA OD 0.2 °C, ZA SVE TIPOVE TERMOPAROVA

Tip termopara	Standardni linearizacioni metod	Dvokoračni linearizacioni metod	
	N=	M=8, N=	M=16, N=
B	215	52	46
E	196	43	35
J	270	53	42
K	250	52	42
R	330	70	51
S	260	59	46
T	92	27	26
N	342	64	47

IV. ZAKLJUČAK

Linearizacioni metod predstavljen u ovom radu, implementiran je na osnovu dvokoračne segmentne linearizacione metode predložene u radu [12]. Opisani metod je pogodan za primenu kod termoparova, s obzirom na nelinearnost njihove prenosne karakteristike.

Predloženi dvokoračni segmentni linearizacioni metod, u poređenju sa standardnom segmentnom linearizacionom metodom, za dat primer nelinearne prenosne karakteristike termopara, daje manju grešku aproksimacije 6 do 13 puta, sa sličnim vremenom izvršenja i jednakom potrošnjom memorije za čuvanje linearizacionih tabela.

Prikazana linearizaciona metoda se lako može primeniti korišćenjem celobrojne aritmetike, što smanjuje broj procesorskih ciklusa potrebnih za izvođenje proračuna, kao i memorijskog prostora potrebnog za pamćenje linearizacionih tabela, za razliku od polinomne aproksimacije. Primena dvokoračnog segmentnog linearizacionog metoda je prikazana na primeru termopara, ali se može primeniti za linearizaciju nelinearne prenosne karakteristike i drugih senzora.

LITERATURA

- [1] Burns G, Scroger M, Strouse G, et al. NIST Monograph 175: Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90, April 1993.
- [2] Bedford R, Bonnier G, Maas H, Pavese F. Techniques for approximating the ITS-90, monograph BIPM, Bureau International des Poids et Mesures. Se`vres, France, 1990.
- [3] Measuresoft. DATASCAN 7000 distributed data acquisition system thermocouple accuracy, datascan.measure-soft.com/docs/TC.pdf (accessed November 2019).
- [4] Chen A and Chen C. Evaluation of piecewise polynomial equations for two types of thermocouples. *Sensors* 2013; 13(12): 17084–17097.
- [5] Wang X, Wei G and Sun J. Free knot recursive B-spline for compensation of nonlinear smart sensors. *Measurement* 2011; 44(5): 888–894.
- [6] Nadi M, Margo C, Kouider M, et al. Embedded system design and implementation of standard auto-calibrated measurement chain. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* 2008; 1(1): 21–33.
- [7] Danisman K, Dalkirana I and Celebib FV. Design of a high precision temperature measurement system based on artificial neural network for different thermocouple types. *Measurement* 2006; 39(8): 695–700.
- [8] Rivera J, Carrillo M, Chaco'n M, et al. Self-calibration and optimal response in intelligent sensors design based on artificial neural networks. *Sensors* 2007; 7(8): 1509–1529.
- [9] Dey D and Munshi S. A new intelligent scheme for simultaneous cold junction compensation and linearization of thermocouples. *Leonardo Electron J Pract Technol* 2011; 19: 13–28.
- [10] Bengtsson LE. Lookup table optimization for sensor linearization in small embedded systems. *Journal of Sensor Technology* 2012; 2(4): 177–184.
- [11] Erdem H. Implementation of software-based sensor linearization algorithms on low-cost microcontrollers. *ISA Transactions* 2010; 49(4): 552–558.
- [12] Živanović D, Arsić M and Đorđević J. Two-stage piece-wise linearization method. *International Journal of Modelling and Simulation* 2004; 24(2): 85–89.
- [13] Živanović D, Simić M. Two-stage segment linearization as part of the thermocouple measurement chain. *Measurement and Control* 2021; 54(1-2) 141–151
- [14] Sarma U and Boruah PK. Design and development of a high precision thermocouple based smart industrial thermometer with on line linearisation and data logging feature. *Measurement* 2010; 43(10): 1589–1594.
- [15] Islam T and Mukhopadhyay SC. Linearization of the sensors characteristics: a review. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 2019, 12(1):1-21
- [16] Živanović D, Lukić J and Denić D. A novel linearization method of sin/cos sensor signals used for angular position determination. *Journal of Electrical Engineering & Technology - JEET* 2014; 9(4): 1437-1445.
- [17] Jovanović J and Denić D. A cost-effective method for resolution increase of the two-stage piecewise linear ADC used for sensor linearization. *Measurement Science Review* 2016; 16(1): 28-34.
- [18] JUMO GmbH & Co. KG. Data sheet 90.1000, Construction and application of thermocouples, www.jumo.net/attachments/JUMO/attachmentdownload?id=4121 (2009, pristupljeno mart 2022).
- [19] Texas Instruments. TI designs, Optimized sensor linearization for thermocouple, www.ti.com/lit/ug/tidua11a/tidua11a.pdf (2015, pristupljeno, mart 2022).
- [20] Duff M and Towey J. Two ways to measure temperature using thermocouples feature simplicity, accuracy and flexibility. *Analog Dialogue* 2010; 44(10): 1–6.
- [21] Živanović D, Arsić M, Đorđević J, et al. Two stages piece-wise linearization method for intelligent transducers. In: *International scientific conference—ICEST 2003*, Sofia, Bulgaria, December 2003, pp.383–386.

ABSTRACT

The paper presents the implementation of a two - stage piece - wise linearization method to reduce the thermocouple approximation error. The first part describes the software processing of the measuring signal of the transducer with a thermocouple. Evaluation of linearization functions and analysis of approximation errors is performed by the LabVIEW virtual instrumentation software package. The basic principle of this method is to first transform the abscissa of the transfer function using a linear segment look - up table in such a way that the range of input values expands to the ranges where the nonlinearity of the characteristic is significant, and then standard piece - wise linearization is performed. In this way, the application of the two-stage linearization method on equal segments has the same effect as the application of linearization on unequal segments. For the given examples of transfer functions of thermocouples, the proposed method gives a significantly smaller approximation error, with equal memory consumption for look - up tables. The simple software implementation of this two-stage linearization method allows it to be used in low calculation power microcontroller measurement transducers, instead of standard piece - wise linearization.

**Two-stage segment linearization
as part of the thermocouple
measurement chain**

Dragan Živanović, Milan Simić, Milica Stojanović and
Dragan Denić

Poređenje merenja brzine vetra anemometrom sa šoljicama i ultrasoničnim anemometrom na vetroturbini

Robert Fajhner, Marjan Urekar, *Member*, IEEE

Apstrakt – Ovaj rad se bavi poređenjem performansi anemometra sa šoljicama i ultrasoničnog anemometra, instrumenata za merenje brzine vetra na jednoj od vetroturbina u vetroparku Alibunar. Podaci korišteni u analizi pribavljeni su putem SCADA sistema vetroparka Alibunar.

Ključne reči: vetar; brzina vetra; anemometar; vetroturbina

I UVOD

U današnje vreme, potreba za merenjem brzine vetra je prisutna u mnogim sferama privrede. Prvenstveno za potrebe meteorologije, u cilju praćenja vremenskih prilika i ocene zagađenosti vazduha, zatim za sisteme reagovanja u vanrednim situacijama, avionski saobraćaj kao i energetiku. U vetroenergetici, podaci o izmerenoj vrednosti brzine vetra koriste se za planiranje budućih projekata vetroparkova ali i za upravljanje radom postojećih vetroturbina.



Sl. 1. Blok dijagram mernog sistema vetroturbine

Anemometar je uređaj koji se koristi za merenje brzine vetra. Naziv potiče od 'anemos', što je starogrčka reč za 'vetar'. Iako je reč izvedena iz starogrčkog, nismo bili u mogućnosti izmeriti brzinu vetra sve do 1450. godine kada je Leon Battista Alberti izumeo prvi mehanički anemometar – sa klatnom, koji se sastojao od ravnog diska koji se slobodno okreće oko horizontalne ose u svojoj ravni i iznad svog centra gravitacije, ceo sklop je bio usmeren u pravcu vetra pomoću vetrokazna (kasnije je ovaj izum pripisan Robert Hook-u 1667.godine). Poznatiji anemometar je anemometar sa šoljicama, koji je 1846. izumeo irski astronom Thomas Romney Robinson. Vetar je uzrokovao da se šoljice-lopaticice rotiraju vodoravno, što je pomeralo niz točkica-zupčanika koji bi pokazivali brzinu vetra. Originalni anemometar koji je on postavio na opservatoriji (sa 4 lopaticice), gde je radio

Robert Fajhner – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: rfajhner@gmail.com).

Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

eksperimente, još uvek stoji na tom mestu. Njegov dizajn se i danas koristi, naravno uz moderne materijale i drugačije načine prenosa informacije o samoj brzini vetra. Najnovija tehnologija anemometra je ultrasonični anemometar, koji je izumljen 1994. godine. Ova tehnologija se i dalje razvija, i kao rešenje za merenje brzine vetra je najzastupljenija u svetu (pored informacije o brzini vetra, ultrasonični anemometar može još da daje informacije o pravcu vetra, temperaturi).

Kroz ovaj rad, porediće se izmerene vrednosti vetra mehaničkog anemometra (sa šoljicama) i ultrasoničnog anemometra, koji se koriste u mernom sistemu vetroturbina, u vetroparku Alibunar, u različitim temperaturnim uslovima, pri različitim izmerenim brzinama vetra.

II KARAKTERISTIKE MERNIH UREĐAJA

Mehanički anemometar je proizvod kompanije Thies, model 4.3519.00. sa 3 lopaticice [1], i služi za merenje



Sl. 2. Anemometar sa šoljicama Thies 4.3519.00. [9]

horizontalne brzine vetra. Uređaj je napravljen od materijala otpornih na koroziju. Kućište je napravljeno od eloksiranog aluminijuma i nerđajućeg čelika, dok su lopaticice izrađene od ojačanog fiberglasa. Na izlazu iz anemometra je signal u opsegu 2–630 Hz (optoelektrični princip merenja brzine vetra) koji se pretvara putem integrisanog mernog pretvarača u analogni signal oblika 4-20 mA. Optoelektrični princip zasniva se na slanju LED svetla kroz kodni prsten prema foto prijemniku, na osnovu kojeg se formiraju električni impulsi. Merni opseg je od 0,5 m/s do 50 m/s, sa rezolucijom od 0,1

m/s. Tačnost uređaja je definisana na intervalu: za vrednosti vetra 0,5 – 17 m/s, tačnost je +/- 0,5 m/s; za vrednosti 17-50 m/s, tačnost je +/-3% od merene vrednosti.

Ultrasonični anemometar je proizvela, takođe, kompanije Thies, model 2D 4.382x. sa dva para, naspramnih ultrazvučnih pretvarača, na rastojanju od 200 mm [2]. Izlazni signal može biti digitalni i/ili analogni. Anemometar pouzdano radi pri temperaturama od -50°C do +70°C. Merni opseg brzine vetra je 0,01 – 75 m/s (prag detekcije je 0,01 m/s). Što se tiče tačnosti merenja brzine vetra, za brzine do 5 m/s, tačnost je +/- 0,1 m/s, dok za brzine vetra preko 5 m/s, tačnost je +/- 2 % od merene vrednosti [3]. Zbog svoje konstrukcije (otporni materijali, nema pokretnih delova) redovna kalibracija usled starenja nije potrebna.



Sl. 3. Ultrasonični anemometar Thies 2D [2]

Greške u merenju se javljaju usled mehaničkih deformacija nosača pretvarača, odnosno promene dužine mernog puta između ultrasoničnih pretvarača. Uticaji pravca strujanja vazduha i turbulencije su kompenzovani u procesu računanja.

III ODREĐIVANJE VREDNOSTI BRZINE VETRA

Merene vrednosti brzine vetra se šalju u digitalnom obliku upravljačkom sistemu vetroturbine. Operacije izračunavanja brzine vetra se izvršavaju u elektronskom sklopu dnevnika izmerenih vrednosti (data logger).

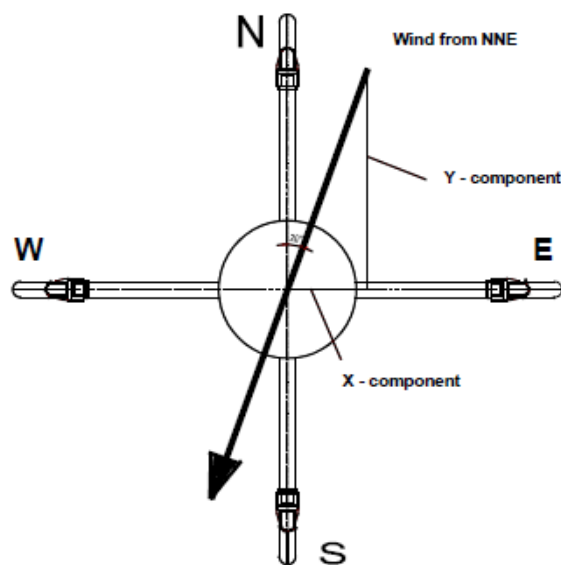
Kod anemometra sa šoljicama, preko data logger-a, dobijene vrednosti se uzorkuju (u kratkom vremenskom intervalu 10 ms) i tako dobijene vrednosti se dalje koriste u proračunima brzine vetra, u upravljačkom sistemu. Ove vrednosti se usrednjavaju na intervalima 50 ms, 100 ms, 500 ms, 1s, 10s, 30s i 600s, u pokretnom smislu i kao promenljive

koriste u drugim operacijama kontrolnog sistema. Proračuni u pokretnom smislu se izvršavaju tako da se 'najstarija' merena vrednost zameni najskorijom merenom vrednošću, i ponovo izračuna srednja vrednost. Prilikom produkcije električne energije, u proračunima vrednosti brzine vetra mora da se uključi uticaj turbulencije rotirajućih elisa i vibracija gondole koji utiču na izmerene brzine vetra. Kroz te faktore se linerazuje jednačina po kojoj se vrednost brzine vetra računa i povećava preciznost mernog uređaja:

$$v_v = A f_s + B \quad (1)$$

Merena brzina vetra je v_v u [m/s], f_s je frekvencija generisanog signala na izlazu anemometra [Hz], a A i B koeficijenti dobijeni prilikom kalibracije samog anemometra [4]. Linearna zavisnost izmerene brzine kod anemometra sa lopaticma je i dokazana u laboratorijskim ispitivanjima [5]. Prilikom kalibracije navedenog tipa anemometra sa lopaticama izračunata je merna nesigurnost uređaja $\sigma=2,04\%$ [6].

Kod ultrasoničnog anemometra, proces merenja vrednosti vetra i njeno usrednjavanje je drugačije. Dve putanje na kojima se vrši merenje su međusobno upravne. Pretvarači rade i kao predajnici i kao prijemnici. Elektronski kontrolni sistem anemometra bira pravac i smer merenja, i u jednoj sekvenci merenja (2,5ms pri temperaturi 20°C) izvrše se 4 individualna merenja u sva četiri smera (S-N,W-E,N-S,E-W) mernih putanja. Brzina zvuka značajno zavisi od temperature vazduha, međutim pošto se merenje brzine prostiranja zvuka obavlja duž oba pravca merenja, i u oba smera, time se isključuje uticaj temperature na merenje.



Sl. 4. Princip merenja ultrasoničnog 2D anemometra [3]

Merene vrednosti brzine prostiranja daju dve komponente vektora brzine vetra (X i Y), koje DSP anemometra pretvara u polarne koordinate, na osnovu kojih se u potpunosti rekonsruirše vektor brzine vetra. Usrednjavanje merenih vrednosti se odvija svakih 20ms, u pokretnom smislu kao i kod mehaničkog anemometra. Ove srednje vrednosti se ponovo preračunavaju na intervalima 100ms, 500ms, 1s, 10s, 30s i 600s. Pojedinačna horizontalna komponenta brzine vetra u [m/s] može se aritmetički izračunati kao:

$$u = \frac{c^2}{2f_z d} \quad (2)$$

gde je c – brzina prostiranja zvučnog talasa koji se šalje između ultrasoničnih pretvarača; f_z – frekvencija tog zvučnog talasa; a d – rastojanje između pretvarača. Izračunata vrednost brzine vetra v_v [m/s] je :

$$v_v = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} \quad (3)$$

gde su u_x i u_y komponente vektora brzine vetra. Prilikom testiranja navedenog tipa 2D ultrasoničnog anemometra izračunata je merna nesigurnost uređaja $\sigma=2\%$ [7].

IV POREĐENJE RADA MERNIH UREĐAJA

U svrhu analize rada mernih uređaja, upotrebljeni su podaci iz memorije jedne od vetroturbina iz vetroparka Alibunar, pri čemu se vodilo računa da se uzmu u obzir različiti vremenski uslovi (brzina vetra i spoljna temperatura). Podaci u dalje navedenim tabelama predstavljaju izmerene i usrednjene desetominutne vrednosti brzine vetra, u toku jednog dana (vremena su birana nasumično). Zbog značajno boljih karakteristika i nedostatka referentnog mernog instrumenta na koji ne bi uticali postojeći spoljni faktori, merenja ultrasoničnog anemometra će se smatrati referentnim. Veličine koje se navode u tabelama su: v_1 – brzina izmerena anemometrom sa lopaticama; v_2 – brzina izmerena ultrasoničnim anemometrom; Δv – razlika između izmerenih brzina i % - relativna greška u odnosu na referentnu vrednost.

U Tabeli I, prikazani su podaci iz 10. januara 2021. Na prvi pogled, lako se uočavaju drastične razlike između merenja mehaničkog i ultrasoničnog anemometra. Promene spoljne temperature su relativno male (manje od 1°C), dok razlike u merenim brzinama variraju od 2,32 m/s do 3,71 m/s (što daje grešku preko 40% u odnosu na referentnu vrednost). Uzrok greške je relativno niska spoljna temperatura (nekoliko dana je bila temperatura konstantno ispod 0°C), što je skoro dovelo do smrzavanja mehaničkog anemometra. Za ova

merenja, mehanički anemometar ne ispunjava navedene tačnosti od strane proizvođača.

U Tabeli II, prikazani su izmerene vrednosti vetra od 25.01.2022. Opseg promene spoljne temperature se malo povećao, ali je i dalje na ivici temperature mogućeg smrzavanja anemometra sa lopaticama. Iz izmerenih vrednosti brzine vetra se vidi da se greška mehaničkog anemometra smanjila (sad je do 16% merene vrednosti) ali se nalazi u granicama koje navodi proizvođač.

TABELA I MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD -2,8°C DO -3,5°C

VREME	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	Δv [m/s]	%
20:10	3,720	6,769	3,049	39,25
17:40	3,859	6,960	3,101	44,54
14:30	2,960	5,280	2,320	43,94
11:30	3,950	7,110	3,160	44,44
09:40	3,670	6,420	2,750	42,83
08:00	4,349	8,029	3,680	45,83
06:30	4,590	7,989	3,399	42,54
04:20	5,170	8,869	3,699	41,71

TABELA II MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD -3,3°C DO 1,6°C

VREME	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	Δv [m/s]	%
22:10	3,259	3,660	0,401	10,95
20:20	3,130	3,519	0,389	11,05
18:10	1,559	1,860	0,301	16,18
15:50	2,359	2,779	0,420	15,11
12:10	2,920	3,309	0,389	11,76
09:30	2,960	3,329	0,369	11,08
06:50	5,448	5,931	0,483	8,14
04:00	4,260	4,710	0,450	9,55

U Tabeli III (vrednosti merene 19.02.2022.) prikazani su uslovi temperature iznad nule odnosno ukupni porast spoljne temperature od 5,6°C u toku dana, pri vetrovima do 5 m/s. Vrednost relativne greške mehaničkog anemometra se i dalje smanjuje (ispod 10%).

TABELA III MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD 4,2°C DO 9,8°C

VREME	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	Δv [m/s]	%
22:00	2,589	2,849	0,260	9,12
20:10	2,599	2,880	0,281	9,76
18:00	4,428	4,659	0,231	4,96
15:50	1,848	1,960	0,112	5,71
13:20	1,210	1,230	0,020	1,63
10:00	0,989	1,041	0,052	4,99
07:00	1,191	1,230	0,039	3,17
03:40	0	0,280	0,280	100

Zanimljivo je primetiti podatak kada mehanički anemometar ne detektuje vetar (brzina 0,28 m/s), što se u potpunosti slaže sa specifikacijom instrumenta.

Tabela IV prikazuje vrednosti izmerene brzine vetra za slučaj iste promene spoljne temperature (od 5,6°C), pri nešto višoj spoljnoj temperaturi u odnosu na Tabelu III. Podaci su od 13.03.2022. U ovom slučaju, izmerene brzine vetra su mnogo veće (preko 5 m/s), i može se zaključiti da se relativna greška merenja mehaničkog anemometra još više smanjila (manje od 2%) u odnosu na referentnu vrednost.

TABELA IV MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD 9,5°C DO 15,1°C

VREME	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	Δv [m/s]	%
22:40	10,729	10,699	0,030	0,28
20:20	7,597	7,689	0,092	1,19
18:30	10,792	10,890	0,098	0,90
16:00	10,010	10,069	0,059	0,58
14:10	8,810	8,890	0,080	0,90
12:00	8,100	8,100	0,000	0
09:20	5,309	5,400	0,091	1,68
06:10	11,147	11,189	0,042	0,37

U Tabeli V i Tabeli VI prikazane su brzine vetrova izmerene pri spoljnim temperaturama preko 20 °C (Tabela V sadrži podatke od 01.08.2020. a Tabela VI od 03.07.2020.).

TABELA V MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD 26,1°C DO 34,7°C

VREME	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	Δv [m/s]	%
22:50	8,039	8,060	0,021	0,26
20:50	9,707	9,710	0,003	0,03
18:40	5,059	5,059	0	0
16:20	9,010	9,020	0,010	0,11
13:30	7,789	7,771	0,018	0,23
11:20	7,420	7,409	0,011	0,15
08:00	10,102	10,149	0,047	0,46
05:30	9,770	9,770	0	0

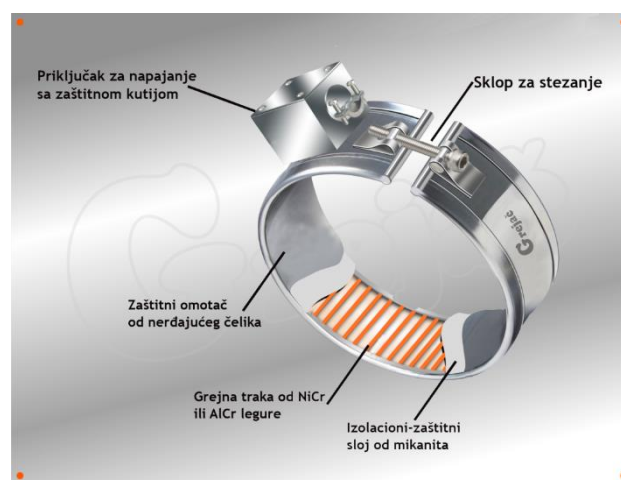
TABELA VI MERENJE BRZINE VETRA PRI SPOLJNOJ TEMPERATURI OD 23,4°C DO 31,1°C

VREME	v_1 [m/s]	v_2 [m/s]	Δv [m/s]	%
23:20	3,970	4,028	0,058	1,43
21:50	2,700	2,710	0,010	0,37
19:10	3,970	4	0,030	0,75
16:20	2,799	2,838	0,038	1,33
13:00	2,430	2,460	0,030	1,21
10:20	1,379	1,379	0	0
06:00	4,559	4,610	0,051	1,10
02:20	7,050	7,130	0,080	1,12

U ovim tabelama obuhvaćene su vrednosti brzine vetra do 5 m/s i preko 5 m/s. Kao što se iz priloženog vidi, merene vrednosti mehaničkog anemometra se često podudaraju sa merenim vrednostima ultrasoničnog anemometra ili odstupaju manje od 1,5% merene vrednosti brzine vetra.

V ZAKLJUČAK

Kroz analizu prikupljenih podataka o izmerenim brzinama vetra, uočio sam da mehanički anemometar ne ispunjava karakteristike date od strane proizvođača u slučajevima konstantne temperature ispod 0°C (skoro zamrzavanje anemometra). Velike razlike u merenjima predstavljenih uređaja daje indikaciju kontrolnom sistemu vetroturbinе o



Sl. 4. Pojasni grejač [10]

mogućnosti stvaranja leda na elisama vetroturbinе, koje može

biti veoma opasno po okolinu. Ova pojava inicira aktivaciju drugih pod sistema vetroturbinа kao što je zagrevanje elisa vetroturbinе u cilju prevencije formiranja leda na njima. Takođe, potrebno je izvršiti neke modifikacije u sistemu merenja anemometra sa šoljicama, u cilju pružanja tačnijih izmerenih vrednosti brzine vetra.

Jedan od načina bio mogao biti tretiranje mehaničkih delova anemometra premazom ili sprejem protiv zamrzavanja, da se led ne bi hvatao za njih. Drugi način bi mogao biti dodavanje pojasnih grejača oko samog anemometra, koji bi mogao sprečiti smrzavanje osovine i ležajeva.

Sa druge strane, promenom metode za obradu signala koji generiše anemometar sa šoljicama mogla bi se smanjiti merna nesigurnost instrumenta. Umesto klasične metode uzorkovanja koja se koristi u današnjim mernim instrumentima, primenom stohastičke digitalne merne metode ovo bi bilo izvodljivo [8].

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se kompaniji Siemens Gamesa Renewable Energy na pruženoj podršci u stvaranju i razrađivanju ideje za ovaj rad. Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156: 'Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a'.

LITERATURA

- [1] Opis uređaja ;<https://www.thiesclima.com/pdf/en/Products/Wind-Compact?art=300>
- [2] Opis uređaja <https://www.thiesclima.com/pdf/en/Products/Wind-Ultrasonic-Anemometer?art=145>
- [3] Uputstvo [Instruction for use Ultrasonic anemometer Thies 2D](#)
- [4] S. Pindado, J. Cubas, F. Sorribes-Palmer "TheCupAnemometer,a Fundamental Meteorological Instrument for the Wind Energy Industry. Research at the IDR/UPM Institute", Madrid, Španija, 12. Novembar 2014.
- [5] S. Pindado, E. Vega, A. Martínez, E. Meseguer, S. Franchini, I. Pérez " Analysis of calibration results from cup and propeller anemometers. Influence on wind turbine Annual Energy Production (AEP) calculations" Wind Energy, januar 2011.

- [6] 40C Anemometer Uncertainty AppNote, 6. Februar 2015.
- [7] T. Lipecki, P. Jaminska-Gadomska, A. Sumore " Influence of Ultrasonic Wind Sensor Position on Measurement Accuracy under Full-Scale Conditions", Lublin, Poljska, 02. Oktobar 2020.
- [8] B. Ličina "Metoda merenja snage i energije vetra zasnovana na merenju na intervalu", doktorska disertacija, Elektrotehničko i računarsko inženjerstvo, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 12. Jun 2016.
- [9] Slika preuzeta iz kataloga proizvoda kompanije Thies " THIES-catalog-wind-e-9-2014"
- [10] Slika preuzeta sa <https://grejac.com/grejac/pojasni-grejac>

ABSTRACT

This paper compares the performance of a mechanical anemometer with cups and an ultrasonic anemometer, instruments for measuring wind speed on one of the wind turbines in the Alibunar windfarm. The data used in the analysis were obtained through the SCADA system of the Alibunar windfarm.

Comparison wind speed measurements with cup anemometer and ultrasonic anemometer on the wind turbine

Robert Fajhner, Marjan Urekar, *Member*, IEEE

Primena linearnog niza fotodetektora kod optičkih pseudoslučajnih pozicionih enkodera

Ivana Randelović, Dragan Denić, Goran Miljković i Aleksandar Jocić

Apstrakt—Precizno i pouzdano merenje ugaone pozicije je zahtev mnogih savremenim pokretnih sistema u industriji i drugim oblastima. Pseudoslučajni optički apsolutni enkoderi nude dobru rezoluciju, ali i pouzdanost i fleksibilnost u radu. U radu se analizira primena linearnog niza fotodetektora za paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda pri čemu se dobija pravi apsolutni enkoder, koji za razliku od klasičnog ima jednu kodnu traku nezavisno od rezolucije. Razmatraju se karakteristike primenjenog senzora kao i ograničenja njegove primene za očitavanje pseudoslučajnog koda. Kako bi se izbegle greške prilikom projektovanja diska enkodera predlaže se metoda njegove provere nakon projektovanja bazirana na obradi slike. Takođe, moguća je i provera kvaliteta diska nakon njegove realizacije.

Ključne reči—Pseudoslučajni pozicioni enkoder, merenje pozicije, paralelno očitavanje pseudoslučajnog koda, integrisani linearni niz fotodetektora.

I. UVOD

Pseudoslučajni optički enkoderi predstavljaju dobro rešenje za precizno i pouzdano merenje ugaone pozicije u različitim pokretnim sistemima u industriji, računarskim periferijama, antenama, kamerama, itd. Na tržištu se mogu naći kao obrtni i linearni pozicioni enkoderi visokih rezolucija. Pseudoslučajni pozicioni enkoderi, kao poseban tip apsolutnih enkodera, imaju manji broj kodnih traka, manji broj optičkih čitača, bolju pouzdanost i fleksibilnost. Pri samoj realizaciji pseudoslučajnog enkodera, obrtnog ili linearnog, potrebno je naneti pseudoslučajni binarni kod na disk ili traku enkodera i izvršiti odabir optičkog čitača, zatim definisati način očitavanja pseudoslučajnog koda [1], razmotriti metode skeniranja koda [2] kao i metode konverzije pseudoslučajnog u prirodni kod [3]. Dodatni kvalitet pseudoslučajnih enkodera koji im daje i veliku prednost u odnosu na klasične kodere, jeste detekcija grešaka očitavanja koda. Korisniku se pruža dodatna informacija koja potvrđuje ispravnost informacije o poziciji sistema.

Pseudoslučajni apsolutni enkoderi imaju jednu kodnu traku sa pseudoslučajnom binarnom sekvencom, koja se može očitavati serijski i paralelno. Prilikom određivanja ugaone pozicije kod pseudoslučajnih apsolutnih enkodera se koristi

„osobina prozora“ pseudoslučajne sekvence rezolucije n , pri čemu kada se očitaju n susednih bitova; oni predstavljaju jedinstvenu kodnu reč iz koje se može dobiti informacija o poziciji. Kodne reči su raspoređene longitudinalno, pri čemu prvih $(n-1)$ bita tekuće kodne reči su identični sa poslednjih $(n-1)$ bita prethodne kodne reči. Tačnije, dve susedne kodne reči razlikuju se u samo jednom bitu. Pseudoslučajna binarna sekvenca maksimalne dužine 2^n-1 se može generisati primenom pomeračkog registra od n -flip flopova i odgovarajuće povratne sprege. Ovako generisana pseudoslučajna binarna sekvenca sadrži 2^n-1 različitih kodnih reči dužine n . Da bi se očitao pseudoslučajni binarni kod može se koristiti jedan ili dva detektora, a da se kodna reč formira u pomeračkom registru, ili se može koristiti linearni niz n detektora pri čemu se paralelno očitavaju svih n bitova u svakom trenutku [4, 5].

U radu se predlaže očitavanje pseudoslučajnog binarnog koda primenom optičkog modula sa integrisanim nizom fotodetektora. Radi se o metodi paralelnog očitavanja koda primenom senzora TCD1254GFG kompanije Toshiba koja je objašnjena u prvom delu rada. U drugom delu rada su razmatrana ograničenja prilikom primene ovog senzora za očitavanje pseudoslučajnog koda kod optičkog obrtnog pseudoslučajnog enkodera. U trećem delu rada je predstavljen postupak provere ispravnosti projektovanja i iscertavanja pseudoslučajnih kodnih traka na tehničkom crtežu kao i provera samog diska nakon izrade a pre ugradnje.

II. METODA PARALELNOG OČITAVANJA PSEUDOSLUČAJNOG BINARNOG KODA

Kako bi se realizovao apsolutni pseudoslučajni enkoder, koji ne bi zahtevao inicijalno kretanje prilikom startovanja [1], može se primeniti linearni niz fotodetektora za očitavanje pseudoslučajnog koda sa diska enkodera. Inicijalno kretanje pokretnog mernog sistema je potrebno kod pseudoslučajnog enkodera sa serijskim očitavanjem koda kako bi se formirala prva validna kodna reč nakon startovanja mernog sistema. Takođe, ukoliko dođe do prekida napajanja enkodera ili se detektuje greška u merenju pozicije potrebno je inicijalno kretanje radi formiranja pseudoslučajne kodne reči.

Metod paralelnog očitavanja pseudoslučajnog binarnog koda može se postići primenom CCD senzora sa linearnim nizom fotodetektora.

Na slici 1 prikazan je rad pseudoslučajnog apsolutnog enkodera primenom metode paralelnog očitavanja koda [6], pri čemu se jedne strane kodne trake nalazi izvor svetlosti dok je sa druge strane linearni niz fotodetektora. Kodna traka je

Ivana Randelović – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: ivana.randjelovic@elfak.ni.ac.rs).

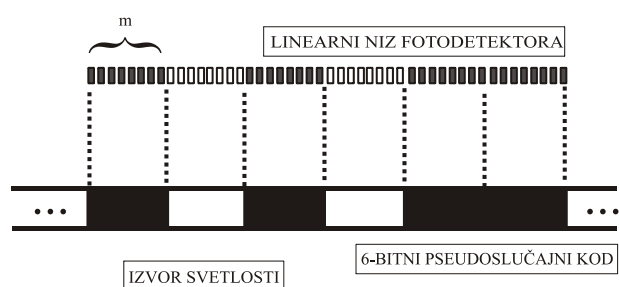
Dragan Denić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: dragan.denic@elfak.ni.ac.rs).

Goran Miljković – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: goran.miljkovic@elfak.ni.ac.rs).

Aleksandar Jocić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: aleksandar.jocic@elfak.ni.ac.rs).

sastavljena od prozirnih i neprozirnih polja, širina svakog polja odnosno, pseudoslučajnog bita, veća je od širine fotoelemenata linearnog niza fotodetektora kako bi bilo moguće očitavati bitove pseudoslučajnog koda. Da bi se odredila apsolutna pozicija pseudoslučajnog enkodera neophodno je očitati n uzastopnih bitova sa pseudoslučajne kodne trake. Svaki pseudoslučajni bit očitava se sa kodne trake uz pomoć m fotodetektora. Primera radi, prikazan je 6-bitni pseudoslučajni binarni kod ...101011... i linearni niz fotodetektor gde je broj fotodetektora koji očitava jedan bit $m=8$. Nakon primene linearnog niza fotodetektora, sa pseudoslučajne kodne trake dobija se sledeći niz na izlazu sistema za očitavanje koda

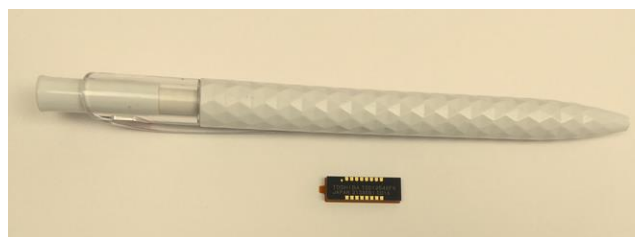
..11111110000000011111111000000011111111111111111...



Sl. 1. Očitavanje pseudoslučajnog koda primenom metode paralelnog očitavanja koda

Rezolucija i tačnost očitavanja pseudoslučajnog koda zavise od karakteristika linearnog niza fotodetektora. Najvažniji parametri senzorskog modula sa linearnim nizom fotodetektora su: razmak između fotodetektora, broj fotodetektora, veličina fotodetektora, tip fotodetektora, napon napajanja, dodatne zaštite na primer u vidu elektronskog zatvarača ("electronic shutter") koji izlazni napon održava konstantnim bez obzira na varijacije intenziteta svetlosti. Kompanije kao što su iC-Haus GmbH [7], Hamamatsu company [8], Sensors Unlimited [9], Taos [10], Toshiba [11] samo su neki od proizvođača komercijalnih linearnih nizova fotodetektora. sa različitim širinama fotoosetljivog elementa koji su reda 400 μm , 100 μm , 50 μm , 25 μm , itd.

U radu se koristi optički modul TCD1254GFG kompanije Toshiba (slika 2), koji sadrži 2500 fotodetektora, dimenzije fotodetektora su 5,25 μm \times 64 μm sa razmakom između fotodetektora 5,25 μm . Može se uočiti i da je sama dimenzija optičkog modula svega 13,371 mm.



Sl. 2 Fotografija optičkog modula Toshiba TCD1254GFG

III. ANALIZA PRIPREME LINEARNOG NIZA FOTODETEKTORA KOD PSEUDOSLUČAJNIH ABSOLUTNIH ENKODERA

Optički modul Toshiba TCD1254GFG sa 2500 foto elemenata može raditi na frekvencijama od -4 MHz, vreme jednog očitavanja svih piksela senzora je 10 ms. Vrednost napona napajanja senzorskog modula iznosi 4 V.

Analiziraće se primena prethodno opisanog senzora, linearnog niza fotodetektora, za očitavanje pseudoslučajnog koda različite rezolucije. Najpre se senzor koristi za očitavanje 16-bitnog pseudoslučajnog koda, pri čemu se svaki bit očitava sa 8 fotodetektora (piksela), slika 3a. Za očitavanje ovog koda iz senzora bi se koristio sledeći broj piksela

$$16 \text{ bita} \times 8 \text{ piksela} = 128 \text{ piksela}$$

Zatim, ako se koristi za očitavanje 8-bitnog pseudoslučajnog koda, pri čemu se svaki bit očitava sa 64 piksela, broj upotrebljenih piksela iz senzora iznosi, slika 4b:

$$8 \text{ bita} \times 64 \text{ piksela} = 512 \text{ piksela}$$

Potreban prečnik diska enkodera koji bi bio odgovarajući za očitavanje pseudoslučajnog koda definisane rezolucije prethodno predstavljеним senzorom bi bio:

a) za slučaj 16-bitnog koda dužine $2^{16} - 1 = 65535$ bita

$$5.25 \mu\text{m} \times 8 \text{ piksela} \times 65535 \text{ bita} = 2 r_{16} \pi$$

$$2 r_{16} = 876.582 \text{ mm}$$

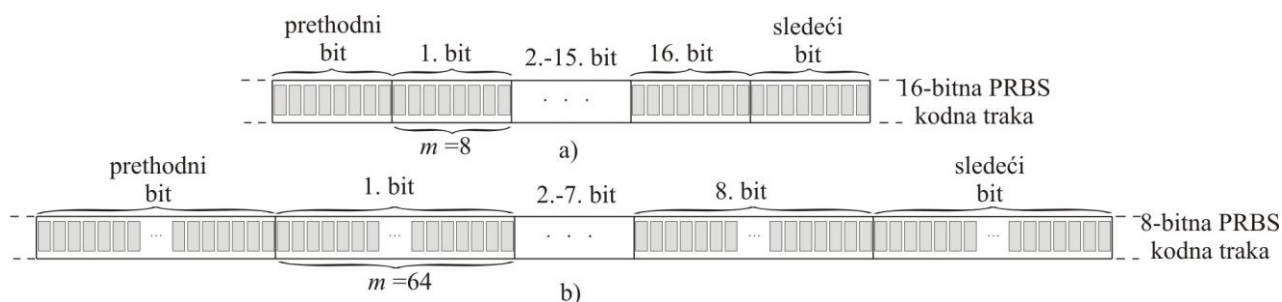
Može se uočiti da je prečnik diska suviše veliki za praktičnu primenu.

b) za slučaj 8-bitnog koda dužine $2^8 - 1 = 255$ bita

$$5.25 \mu\text{m} \times 64 \text{ piksela} \times 255 \text{ bits} = 2 r_8 \pi$$

$$2 r_8 = 27.286 \text{ mm}$$

Sada je prečnik diska enkodera pogodan za praktičnu primenu.

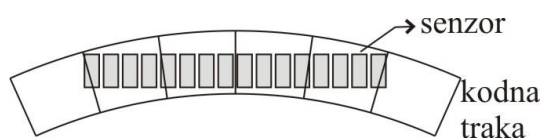


Slika 3. Paralelno očitavanje pseudoslučajnih kodova različite rezolucije

Može se zaključiti da je sa povećanjem rezolucije pseudoslučajnog koda potreban veći prečnik diska enkodera, potrebno je naći kompromisno rešenje između broja fotodetektora koji će se koristiti za očitavanje jednog bita i rezolucije pseudoslučajnog koda.

Princip merenja ugaone pozicije kod ovako projektovanih pseudoslučajnih absolutnih enkodera je baziran na određivanju grube pozicije koja ima istu rezoluciju kao pseudoslučajna binarna sekvenca, kao i na povećanju rezolucije merenjem fine pozicije na osnovu očitavanja istog bita pseudoslučajnog koda sa m susednih fotodetektora. Definiše se kodna reč koja predstavlja nultu poziciju enkodera prilikom njegovog montiranja na osovinu motora. Očitava se izlaz senzora, linearnog niza fotodetektora, ukoliko se dobije ista sekvenca nula i jedinica, ponavlja se očitavanje zato što nije bilo kretanja. Zatim se vrši detekcija redoslednih brojeva fotodetektora koji definišu prelaze između nizova nula i jedinica. Broj fotodetektora m linearnog niza fotodetektora kojim se očitava jedan bit pseudoslučajnog koda je definisan prilikom projektovanja enkodera. Broj očitanih uzastopnih nula ili jedinica po jednom bitu koda na izlazu senzora će varirati u industrijskim uslovima rada enkodera od definisanog broja. Analizom sekvence nula i jedinica u izlaznom signalu, na osnovu redoslednih brojeva, definišu se granice bita i određuje se fina pozicija. Ako nema skoka fine pozicije od vrednosti 0 do vrednosti $(m-1)$ i obrnuto, daje se informacija o tekućoj poziciji. Kada se javi skok fine pozicije određuje se smer rotacije i rekonstruiše se kodna reč, a zatim se konvertuje iz pseudoslučajnog u prirodni kod. Očitavanje jednog bita pseudoslučajne binarne sekvence sa m fotodetektora je iskorišćen za povećanje rezolucije merenja ugaone pozicije u odnosu na samu rezoluciju pseudoslučajne binarne sekvence.

Pseudoslučajni absolutni enkoder je složena opto-elektromehanička komponenta koja je u industriji pod različitim spoljašnjim negativnim uticajima. Neki od izvora grešaka su ekscentricitet i eliptičnost diska enkodera, zaprljanje kodne trake, neprecizno odštampana kodna traka, vibracije, temperatura, itd. Zakrivljenje kodne trake i nejednako osvetljenje fotodetektora na ivicama kodnih bitova može takođe doprineti greškama očitavanja koda, slika 4.



Sl. 4. Izvor greške očitavanja koda

IV. PROVERA ISPRAVNOSTI PSEUDOSLUČAJNOG KODA DISKA POZICIONOG ENKODERA

Fizička realizacija diska pozicionog enkodera podrazumeva niz postupaka pri kojima je moguće uneti greške, koje dalje mogu dovesti do nefunkcionalnosti krajnjeg uređaja. Greške mogu biti unete u fazi iscrtaavanja pseudoslučajnih traka u softveru za generisanje grafičkih prikaza, ali i u fazama

fizičke izrade diska.

Prilikom izrade crteža, pseudoslučajna sekvenca bitova se interpretira tamnim (neprozirnim) (logička nula) i svetlim (prozirnim) (logička jedinica) poljima. S obzirom na to da pseudoslučajna sekvenca može imati veliku dužinu (npr. 1024, što odgovara rezoluciji od 10 bita), i da operater manuelno popunjava predviđena polja, postoji velika mogućnost pogrešnog unosa vrednosti bita. Ne postoji mogućnost automatskog (programiranog) iscrtaavanja pseudoslučajnih sekvenci "nula" i "jedinica" u *vector graphics* formatu. Eventualna greška u ovoj fazi, koja bi bez provere bila otkrivena tek nakon ugradnje diska u uređaj, dovela bi do nepotrebnih troškova izrade diska kao i gubitka vremena. Kako postoji velika verovatnoća pojave greške u ovoj fazi izrade diska, neophodno je izvršiti pouzdanu proveru njegove ispravnosti.

Faza fizičke izrade diska podrazumeva niz aktivnosti kao što su izrada filma, fotolitografiju i ecovanje. Izrada filma se vrši tehnologijom koja poržava rezoluciju od 60 μm . U fotolitografskom postupku nejasne konture tamnih i svetlih polja, mogu nastati u slučaju nepravilnog postavljanja folije filma sa crtežom kodnih traka na pločicu diska (potrebno je da strana filma na kojoj je štampa bude uz površinu pločice pri osvetljavanju UV zracima kako ne bi došlo do rasipanja UV zraka na ivicama tamnih polja i pojave nejasnih kontura na samom disku). Nakon fotolitografije vrši se ecovanje. Usled nepreciznosti ovih postupaka može doći do promene dimenzija tamnih i svetlih polja, gubitka oštine ivica polja, kao i njihovog pomeranja, usled čega kasnije pri korišćenju diska može doći do očitavanja pogrešne informacije. Zato se predlaže pouzdana provera ispravnosti diska i nakon ove faze.

Disk 10-bitnog ($n = 10$) pseudoslučajnog enkodera sadrži 3 koncentrične trake, slika 5. Spoljna traka je inkrementalna traka dužine $2^{n+1} = 2048$ bita (naizmenično poredanih "nula" i "jedinica"). Dve unutrašnje trake su pseudoslučajne trake dužine $2^n = 1024$ bita.



Sl. 5. Izgled dela diska pseudoslučajnog pozicionog enkodera

Za pouzdanu proveru ispravnosti iscrtaanih pseudoslučajnih traka iskorišćena je mogućnost da se slika tj. fajl u *bitmap* formatu, u programu MATLAB [12] može jednoznačno predstaviti matricom čiji elementi nose informaciju o

pikselima slike. Dimenzije matrice odgovaraju dimenzijama slike izražene u broju piksela. *Bitmap* fajl mora biti pripremljen u *grayscale* modu, što za posledicu ima predstavljanje piksela, tj. elemenata matrice, celim brojevima u opsegu [0, 255]. Elementi matrice (slike) mogu biti predstavljeni samo vrednostima 0 i 1, ali zbog vizuelizacije potreban je i "sivi" piksel, odnosno, zadržan je dati opseg. Vrednošću 0 predstavlja se potpuno crni piksel, vrednošću 255 predstavlja se potpuno beli piksel, dok se vrednošću 128 predstavlja sivi piksel.

Potrebno je poznavati koordinate centra diska enkodera (X_0, Y_0), kao i poluprečnike koncentričnih kružnica kojima su ograničene kodne trake. Predviđeno je inicijalno softversko određivanje ovih parametara.

Analiza *bitmap* fajla crteža kodnih traka, predstavljenih matricom na prethodno opisani način, vrši se očitavanjem vrednosti piksela po kružnoj putanji određenog poluprečnika sa centrom u (X_0, Y_0). S tim u vezi, analiza se svodi na ispitivanje elemenata matrice primenom polarnih koordinata (r, φ). Ceo krug (360°) se deli na $P=100 \cdot 2^{n+1}$ ravnomerno raspoređenih tačaka sa polarnim koordinatama (r, φ_i) $i=1, \dots, P$. Zatim se polarne koordinate transformišu u Dekartove koordinate (x_i, y_i) u kojima se ispituje vrednost elementa matrice. Može se uočiti da je za rezoluciju uzorkovanja uzet ugao koji je 100 puta manji od ugla koji na disku zauzima „bit“ sa najmanjom ugaonom širinom (u ovom slučaju „bit“ na inkrementalnoj traci). Ovako određena rezolucija uzorkovanja obezbeđuje pouzdanu detekciju prelaza između bitova na inkrementalnoj traci.

Na slici 5. prikazan je detalj traka enkodera. Pri detektovanom prelazu kod inkrementalne trake, za isti ugao na kome je detektovan prelaz φ_i očitava se piksel - element matrice na polupečnicima koji odgovaraju sredinama pseudoslučajnih traka. Očitani pikseli svih traka su na slici 5. predstavljeni sivom bojom. U zavisnosti od vrednosti elementa matrice ustanovljava se da li bit pseudoslučajne trake nosi informaciju o logičkoj nuli ili logičkoj jedinici. Ove vrednosti se pamte u posebnim nizovima u programu. Nakon očitavanja svih bitova pseudoslučajnih traka, sadržaj ovih nizova se poredi sa tačnim pseudoslučajnim kodom koji se učitava preko ulaznog fajla i određuje da li postoji greška u njenoj poziciji.

IV. ZAKLJUČAK

U radu se predlaže očitavanje pseudoslučajnog binarnog koda primenom optičkog modula sa integrisanim nizom fotodetektora primenom metode paralelnog očitavanja koda. Razmatrana su ograničenja prilikom primene senzora TCD1254GFG kompanije Toshiba za očitavanje pseudoslučajnog koda kod optičkog obrtnog pseudoslučajnog enkodera. Analizirani su parametri kao što su prečnik diska i rezolucija enkodera u cilju nalaženja kompromisnog rešenja. Istaknuti su i neki od izvora grešaka u samoj realizaciji enkodera. Dat je i postupak provere ispravnosti projektovanja i iscertavanja pseudoslučajnih kodnih traka na tehničkom

crtežu kao i provera samog diska nakon izrade pre same ugradnje. U cilju daljeg razvoja predloženog rešenja potrebno je ispitati mogućnost primene drugih softverskih paketa koji bi doveli do ovakvih rezultata.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. (Ugovor o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2022. godini, evidencioni broj 451-03-68/2022-14/200102).

LITERATURA

- [1] M. Arsić, D. Denić, "New pseudorandom code reading method applied to position encoders", *Electronics Letters*, vol.29, pp. 893-894, 1993.
- [2] D. Denić, G. Miljković, "Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders", *Sensors and Actuators A-Phys.* vol. 150, pp. 188-191, 2009.
- [3] D. Denić, I. Stojković, "Pseudorandom/natural code converter with parallel feedback logic configuration", *Electronics Letters*, vol. 46, pp. 921-922, 2010.
- [4] J.T.M. Stevenson and J.R. Jordan, "Absolute position measurement using optical detection of code patterns", *J. Phys E. Sci. Instrum.* 21, pp. 1140-1145, 1988.
- [5] H. Khalfallah, E.M. Petriu, F.C.A. Groen, "Visual position recovery for an automated guided vehicle", *IEEE Trans. Instrument and Measurement*, vol. 41, no. 6, pp. 906-910, 1992.
- [6] D. Denić, I. Randelović, M. Rančić: "High-resolution pseudorandom encoder with parallel code reading", *Electronics and electrical engineering* Nr 7(56), Kaunas, Litvania, pp. 9-14, 2004.
- [7] www.ichaus.com
- [8] www.hamamatsu.com
- [9] www.sensorsinc.com
- [10] www.taosinc.com
- [11] www.toshiba.com
- [12] www.mathworks.com

ABSTRACT

Accurately and reliable measurement of angular position is a requirement of many modern moveable systems in industry and other fields. Pseudorandom optical absolute encoders offer good resolution as well as reliability and flexibility in operation. The paper analyses the application the linear array of photodetectors for parallel pseudorandom code reading to obtain a true absolute encoder, which, unlike the classical one, has one code track regardless of resolution. The characteristics of the applied sensor are considered, as well as the limitations of its application for pseudorandom code reading. In order to avoid errors when designing the encoder disk, a method of its verification after design based on image processing is proposed. Also, it is possible to check the quality of the disk after its realization.

Application of linear array of photodetectors in optical pseudorandom position encoders

Ivana Randelović, Dragan Denić, Goran Miljković i Aleksandar Jocić

Ponovljivost rezultata merenja nivoa električnog polja EM smetnji

Aleksandar M. Kovačević, Nenad Munić

Apstrakt—Ponovljivost rezultata merenja nivoa električnog polja EM smetnji, tokom vremena, na jednom uređaju informacione tehnologije, treba da omogući donošenje konačne odluke o usaglašenosti uređaja. Istovremeno, ponovljivost rezultata navedenih merenja treba da omogući akreditovanoj laboratoriji da preispita svoje rezultate ispitivanja radi obezbeđenja njihove validnosti.

Ključne reči—Validnost; ponovljivost; merenje; električno polje smetnji.

I. UVOD

ELEKTRONSKA oprema se danas smatra kritičnim projektnim elementom sredstava i sistema naoružanja i vojne opreme (NVO). Pri tome, savremene telekomunikacione uređaje karakteriše s jedne strane velika snaga ultraširokopojasnih predajnika, a sa druge strane osetljivost prijemnika [1]. Pored toga, tome doprinosi i veoma brz razvoj informatičke tehnike, tako da postaje sasvim jasno da ispravan rad svakog uređaja ponaosob i svih zajedno nije moguć bez analize međusobnih elektromagnetskih uticaja.

U Tehničkom opitnom centru [2], specijalizovanoj vojnoj naučnoistraživačkoj ustanovi, u okviru Odeljenja za elektromagnetsku kompatibilnost i uticaje okoline, već više decenija se obavljaju ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti (EMC) sredstava i sistema NVO prema standardima posebne namene (Standardi odbrane Republike Srbije – SORS) [3-5]. Takođe, za potrebe ispitivanja se koriste i drugi vojni standardi od kojih je najpoznatiji MIL-STD-461 [6].

Pored toga, Odeljenje za elektromagnetsku kompatibilnost i uticaje okoline je akreditovano u oblasti ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti (u daljem tekstu Odeljenje za EMC i uticaje okoline), pa je u obavezi da u sklopu obezbeđenja validnosti rezultata ispitivanja redovno vrši sledeće aktivnosti: funkcionalnu proveru merne opreme i opreme za ispitivanje, međuprovere ključne merne opreme, ponavljanje ispitivanja korišćenjem istih metoda i sl. [7].

Veliki broj ponavljanja ispitivanja karakteristika EMC nije uvek moguć, ali u nekim situacijama može biti opravdan (npr. kada se izmerena vrednost menja i po frekvenciji i po

amplitudi), jer se nakon navedenih ispitivanja treba da donese odluka o usaglašenosti uređaja [8].

U ovom radu je prikazano ponavljanje merenja nivoa električnog polja EM smetnji na jednom sredstvu NVO (uređaj informacione tehnologije), tokom vremena, radi donošenja konačne odluke o usaglašenosti uređaja (usvajanje uređaja u naoružanje Vojske). Istovremeno, navedeno ponavljanje je omogućilo akreditovanoj laboratoriji da preispita rezultate svojih ispitivanja radi njihove validnosti [7]. Merenja nivoa električnog polja EM smetnji su obavljena na jednom uređaju informacione tehnologije (u daljem tekstu IT uređaj) prema standardima SORS 1029/89 i SORS 1762/89 [3, 4].

II. USLOVI ISPITIVANJA

Merenja nivoa električnog polja EM smetnji su obavljena na jednom IT uređaju prema standardima [3, 4]. IT uređaj predstavlja laptop računar i robustan (eng. rugged) AC/DC adapter za napajanje iz izvora naizmenične struje.

Ispitivanje je izvršeno u opsegu od 30 MHz do 300 MHz, sa odgovarajućom prijemnom antenom (bikonusna antena), koja je postavljena na rastojanje 1 m od IT uređaja, na visini 1,2 m od poda Faradejevog kaveza. IT uređaj je postavljen na sto, visine 80 cm, i priključen AC/DC adapterom, preko ekvivalentne mreže i razdvojnog transformatora, na mrežu za napajanje. Pri tome, drveni sto je bio dimenzija: dužina 1 m, širina 1 m i visina 0,8 m, na kome se nalazi referentna provodna ploča (od bakra), dužine 2,6 m i širine 1 m (površina ploče 2,6 m²), pri čemu je ploča savijena pod pravim uglovima na dva mesta (Sl. 1).



Sl. 1. Ispitivanje nivoa električnog polja EM smetnji.

Aleksandar M. Kovačević – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: aleksandar.kovacevic@ftn.kg.ac.rs). Nenad Munić – Tehnički opitni centar, Generalštab Vojske Srbije, Vojvode Stepe 445, 11000 Beograd, Srbija (e-mail: nenadmunic@yahoo.com).

Robustni adapter i kabl su odvojeni od provodne površine izolacionom podlogom dimenzija 1,8 m x 0,5 m, debljine 3 cm, koja je postavljena iza uređaja na rastojanju od 15 cm. Rastojanje između ekvivalentne mreže i IT uređaja je iznosilo 60 cm. Na uređaju je emitovano više paralelnih multimedijalnih sadržaja.

Pre početka merenja nivoa električnog polja EM smetnji izvršena je kontrola smetnji okoline kada je IT uređaj isključen (nivo smetnji ambijenta).

Merenje električnog polja EM smetnji vrši se tako što se mernim prijemnikom (meračem polja) pretraži zadati frekvencijski opseg, i merenje obavi na najmanje 3 frekvencije po oktavi na kojima je nivo EM smetnji najveći. Pri tome, beleži se najveća vrednost električnog napona. Pored toga, merenja treba obaviti i na kritičnim frekvencijama za ispitivano sredstvo (npr. frekvencija lokalnog oscilatora, međufrekvencija itd.) [4]. U ovom slučaju, korišćen je vršni – Pk (eng. Peak) detektor analizatora spektra.

Za navedena merenja korišćena su sledeća merna sredstva i oprema:

- EMC analizator spektra E7402A, Agilent, od 100 Hz do 3 GHz;
- Bikonusna antena SAS-542, A.H. Systems, od 20 MHz do 330 MHz;
- Ekvivalentna V-mreža ENV216, R&S;
- Stoni računar ASUS sa aplikacijom za automatizaciju merenja (EMC Measurement Application E7415A);
- RF limiter 11867A, Agilent;
- Razdvojni transformator MA 4801, ISKRA;
- Kabl RG-214/U.

Pre početka ispitivanja je konstatovano da je navedena merna oprema metrološki ispravna jer ima prihvatljivu metrološku sledivost, koju prate dokumenta o pregledu, odnosno isprave o usaglašenosti merne opreme sa propisanim zahtevima, a u skladu sa Pravilnikom o metrološkoj delatnosti u oblasti odbrane [9].

Uslovi okoline:

- temperatura okoline: $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,
- relativna vlažnost vazduha: $50\% \pm 15\%$.

III. KRITERIJUM ZA OCENU REZULTATA MERENJA

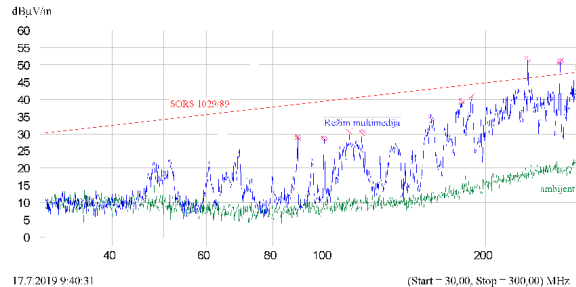
Nivo električnog polja EM smetnji u zadatom frekvencijskom opsegu treba da bude manji od graničnih vrednosti [3]. S obzirom da IT uređaj nije ispunio zahteve standarda u frekvencijskom opsegu od 30 MHz do 300 MHz, nakon nekoliko meseci je izvršeno ponavljanje merenja na istom uređaju. Naime, ponavljanje merenja nivoa električnog polja EM smetnji na istom IT uređaju, trebalo je da omogućiti donošenje konačne odluke o usaglašenosti uređaja (usvajanje uređaja u naoružanje Vojske).

Pri tome, razmatrane su one frekvencije na kojima je nivo električnog polja EM smetnji bio iznad graničnih vrednosti. Kao kriterijum za ocenu rezultata merenja je uzeto da razlika u dobijenim vrednostima između ta dva merenja bude u granicama merne nesigurnosti U_m – proširena merna

nesigurnost merenja nivoa električnog polja EM smetnji (za faktor proširenja ili prekrivanja $k = 2$).

IV. REZULTATI MERENJA

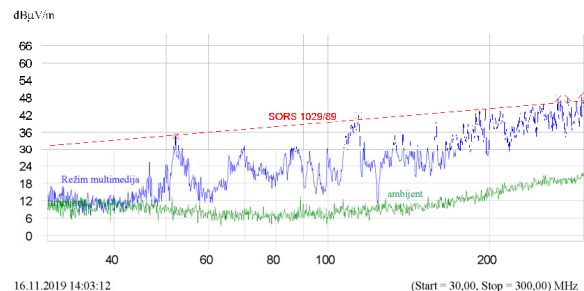
Grafički prikaz rezultata merenja nivoa električnog polja EM smetnji (rezultati I) je dat na Sl. 2.



Sl. 2. Grafički prikaz rezultata merenja nivoa električnog polja EM smetnji (rezultati I).

Na osnovu Sl. 2 može se konstatovati da IT uređaj, u režimu multimedija, generiše električno polje EM smetnji iznad dozvoljene granične vrednosti [3], i to na 3 frekvencije: 255 MHz, 272 MHz i 298 MHz. Pri tome, maksimalno premašenje iznosi 5 dB (na frekvenciji od 255 MHz).

Nakon nekoliko meseci, izvršeno je ponavljanje merenja na istom uređaju u frekvencijskom opsegu od 30 MHz do 300 MHz. Grafički prikaz rezultata merenja nivoa električnog polja EM smetnji (rezultati II) je dat na Sl. 3.



Sl. 3. Grafički prikaz rezultata merenja nivoa električnog polja EM smetnji (rezultati II).

Na osnovu Sl. 3 može se konstatovati da IT uređaj, u režimu multimedija, generiše električno polje EM smetnji iznad dozvoljene granične vrednosti [3], i to na 5 frekvencija: 55 MHz, 120 MHz, 260 MHz, 270 MHz i 295 MHz. Pri tome, maksimalno premašenje iznosi 2 dB (na frekvenciji od 295 MHz).

Proširena merna nesigurnost, U_m , za merenje nivoa električnog polja EM smetnji ($k = 2$), kada se za merenje koristi bikonusna antena, iznosi 5,3 dB i u skladu je sa preporukama standarda CISPR 16-4-2:2018 [10]. Pri tome, obračun merne nesigurnosti za električno polje EM smetnji

dat je detaljno u internoj Proceduri za određivanje merne nesigurnosti kod ispitivanja EMC [11].

Na osnovu dobijenih rezultata (Sl.2 i Sl.3) i postavljenog kriterijuma, konstatovana je ponovljivost rezultata ispitivanja, odnosno ponovljivost smetnji na približno istim frekvencijama. Razlog manjih odstupanja, može biti razlika u napunjenosti baterije IT uređaja, odnosno struji punjenja u trenutku ispitivanja. Pored toga, utvrđeno je da je razlika u dobijenim vrednostima u granicama merne nesigurnosti, tako da je obezbeđena validnost rezultata merenja.

V. ZAKLJUČAK

U Tehničkom opitnom centru, specijalizovanoj vojnoj naučnoistraživačkoj ustanovi, u okviru Odeljenja za elektromagnetsku kompatibilnost i uticaje okoline, već više decenija se obavljaju ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti (EMC) sredstava i sistema NVO prema standardima posebne namene (SORS).

Kako je Odeljenje za EMC i uticaje okoline akreditovano u oblasti ispitivanja elektromagnetske kompatibilnosti, u obavezi je da u sklopu obezbeđenja validnosti rezultata ispitivanja redovno vrši funkcionalnu proveru merne opreme i opreme za ispitivanje, međuprovere ključne merne opreme, ponavljanje ispitivanja korišćenjem istih metoda i sl.

U ovom radu je prikazano ponavljanje merenja nivoa električnog polja EM smetnji, u frekvencijskom opsegu od 30 MHz do 300 MHz, na jednom IT uređaju (sredstvo vojne opreme), tokom vremena, radi donošenja konačne odluke o usaglašenosti uređaja (usvajanje uređaja u naoružanje Vojske). Pri tome, navedeno ponavljanje je omogućilo akreditovanoj laboratoriji da preispita rezultate svojih ispitivanja radi njihove validnosti.

Na osnovu dobijenih rezultata, konstatovana je ponovljivost rezultata ispitivanja na približno istim frekvencijama. Razlog manjih odstupanja, može biti razlika u napunjenosti baterije IT uređaja, odnosno struji punjenja u trenutku ispitivanja. Pored toga, utvrđeno je da je razlika u dobijenim vrednostima

u granicama merne nesigurnosti, tako da je obezbeđena validnost rezultata merenja.

LITERATURA

- [1] C.R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, second ed., Wiley, New York, 2006.
- [2] <http://www.toc.vs.rs>.
- [3] *Elektromagnetske smetnje, ZAHTEVI*, SORS 1029/89, Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA, 1989.
- [4] *Elektromagnetske smetnje, MERENJA*, SORS 1762/89, Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA, 1989.
- [5] *Elektromagnetska kompatibilnost*, SORS 4077/89, Biro za standardizaciju i metrologiju u JNA, 1989.
- [6] *Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment*, MIL-STD-461F, Department of Defense, USA, 2007.
- [7] *Opšti zahtevi za kompetentnost laboratorija za ispitivanje i laboratorija za etaloniranje*, SRPS ISO/IEC 17025, ISS, 2017.
- [8] A. Kovačević, V. Jokić, P. Osmokrović, "Utvrđivanje usaglašenosti pri merenju smetnji provođenja kada meri prijemnik pokazuje promenljive vrednosti koje su bliske granici", Zbornik radova 55. konferencije ETRAN-a, Banja Vrućica, Teslić, str. ML1.1-1-4, 6-9.06.2011.
- [9] *Pravilnik o metrološkoj delatnosti u oblasti odbrane*, Službeni vojni list br. 19, Ministarstvo odbrane Republike Srbije, 2018.
- [10] *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – part 4-2: Uncertainties, statistics and limit modeling – Measurement instrumentation uncertainty*, CISPR 16-4-2, IEC, 2018.
- [11] *Procedura za određivanje merne nesigurnosti kod ispitivanja EMC*, Interni dokument, TOC, 2018.

ABSTRACT

The repeatability of EM interference electric field level measurement results, over time, on an information technology device, should enable a final decision on the conformity of the device. At the same time, the repeatability of the results of these measurements should allow the accredited laboratory to review its test results to ensure their validity.

Repeatability of EM interference electric field level measurement results

Aleksandar M. Kovačević, Nenad Munić

Pregled elektrogastrografske metode

Jelena Đorđević Kozarov, Platon Sovilj, *Member, IEEE*, Marjan Urekar, *Member, IEEE*,
Milan Šaš i Miroljub Pešić

Apstrakt — Elektrogastrografija (EGG) je neinvazivna elektrofiziološka tehnika koja se koristi za snimanje električne aktivnosti želuca pomoću elektroda postavljenih na abdomen. EGG se do sada najviše koristio u kliničkim studijama i dijagnostici u gastroenterologiji, ali se sve više javlja interesovanje za naučno istraživanje EGG metode u oblasti biomedicine i psihofiziologije. Cilj ovog rada je da se, na osnovu postojeće literature, prikažu osnovne fiziološke karakteristike EGG signala, kao i mogući načini snimanja i obrade ovih signala.

Ključne reči — Elektrogastrografija; Gastrični spori talasi; Gastrointestinalni motilitet; Mioelektričnost.

I. UVOD

ELEKTROGASTROGRAFIJA je neinvazivna tehnika za snimanje mioelektrične aktivnosti želuca pomoću površinskih elektroda postavljenih na abdominalnu kožu u predelu želuca. Signal snimljen elektrogastrografijom naziva se elektrogastrogram (EGG) [1-5]. Tokom prve polovine dvadesetog veka, elektrogastrogram (EGG) su nezavisno otkrila tri naučnika: Valter Alvarez (gastroenterolog, 1922) [6,7], Harison Tumpeer (pedijatar, 1926, 1932) [7-9] i R.C. Davis (psihofiziolog, 1950) [10,11]. Počevši od 1974. godine, kada su istraživači Stevens i Vorrall (1974) prvi primenili tehniku spektralne analize na EGG [12], a potom 1975. istraživači u Engleskoj objavili brojne studije o frekvencijskoj analizi EGG signala, došlo je do velikog napretka u tehnikama analize EGG signala [13-15].

Zbog svoje neinvazivne prirode i sve većeg napretka tehnike snimanja EGG-a, kao i moguće računarske analize snimljenog signala, EGG je postao veoma atraktivan alat za proučavanje elektrofiziologije želuca i patofiziologije poremećaja motiliteta želuca, pa se trenutno koristi i u naučnim i u kliničkim istraživanjima [16-19].

Da bi se procenilo da li je EGG signal koristan kao istraživačko i/ili kliničko sredstvo, najpre treba u potpunosti razumeti šta se može meriti pomoću EGG-a i kako bi EGG trebalo da bude snimljen, interpretiran i analiziran. U tu svrhu, u ovom radu je najpre opisana elektrofiziologija želuca, odnosno mioelektrična aktivnost želuca koja se može meriti korišćenjem površinskih elektroda, a potom su opisani i karakteristični parametri EGG signala. S obzirom da se za

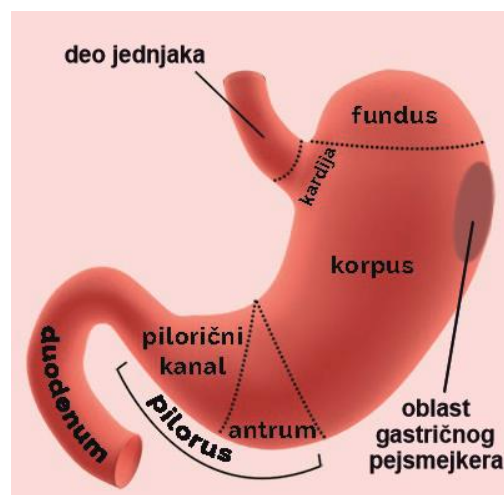
snimanje EGG signala koriste površinske elektrode, EGG signal je osetljiv na artefakte pokreta, kao i na električne signale drugih unutrašnjih organa, te su u ovom radu opisani tehnički detalji pravilnog merenja EGG signala u cilju sprečavanja artefakata. Na kraju rada je dat pregled primene EGG-a, uključujući primenu EGG-a za proučavanje elektrofiziologije želuca, upotrebu EGG-a u proceni efekta intervencije i klinički značaj EGG-a kod pacijenata sa simptomima koji ukazuju na želudačnu disfunkciju.

II. ELEKTROFIZIOLOGIJA ŽELUCA

EGG se definiše kao snimanje mioelektrične aktivnosti glatkih mišića želuca pomoću elektroda pričvršćenih na kožu abdomena. EGG predstavlja bezbolan test kojim se određuje električna aktivnost u stomaku, pre, tokom i posle jela.

Radi lakšeg razumevanja rada želuca, na Sl. 1 su prikazani njegovi delovi:

- fundus je rezervoar za hranu,
- korpus - proizvodi se enzim pepsin,
- gastrični pejsmejker se nalazi na velikoj krivini korpusa i generiše električne impulse,
- antrum - proizvodi se hormon gastrin i tu se vrši mešanje i mlevenje hrane,
- pilorus je ventil između želuca i dvanaestopalačnog creva.



Sl. 1. Delovi želuca.

Gastrični pejsmejker generiše električni signal svakih 20 s, koji se širi ka antrumu, i kao odgovor na kalorijski izazov ili lek, stvara snažne peristaltičke kontrakcije koje guraju antralni sadržaj ka pilorusu i pomažu u mlevenju i mešanju hrane.

Jelena Đorđević Kozarov – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, A. Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: kozarov@elfak.ni.ac.rs).

Platon Sovilj – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: platon@uns.ac.rs).

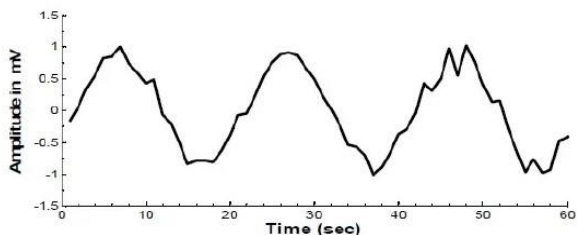
Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

Milan Šaš – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: milansas@uns.ac.rs).

Miroljub Pešić – Elektronski fakultet, Univerzitet u Nišu, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija (e-mail: miroljub.pesic@elfak.ni.ac.rs)

A. Normalna mioelektrična aktivnost želuca

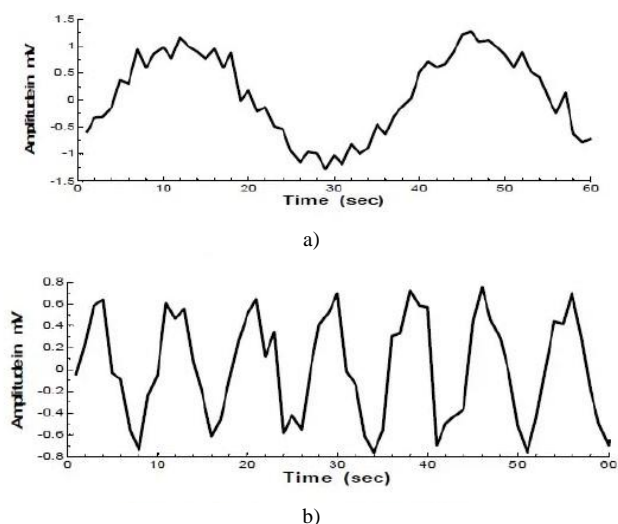
Mioelektrična aktivnost želuca sastoji se od sporih talasa i šiljastih (spajk) potencijala (Sl. 2) [3]. Spori talas se još naziva i aktivnost električne kontrole, dok se šiljasti potencijali nazivaju akcioni potencijali [20,21]. Frekvencija normalnih sporih talasa u želucu iznosi približno 3 ciklusa u minuti (cpm) kod ljudi [22-24] i 5 cpm kod pasa [25,26], dok je amplituda od $50 \mu\text{V}$ do $500 \mu\text{V}$. Gastrični spori talas određuje maksimalnu frekvenciju i propagaciju želudačnih kontrakcija. Šiljasti potencijali se smatraju električnim parom želudačnih kontrakcija, odnosno kontrakcija želuca nastaje kada je spori talas praćen šiljastim potencijalima.



Sl. 2. Normalna mioelektrična aktivnost želuca.

B. Gastrična aritmija i abnormalni spori talasi

Mioelektrična aktivnost želuca može se promeniti ili postati abnormalna u bolesnim stanjima ili nakon operativnih zahvata ili spontano. Abnormalna mioelektrična aktivnost želuca uključuje želudačnu aritmiju, abnormalno sporo širenje talasa (bradigastrija) i abnormalno povećanje brzine električne aktivnosti (tahigastrija). Normalna frekvencija gastričnog sporog talasa kod ljudi je oko 2-4 cpm, dok je bradigastrija u opsegu 0.5-2.0 cpm, a tahigastrija u opsegu 4-9 cpm. Ukoliko se dominantna frekvencija ne može odrediti, u pitanju je želudačna aritmija. Bradigastrija i tahigastrija mogu biti povezani sa mučninom, gastroparezom, sindromom iritabilnog creva.



Sl. 3. Abnormalna mioelektrična aktivnost želuca: a) bradigastrija, b) tahigastrija.

III. MERENJE ELEKTROGASTROGRAMA

Mioelektrična aktivnost želuca se može meriti:

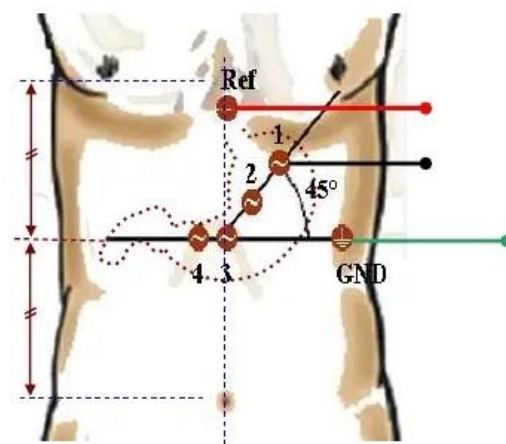
- serozno (elektrode na seroznoj površini želuca se postavljaju hirurški),
- intraluminalno (intubacija katetera sa elektrodama za snimanje želuca), ili
- na površini kože (pomoću površinskih elektroda).

Prve dve metode su invazivne i njihove primene su ograničene uglavnom na životinje i izvode se u laboratorijskim uslovima [1]. EGG metoda (merenje aktivnosti želuca pomoću površinskih elektroda) ima široku primenu kod ljudi i u kliničkim istraživanjima jer je neinvazivna i ne remeti tekuću aktivnost želuca. Brojne studije validacije su dokumentovale tačnost EGG metode upoređujući je sa snimkom dobijenim sa mukoznih i seroznih elektroda [15,1]. Pokazano je da se zapis EGG-a može ponoviti, bez značajnih dnevnih varijacija [27], a utvrđeno je i da kod odraslih, starost i pol nemaju nikakav uticaj na EGG [28,29].

Zbog prirode merenja, EGG je osetljiv na artefakte pokreta. Shodno tome, pažljiva i pravilna priprema pre snimanja je ključna za dobijanje pouzdanih podataka.

Priprema kože - S obzirom da su EGG signali veoma slabi, vrlo je važno minimizirati impedansu između kože i elektroda, pa je neophodno dobro očistiti abdominalnu površinu na koju će se postaviti elektrode. EGG može sadržati ozbiljne artefakte pokreta ako koža nije dobro pripremljena.

Postavljanje elektroda - Standardne elektrokardiografske elektrode se obično koriste za snimanje EGG. Iako ne postoji utvrđen standard, opšte je prihvaćeno da aktivne elektrode za snimanje treba da budu postavljene što bliže antrumu da bi se postigao visok odnos signal-šum [30]. EGG signali se mogu snimiti bilo unipolarnim ili bipolarnim elektrodama, ali bipolarno snimanje daje signale sa većim odnosom signal-šum. Jedna najčešće korišćena konfiguracija elektroda za snimanje četvorokanalnih EGG zapisa je prikazana na Sl. 4.



Sl. 4. Primer postavljanja elektroda za merenje EGG signala.

Pozicioniranje ispitanika - Ispitanik treba da bude u udobnom ležećem položaju ili da sedi u fotelji, u tihoj prostoriji, tokom čitave procedure snimanja. Kad god je to

moгуće, preporučuje se ležeci položaj, jer je ispitanik u ovom položaju opušteniji, a samim tim se pojavljuje manje artefakata pokreta. Ispitanik bi trebalo da ostane što je moguće mirniji i da ne učestvuje u razgovorima, kako bi se maksimalno sprečili artefakti pokreta [19,1].

Dužina snimanja i test obrok - Snimanje EGG-a se obično vrši nakon gladovanja od 6 ili više sati. Lekove koji mogu da modifikuju mioelektričnu aktivnost želuca treba prekinuti najmanje 48 sati pre testa [18,19]. EGG treba snimati najmanje 30 minuta (ne <15 min u svakom slučaju) u stanju gladovanja i najmanje 30 minuta u stanju jedenja. Test obrok treba da sadrži najmanje 250 kcal bez mnogo masti [31]. Obično se preporučuju čvrsti obroci, mada se u nekim istraživanjima koristila voda kao test obrok.

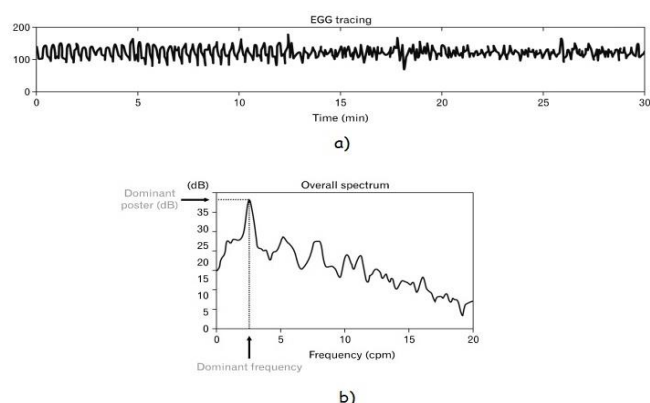
IV. PARAMETRI EGG

I pored toga što se eliminacija šuma iz EGG signala može postići pomoću naprednih tehnika obrade signala [1,32], analiza talasnog oblika EGG-a u vremenskom domenu se retko koristi. Talasni oblik EGG-a je povezan sa mnogim faktorima, kao što su debljina trbušnog zida ispitanika, priprema kože, položaj elektroda i karakteristike uređaja za snimanje [33].

Broj specifičnih karakteristika EGG-a je ograničen, pa se kod jednokanalnog snimanja EGG mogu meriti samo frekvencija i amplituda. Nedavne kompjuterske simulacije i eksperimenti pokazali su da se širenje gastričnog sporog talasa može identifikovati uz pomoć višekanalnih snimaka EGG [33], ali je teško dobiti ove informacije iz analize talasnog oblika u vremenskom domenu [32]. Shodno tome, kvantitativne analize podataka EGG-a se uglavnom zasnivaju na metodama spektralne analize.

Frekvencija za koju se veruje da je želudačnog porekla i na kojoj snaga u EGG spektru snage ima vršnu vrednost u opsegu od 0.5–9.0 cpm naziva se *EGG dominantna frekvencija*. *Dominantna snaga* je snaga na dominantnoj frekvenciji. Snaga EGG može biti predstavljena u linearnim jedinicama ili u decibelima (dB). Dominantna frekvencija i snaga EGG-a se često jednostavnije nazivaju kao EGG frekvencija i snaga EGG-a. Sl. 5 prikazuje definiciju dominantne frekvencije i snage EGG. Simultani kožni i serozni [9,13-15] ili mukozni [7,12] snimci aktivnosti želuca pokazali su da dominantna frekvencija EGG-a predstavlja frekvenciju sporog talasa želuca. Dominantna snaga EGG-a odražava amplitudu i pravilnost želudačnih sporih talasa.

Gastrični spori talas se smatra abnormalnim ako dominantna frekvencija EGG-a nije unutar određenog frekventnog opsega (npr. 2-4 cpm). Iako ne postoji utvrđena definicija normalnog opsega gastričnog sporog talasa, opšte je prihvaćeno da je dominantna frekvencija EGG-a kod asimptomatskih normalnih subjekata između 2 cpm i 4 cpm [17,18,22,34]. EGG, ili segment EGG-a, definiše se kao tahigastrija ako je njegova frekvencija > 4 cpm, ali < 9 cpm, bradigastrija ako je frekvencija < 2 cpm i aritmija ako postoji nedostatak dominantne frekvencije (videti Tabelu I).



Sl. 5. Analiza spectra EGG: a) Zapis EGG u trajanju od 30 minuta, b) Spekter snage 30-minutnih EGG podataka. Dominantna frekvencija EGG-a (DF) i snaga na DF se mogu odrediti iz spectra [3].

TABELA I
PARAMETRI EGG-A

	Komponenta	Frekvencija (cpm)
Signal	Normalni spori talas	2–4
	Bradigastrija	0.5–2
	Tahigastrija	4–9
Šum	Respiratorni	12–24
	Tanko crevo	9–12
	EKG	60–80
	Artefakti pokreta	Ceo interval merenja

V. PRIMENA EGG

EGG ima značajnu primenu u sledećim oblastima:

- (1) elektrofiziološke studije,
- (2) procena efikasnosti intervencije ili terapije, i
- (3) otkrivanje abnormalnosti sporog talasa kod pacijenata sa poremećajem želudačnog motiliteta ili sumnja na poremećaj motiliteta želuca.

Navešćemo neke od primena u pomenutim oblastima.

Elektrofiziološke studije - za proučavanje elektrofiziologije želuca jer je neinvazivna metoda i ne prekida tekući proces u želucu. Jedna od takvih primena je proučavanje razvojnog procesa želudačnih sporih talasa kod novorođenčadi [35]. Progresivno povećanje procenta normalnih gastričnih sporih talasa zabeleženo je tokom prvih 6 meseci nakon rođenja kod 19 nedonoščadi.

Procena efikasnosti intervencije ili terapije - Na spore talase u želucu mogu uticati različite intervencije, stres i farmakološke terapije. EGG se često koristi u proceni efekta stresa i efikasnosti farmakoloških terapija i intervencija.

Otkrivanje abnormalnosti sporog talasa - EGG se koristi kada se sumnja da pacijent ima poremećaj motiliteta, što se može pokazati kao ponavljajuća mučnina i povraćanje, a to su znaci da želudac ne prazni hranu normalno.

Klinička primena elektrogastrografije najšire je procenjivana kod bolesnika s gastroparezom i funkcionalnom dispepsijom.

VI. ZAKLJUČAK

EGG je neinvazivna procedura za pouzdano merenje sporih talasa u želucu i kontraktilne aktivnosti želuca. Iako je dosta osetljiva dijagnostička metoda, EGG predstavlja izuzetan uvid u funkcionisanje čovekovog gastrointestinalnog sistema.

Međutim, EGG pruža klinički, fiziološki i/ili patofiziološki značajne informacije samo kada se pravilno snima, analizira i tumači. Snimanje i analiza EGG-a još uvek nisu u potpunosti standardizovani. Kao što je u radu opisano, snimanje EGG-a treba izvoditi vrlo oprezno da bi se minimizirali mogući artefakti.

Budući razvoj EGG metodologije bi pre svega trebalo da se fokusira na definisanje i postavljanje preciznih standarda za snimanje i analizu karakterističnih parametara EGG-a, kako bi se omogućilo precizno dijagnostikovanje poremećaja motiliteta želuca.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

- [1] D. Z. Chen and Z. Lin, "Electrogastrogram," in *Encyclopedia of Medical Devices and Instrumentation*, Second edition, vol. 3, pp. 83–98, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [2] K. L. Koch, R. M. Stern, *Handbook of Electrogastrography*, Oxford University Press, New York, 2004.
- [3] J. Yin, J. D. Z. Chen, *Electrogastrography: Methodology, Validation and Applications*, J Neurogastroenterol Motil, vol. 19, no. 1, pp. 5-17, 2013.
- [4] F. Y. Chang, *Electrogastrography: Basic knowledge, recording, processing and its clinical applications*, J Gastroenterol Hepatol, vol. 20, pp. 502-516, 2005.
- [5] <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrogastrogram>.
- [6] W. C. Alvarez, *The electrogastrogram and what it shows*, JAMA, vol. 78, pp. 1116–1118, 1922.
- [7] R. M. Stern, *The history of EGG*, in Neurogastroenterologia, ch. 1, pp. 20–26, 2000.
- [8] I. H. Tumpeer, P. W. Blitzsten, *Registration of peristalsis by the Einthoven galvanometer*, Am J Dis Child, vol. 11, pp. 454–455, 1926.
- [9] I. H. Tumpeer, P. W. Blitzsten, *Hyperperistaltic electrographic effects*, Am J Med Sci, vol. 184, pp. 831-836, 1932.
- [10] R. C. Davis, L. Galafolo, F. P. Gault, *An exploration of abdominal potentials*, J Com Psysiol Psychol, vol. 50, pp. 519–523, 1957.
- [11] R. C. Davis, L. Galafolo, K. Kveim, *Conditions associated with gastrointestinal activity*, J Com Physiol Psychol, vol. 52, pp. 466–475, 1959.
- [12] L. K. Stevens, N. Worrall, *External recording of gastric activity: the electrogastrogram*, Physiol Psychol, vol. 2, pp. 175–180, 1974.
- [13] B. H. Brown, R. H. Smallwood, H. L. Duthie, C. J. Stoddard, *Intestinal smooth muscle electrical potentials recorded from surface electrodes*, Med Biol Eng Comput, vol. 13, pp. 97–102, 1975.
- [14] R. H. Smallwood, *Analysis of gastric electrical signals from surface electrodes using phase-lock techniques*, Med Biol Eng Comput, vol. 16, pp. 507–518, 1978.
- [15] D. A. Linkens, S. P. Datardina, *Estimations of frequencies of gastrointestinal electrical rhythms using autoregressive modeling*, Med Biol Eng Comput, vol. 16, pp. 262–268, 1978.
- [16] H. Geldof, E. J. Van Der Schree, *Electrogastrography: Clinical applications*, Scand J Gastroenterol, vol. 24 (Suppl. 171), pp. 75–82, 1989.
- [17] J. Z. Chen, R. W. McCallum, *Electrogastrography. Principles and Applications*, New York: Raven Press; 1994.
- [18] H. P. Parkman, W. L. Hasler, J. L. Barnett, E. Y. Eaker, *Electrogastrography: a document prepared by the gastric section of the American Motility Society Clinical GI Motility Testing Task Force*, Neurogastroenterol Motil, vol. 15, pp. 89–102, 2003.
- [19] M. Camilleri, W. Hasler, H. P. Parkman, E. M. M. Quigley, E. Soffer, *Measurement of gastroduodenal motility in the GI laboratory*, Gastroenterology, vol. 115, pp. 747–762, 1998.
- [20] S. K. Sarna, *Gastrointestinal electrical activity: terminology*, Gastroenterology, vol. 68, pp. 1631-1635, 1975.
- [21] K. A. Kelly, „Motility of the stomach and gastroduodenal junction“, in: *Physiology of the gastrointestinal tract*, ed. I. A. Johnson, pp.393-410, New York: Raven, 1981.
- [22] J. D. Chen, R. W. McCallum, *Clinical application of electrogastrography*, Am J Gastroenterol, vol. 88, pp. 1324-1336, 1993.
- [23] X. Lin, J. Z. Chen, *Abnormal gastric slow waves in patients with functional dyspepsia assessed by multichannel electrogastrography*, Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol, vol. 280, pp. G1370-G1375, 2001.
- [24] J. Yin, D. Levanon, J. D. Chen, *Inhibitory effects of stress on postprandial gastric myoelectrical activity and vagal tone in healthy subjects*, Neurogastroenterol Motil, vol. 16, pp. 737-744, 2004.
- [25] L. W. Qian, P. J. Pasricha, J. D. Chen, *Origin and patterns of spontaneous and drug-induced canine gastric myoelectrical dysrhythmias*, Dig Dis Sci, vol. 48, pp. 508-515, 2003.
- [26] H. Ouyang, J. Xing, J. D. Chen, *Tachygastria induced by gastric electrical stimulation is mediated via alpha- and beta-adrenergic pathway and inhibits antral motility in dogs*, Neurogastroenterol Motil, vol. 17, pp. 846-853, 2005.
- [27] G. Riezzo, F. Pezzolla, J. Thouvenot, et al, *Reproducibility of cutaneous recordings of electrogastrography in the fasting state in man*, Pathol Biol, vol. 40, pp. 889–894, 1992.
- [28] B. Pfaffenbach, R. J. Adamek, K. Kuhn, M. Wegneer, *Electrogastrography in health subjects: Evaluation of normal values, influence of age and gender*, Dig Dis Sci, vol. 40, pp. 1445–1450, 1995.
- [29] G. Riezzo, M. Chiloiro, V. Guerra, *Electrogastrography in health children: Evaluation of normal values, influence of age, gender and obesity*, Dig Dis Sci, vol. 43, pp. 1646–1651, 1998.
- [30] N. Mirizzi, U. Scafoglieri, *Optimal direction of the electrogastrographic signal in man*, Med Biol Eng Comput, vol. 21, pp. 385–389, 1983.
- [31] D. Levanon, M. Zhang, J. D. Z. Chen, *Efficiency and efficacy of the electrogastrogram*, Dig Dis Sci, vol. 43, no. 5, pp. 1023–1030, 1998.
- [32] J. Chen, *A computerized data analysis system for electrogastrogram*, Comput Biol Med, vol. 22, pp. 45–57, 1992.
- [33] J. Liang, J. D. Z. Chen, *What can be measured from surface electrogastrography?*, Dig Dis Sci, vol. 42, no. 7, pp. 1331–1343, 1997.
- [34] J. Chen, R. W. McCallum, *Gastric slow wave abnormalities in patients with gastroparesis*, Am J Gastroenterol, vol. 97, pp. 477–482, 1992.
- [35] R. H. Smallwood, „Gastrointestinal electrical activity from surface electrodes“, Ph.D. dissertation, Sheffield, UK.

ABSTRACT

Electrogastrography (EGG) is a non-invasive electrophysiological technique used to record the electrical activity of the stomach using electrodes placed on the abdomen. EGG has been mostly used in clinical studies and diagnostics in gastroenterology, but there is a growing interest in scientific research of EGG methods in the field of biomedicine and psychophysiology. The aim of this paper, based on the existing literature, is to present the basic physiological characteristics of EGG signals, as well as possible ways of recording and processing these signals.

Review of electrogastrographic method

Jelena Đorđević Kozarov, Platon Sovilj, Marjan Urekar,
Milan Šaš, Mirosljub Pešić

Sistem za merenje pritiska u konceptu Internet of Things

Tomislav Pap, Marjan Urekar, *Member, IEEE*

Apstrakt—Za potrebe merenja pritiska u konceptu Internet of Things, razvijen je sistem koji se sastoji od komercijalnog mikrokontrolera Arduino UNO, senzora pritiska koji radi na principu otpornika osetljivog na silu, koji je robustan i široko rasprostranjen, čiji je opseg detekcije pritiska do 98 Pa i par LED dioda koji služi za signalizaciju detekcije pritiska. U II poglavlju je dat opis hardvera i detaljan opis senzora. III poglavlje sadrži kratak opis softvera koji se izvršava na mikrokontroleru ovog sistema. Moguće primene sistema su predstavljene u poglavlju IV.

Ključne reči—IoT, Industrija 4.0, metrologija, merenje pritiska, merenje sile, sensor pritiska, otpornik osetljiv na silu, mikrokontroler, merni sistem.

I. UVOD

Mi smo sada u četvrtoj industrijskoj revoluciji, poznatijoj kao Industrija 4.0 [1]. Industrija 4.0 je uvela revoluciju u automatizaciji, monitoringu i logistici kroz pametnu tehnologiju. Zasnivajući se na IIoT (eng. Industrial Internet of Things) i ugrađene softverske sisteme (CPS, eng. Cyber-Physical systems), koji su dovoljno pametni i autonomni, koji koriste kompjuterske algoritme za monitoring i kontrolu fizičkih stvari kao što su mašine, roboti i prevozna sredstva, transformiše virtualni i stvarni svet u cilju stvaranja mreža gde subjekti i objekti pametno komuniciraju jedni sa drugima.

Temelji Industrije 4.0 su “pametni” računari urađeni u CPS. Ovi računari obrađuju informacije prikupljene preko senzora i oni su sposobni da odrede i mere trenutno stanje opreme i procesa, analiziraju situaciju i pokrenu određene akcije koje poboljšavaju ukupno stanje. Ovo je urađeno kroz povezivanje hardvera i softvera novim digitalnim umrežavanjem. Glavni metrološki zahtevi sa Industrijom 4.0 su: vreme i ekonomičnost, realno vreme izvršenja, automatizacija i velika brzina. Prema tome, razvoj metrologije zasnovan je na aspektima: brzine, preciznosti, pouzdanosti i fleksibilnosti.

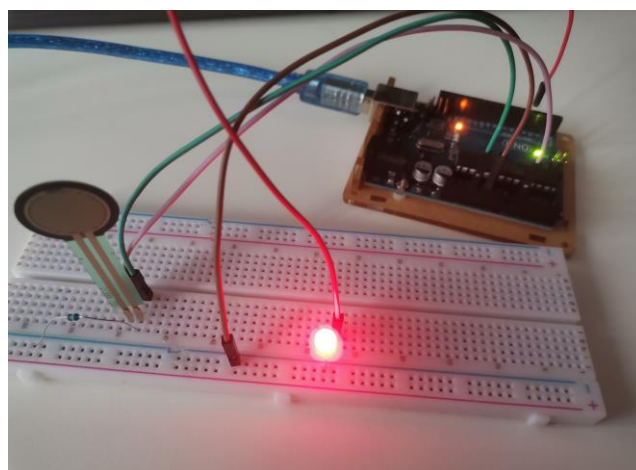
Jedan od načina na koji može da se senzor pritiska SEN-09375 priključi na Internet of Things, odnosno da se uvrsti u Industriju 4.0 je koristeći Arduino UNO mikrokontroler.

Tomislav Pap – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: pap.e125.2020@uns.ac.rs).

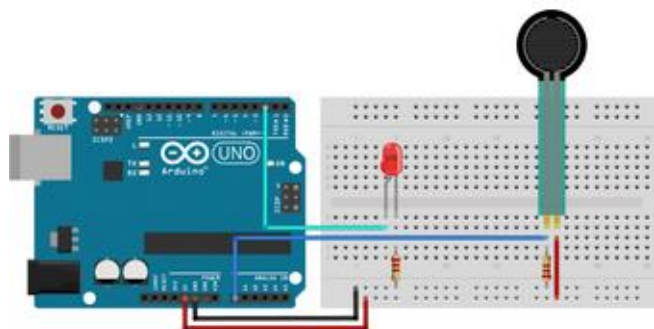
Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

II. HARDVER

Celokupan sistem je spojen na protobordu gde je izlaz senzora doveden na analogni ulaz mikrokontrolera. Kao mikrokontroler, izabran je Arduino UNO zbog njegove široke rasprostranjenosti i jednostavnosti za korišćenje. Arduino UNO je baziran na ATmega328P čipu [2]. Sastoji se od 14 ulazno/izlaznih digitalnih pinova (gde se 6 mogu koristiti kao PWM izlazi), 6 analognih ulaza, 16 MHz rezonatora, USB porta, koji može da služi i kao napajanje, zasebnog porta za napajanje, ICSP (eng. Integrated circuit serial peripheral interface) hedera i reset dugmeta. Sistem se može videti na slici 1. Kao napajanje korićen je USB adapter koji pruža napajanje do 5 V.



Sl. 1. Sistem za detekciju pritiska do 98 Pa



Sl. 2. Šema sistema za detekciju pritiska [3]

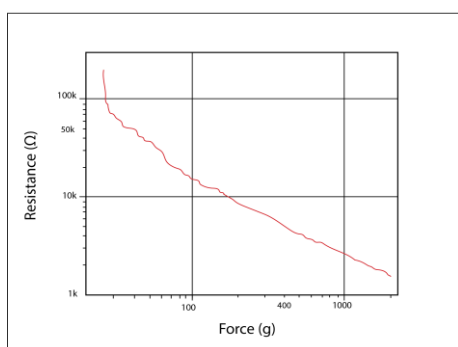
FSR (eng. force sensing resistor) su robusni senzori pritiska koji se koriste u raznim industrijama. Izabrali smo FSR [4] jer je jako jeftin i široko je dostupan. Otpornost FSR zavisi od pritiska koji se primeni na aktivnu oblast senzora. FSR menja

svoju otpornost u zavisnosti od toga koliki pritisak je primenjen u oblasti detekcije. Što je veći pritisak primeni, manja je otpornost.

Vrednost otpornika osetljivog na silu unutar senzora je veća od 1 MΩ kada nema pritiska, pa do 200 Ω kada senzor trpi najveći pritisak. Ovakvi senzori mogu da detektuju silu od 0.98 N do 98.07 N. Dva pina sa razmakom od 2,54 mm za proširenje nalaze se na dnu senzora i omogućavaju spajanje sa protopločom.

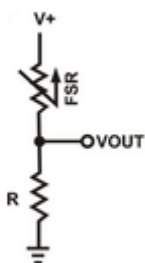
Ovaj senzor je jednostavan za postavljanje i detekciju pritiska ali nema visoku tačnost. Grafik koji je prikazan na slici 3, prikazuje kako se otpornost menja u zavisnosti od primenjene sile. Na početku vidimo priličan pad otpornosti, za malu silu, a kasnije vidimo da je osetljivost manje- više linearna.

Krajnje, za vizuelizaciju detekcije i promene pritiska na aktivnoj oblasti senzora, korišćena je crvena LED dioda. Za detaljniji uvid u merenja senzora pritiska, iskorišćena je serijska komunikacija za prikaz podataka na serijskom monitoru računara.



Sl. 3. Osetljivost FSR senzora

Kako bismo detektovali i izmerili vrednost sa FSR senzora za to nam je potreban naponski razdelnik prizan na slici 4. To ćemo uraditi tako što kao prvi otpornik ustvari uzeti FSR senzor, a drugi pull-down otpornik. V_+ je 5 volti (može i 3.3 V), a V_{out} je podatak koji nam dolazi sa FSR senzora. Odabir odgovarajućeg otpornika u naponskom razdelniku određuje osetljivost FSR i direktno utiče na raspon sile koju želimo da merimo.



Sl. 4. Naponski razdelnik

Podatak koji nam daje FSR se preračunava kao:

$$V_{out} = \frac{V_{cc} \cdot R}{R + R_{fsr}} \quad (1)$$

Kada sila nije primenjena na senzor, otpornost će biti jako velika, a nasuprot tome, kada baš jako pritisnemo senzor, silom približno 100 N ili jače, otpornost će biti faktički 0 ili jako blizu toga.

III. SOFTVER

Softver sistema za detekciju pritiska je napisan u Arduino IDE okruženju u modifikovanoj verziji C programskog jezika, podržanog od strane Arduino mikrokontrolera. Arduino IDE podržava C i C++ programske jezike i dolazi sa ugrađenom softverskom bibliotekom koja podržava mnoge funkcionalnosti ulazno/izlaznih pinova.

Koristeći već ugrađene mogućnosti Arduino IDE okruženja, inicijalnom funkcijom, analogni pin na koji je zakačen senzor pritiska je postavljen kao ulazni pin, dok je digitalni pin, koji šalje digitalne signale ka LED diodi postavljen kao izlazni pin. Takođe, setovan je inicijalno baud rate serijske komunikacije na 9600bps, kako bismo mogli ispravno da šaljemo poruke ka serijskom monitoru [5] koji je sastavni deo alata Arduino IDE.

Očitavanje vrednosti analognog pina senzora pritiska se izvršava na svakih pola sekunde u beskonačnoj petlji. Nakon očitane vrednosti senzora, vrši se procena veličine izmerene vrednosti i u zavisnosti u kom opsegu se nalazi očitana vrednost, šalju se poruke ka serijskom monitoru arduinovog softverskog okruženja. Time dobijamo detaljan uvid u izmerene vrednosti senzora pritiska.

```

FSR Value = 0 - No pressure
FSR Value = 52 - Low pressure
FSR Value = 160 - Low pressure
FSR Value = 269 - Medium pressure
FSR Value = 356 - High pressure
FSR Value = 596 - High pressure
FSR Value = 743 - Maximum value of the sensor
FSR Value = 774 - Maximum value of the sensor
FSR Value = 744 - Maximum value of the sensor
FSR Value = 681 - High pressure
FSR Value = 552 - High pressure
FSR Value = 494 - High pressure
FSR Value = 202 - Medium pressure
FSR Value = 30 - Low pressure
FSR Value = 0 - No pressure
FSR Value = 0 - No pressure
FSR Value = 71 - Low pressure
FSR Value = 187 - Low pressure
FSR Value = 305 - High pressure
FSR Value = 422 - High pressure
FSR Value = 664 - High pressure
FSR Value = 766 - Maximum value of the sensor
FSR Value = 798 - Maximum value of the sensor
FSR Value = 749 - Maximum value of the sensor
FSR Value = 688 - High pressure
FSR Value = 477 - High pressure
FSR Value = 332 - High pressure
FSR Value = 126 - Low pressure
FSR Value = 0 - No pressure
FSR Value = 0 - No pressure
FSR Value = 18 - Low pressure
FSR Value = 116 - Low pressure
FSR Value = 236 - Medium pressure
FSR Value = 349 - High pressure
FSR Value = 549 - High pressure

```

Sl. 5. Serijski monitor arduino IDE softvera

IV. ZAKLJUČAK

Ovakav sistem bi mogao da se koristi kao detekcija da li je beba/dete i dalje na krevetu, ako bi se ovaj senzor instalirao ispod posteljine što bi dalo mogućnost roditeljima da prate ponašanje svoga deteta u svakom trenutku. Još jedna dobra primena ovog sistema u industriji 4.0 bi bila kada bi se ovaj sistem spregnuo sa frižiderom, tako da se ovakav senzor nalazi ispod slotova sa namirnicama, pa bi se time moglo doći do informacije da li određene namirnice postoje u frižideru i ako da, u kojoj meri. Postojeću šemu moguće je poboljšati dodavanjem još par LED dioda kako bismo mogli ne samo da detektujemo pritisak, nego i preciznije prikažemo trenutno detekciju. Takođe umesto Arduina UNO, moglo bi se koristiti Arduino Nano [6]. Koristeći Arduino Nano, proizvodnja u početku bi bila skuplja jer bi se žice morale lemiti direktno na mikrokontroler, ali dizajn bi bio kompaktniji i jeftiniji jer sam Arduino Nano jeftiniji nego Arduino UNO. Ovakav sistem bi koristio manje električne energije što može da doprinese ekonomičnosti na duži vremenski period. Arduinov radni napon je limitiran do 12 V, tako da neko zaštitno kolo od većeg napona bi bila dobra opcija za razmatranje u budućnosti.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : „Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a“

LITERATURA

- [1] Industrija 4.0, <https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/>
- [2] Arduino Uno Revision3, "Overview", <http://storeusa.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
- [3] Arduino Forum, "FSR Voltage steadily increasing", <https://forum.arduino.cc/t/fsr-voltage-steadily-increasing/888254>
- [4] FSR Senzor, <https://012lab.com/proizvod/force-sensitive-resistor-0-5>
- [5] Arduino Serijski Monitor, "Using the serial monitor", <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2/tutorials/ide-v2-serial-monitor>
- [6] Arduino Nano, <http://store.arduino.cc/products/arduino-nano>

ABSTRACT

For needs in pressure measurements in concept Internet of Things, it was developed a system which consists of commercial microcontroller Arduino UNO, pressure sensor which works on principal of resistor which is sensitive to force, which is robust and widely spread, which range for pressure detection is up to 98 Pa, and couple of LED diodes which are used for pressure detection visualization. In chapter II is given a description of hardware and description of sensor in detail. Chapter III consists of short description of software which is executed on microcontroller of this presented system. System's usage possibilities are presented in chapter IV.

System for pressure measurements in concept of Internet of Things

Tomislav Pap
Marjan Urekar

Merno-informacioni sistem za automatsko hranjenje kućnih ljubimaca

Maja Perić, Marjan Urekar, *Member, IEEE*

Apstrakt—U ovom radu je prikazana realizacija sistema za automatsko hranjenje ljubimaca u kućnim uslovima korištenjem dostupnih softverskih alata. Elektronska šema sistema je projektovana u KiCad programu, dok je deo koda sistema pisan u Arduino IDE razvojnom okruženju. Cilj sistema jeste da upotrebom različitih senzora vrši merenje zadatih veličina, ostvari prenos, obradu i prikaz podataka do mikrokontrolera, kao i da automatizuje rad servo motora i magnetnog ventila.

Ključne reči—KiCad, Arduino IDE, Atmega328P, senzori, servo motor, magnetni ventil.

I. UVOD

Posedovanje kućnih ljubimaca je oduvek bila, i ostaće velika obaveza. Ljubimcima je neophodno posvetiti dovoljno pažnje, što uključuje redovne šetnje, igru, i naravno ispravno i redovno hranjenje. Za mnoge ljude, ispravno hranjenje kućnih ljubimaca može predstavljati problem, koji postaje posebno očigledan ukoliko vlasnici ljubimaca imaju okupiran lični život. Kada vlasnici nemaju vremena da nahrane svoje ljubimce na vreme, obično ostavljaju činije za hranu pune pre odlaska. Nezdrava ishrana, odnosno previše hrane, će skoro uvek izazvati zdravstvene probleme kod ljubimaca, što će uzrokovati kraći životni vek ljubimaca.

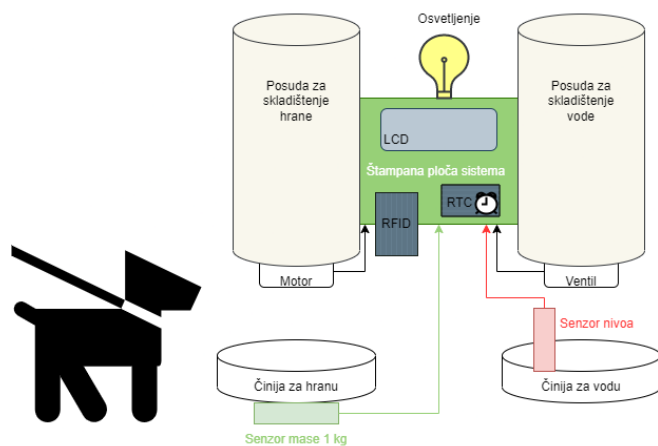
Cilj ovog sistema jeste da obezbedi lakši i efikasniji način za vlasnike da hrane svoje ljubimce, čak i kada nisu kod kuće. Konkretno, cilj je realizacija sistema koji može da detektuje kućne ljubimce, i da im na osnovu informacija koje dobija sa senzora, automatski dosipa vodu i hranu. Vlasnici bi bili u mogućnosti da ovim sistemom hrane različite vrste ljubimaca, ili ljubimce različite starosne dobi. Svaki ljubimac bi imao svoju oznaku, pomoću koje bi se vršila identifikacija. Ovaj sistem nudi personalizovan način hranjenja i brige o ljubimcima, jer je vlasnik u mogućnosti da postavlja oznake ljubimcu ili ljubimcima, kao i da određuje vreme i količinu hrane.

A. Princip rada sistema

Princip rada sistema se zasniva na tome da mikrokontroler dobija informacije sa senzorskih modula, nakon čega te informacije obrađuje i upravlja motorom i ventilom.

Maja Perić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21120 Novi Sad, Srbija (e-mail: peric.maaja97@gmail.com).

Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21120 Novi Sad, Srbija (urekarm@uns.ac.rs)



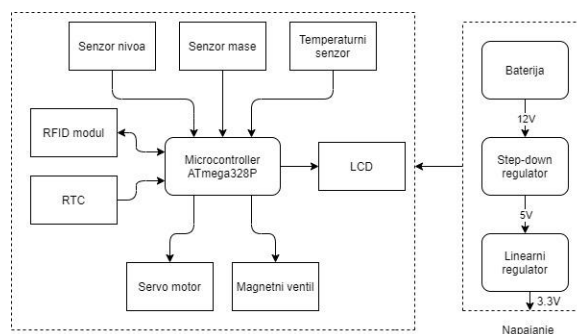
Slika 1. Ilustracija izgleda sistema u realnosti

Za informacije o količini hrane i vode u činijama iz kojih ljubimac jede, odnosno pije, zaduženi su senzor mase i senzor nivoa. Senzor koji meri nivo vode se nalazi uronjen u vodu. Na osnovu senzora nivoa se dobija informacija da li je nivo vode u činiji nizak ili visok. Ukoliko je nivo vode niži od minimalnog, aktivira se magnetni ventil i dosipa se voda.

Senzor mase se nalazi ispod činije za hranu, i na taj način meri količinu hrane u činiji. Hrana se dosipa više puta dnevno, ali u određeno, unapred postavljeno vreme. Vreme hranjenja se postavlja pomoću RTC (*Real Time Clock*) modula. Ukoliko je činija prazna, i vreme je hranjenja, aktivira se servo motor, i dosipa se hrana.

Modul za identifikaciju je RFID (*Radio Frequency Identification*) modul, i njegova funkcija je da identifikuje ljubimca. Na osnovu podataka sa oznake ljubimca, mikrokontroler dobija informacije o prisustvu ljubimca, kao i o vremenu i potrebnoj količini hrane.

Pored toga, sistem poseduje i temperaturni senzor koji meri temperaturu prostorije, kao i LCD ekran na kom se ispisuju podaci sa senzora.



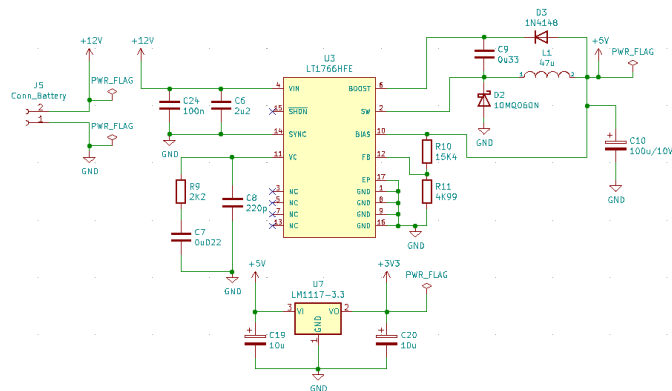
Slika 2. Blok dijagram sistema

II. ANALIZA DELOVA SISTEMA

A. Elektronska šema sistema

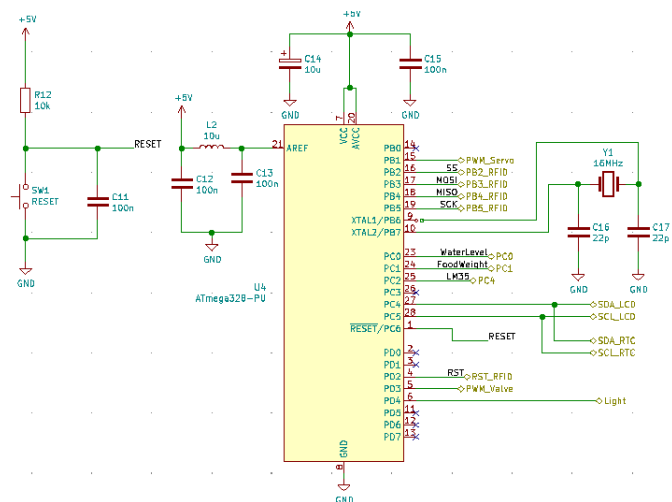
Elektronska šema ovog sistema je projektovana u programu KiCad [1]. KiCad je besplatan softverski program koji se koristi za dizajniranje šema električnih kola, kao i za izradu štampanih ploča (*Printed Circuit Board*).

Za sistem je predviđeno baterijsko napajanje baterijom od 12 V. Pomoću *step-down* regulatora [2] se 12 V pretvara u stabilnih 5 V. Zbog potrebe RFID modula, bilo je neophodno da napajanje sadrži još jedan naponski nivo od 3,3 V. Za dobijanje 3,3 V korišten je čip LM1117 [3], koji je linearni naponski regulator. Prednost baterijskog napajanja je to što je uređaj moguće postaviti na bilo koju željenu poziciju – ne mora da se nalazi blizu utičnice.



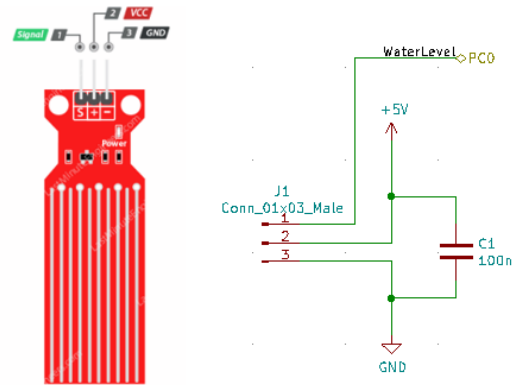
Slika 3. Šema napajanja sistema

Komponenta koja je zadužena za upravljanje čitavim sistemom je mikrokontroler ATmega328P [4]. Na slici 4 je prikazana šema povezivanja mikrokontrolera. U levom uglu šeme se nalazi kolo za reset. Kondenzatori C14 i C15 služe kao zaštita od brzih smetnji i kratkotrajnih prekida u napajanju. Komponenta Y1 predstavlja kvarcni kristal, pomoću kog se mikrokontroleru obezbeđuje radni takt, dok kondenzatori C16 i C17 omogućuju oscilovanje kvarcnog kristala.



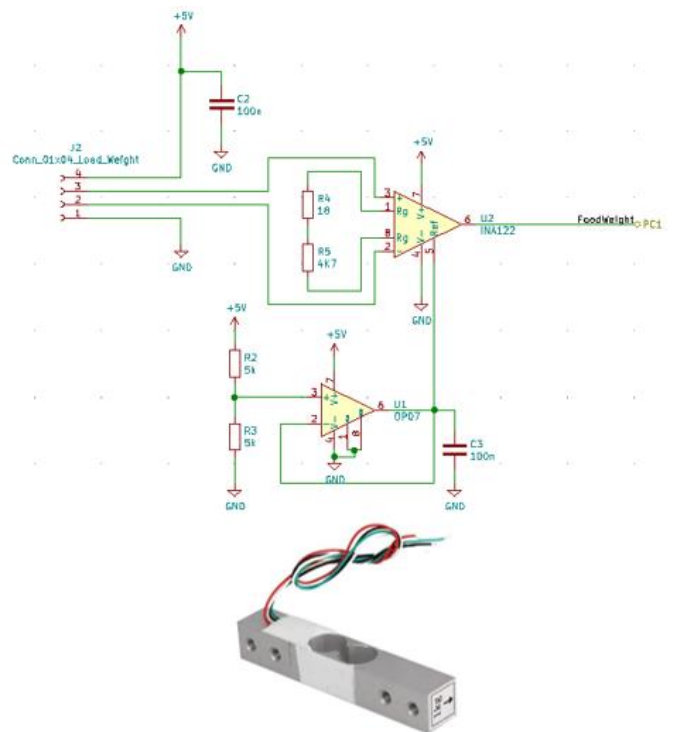
Slika 4. Šema povezivanja ATmega328P

Senzor za merenje nivoa vode [5] se sastoji od deset izloženih bakarnih traka, od kojih je pet za napajanje, a pet za detekciju. Niz izloženih paralelnih provodnika zajedno deluje kao promenljivi otpornik, čiji se otpor menja u zavisnosti od nivoa vode. Promena otpornosti odgovara udaljenosti od vrha senzora do površine vode. Otpornost je inverzno proporcionalna nivou vode – što je senzor više uronjen u vodu, to je bolja provodljivost i manji otpor, i obrnuto.



Slika 5. Izgled senzora nivoa (levo) i šema povezivanja

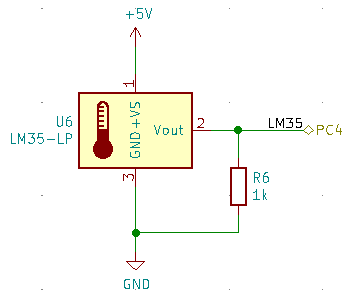
Za merenje količine hrane korišten je senzor mase od 1 kg [6]. Ovaj senzor radi na principu pretvaranja do 1 kg mase u električni signal. Senzor mase se sastoji od merne trake koja formira Vitstonov most i pretvara masu u električni signal. Pošto je promena napona na dijagonali mosta jako mala, bilo je neophodno da se pojača, i u te svrhe je korišten instrumentacioni pojačavač INA122.



Slika 6. Šema povezivanja sa INA122 (gore) i izgled senzora mase (dole)

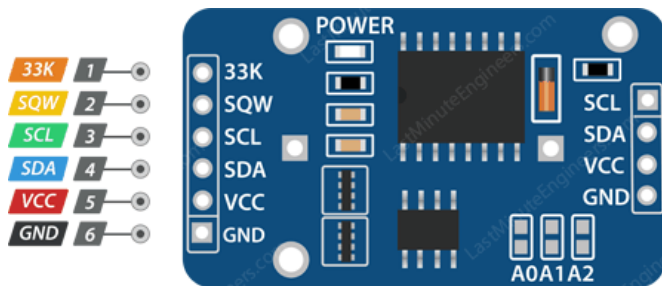
Kako bi se merila temperatura prostorije u kojoj ljubimac

boravi, korišten je temperaturni senzor LM35 [7]. LM35 je senzor čiji je izlazni signal proporcionalan trenutnoj temperaturi. Glavna karakteristika ovog senzora jeste ta da ne zahteva dodatnu kalibraciju.



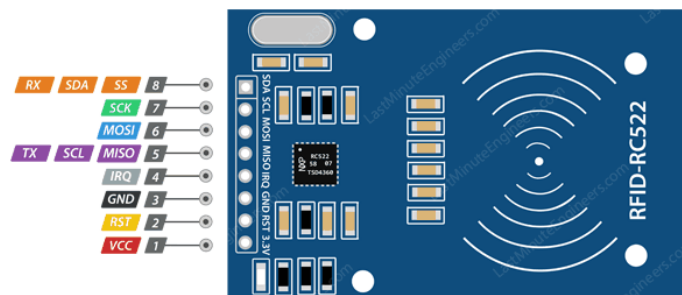
Slika 7. Šema temperaturnog senzora

RTC modul [8] je sat koji sa velikom preciznošću upravlja vremenom i datumom. Modul ima ugrađenu bateriju za rezervno napajanje, i ugrađeni kristalni oscilator. RTC modul radi tako što broji taktove oscilatora, i na taj način se dobijaju informacije o vremenu i datumu.



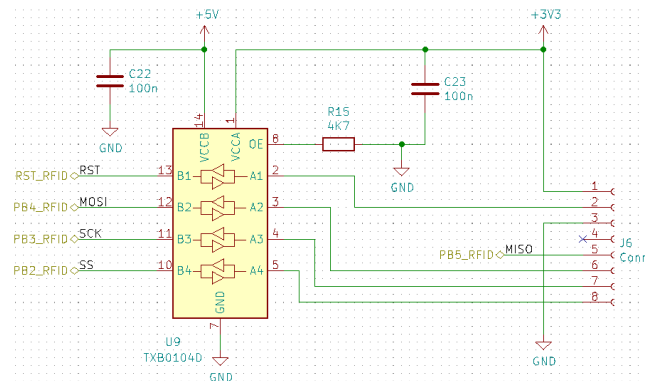
Slika 8. Izgled RTC modula

RFID modul [9] je sistem za identifikaciju radio frekvencija, koji se sastoji od dvije glavne komponente. Prva komponenta je *transponder* ili oznaka, koja je prikačena za objekat koji se identifikuje, u ovom slučaju je to ljubimac. Druga komponenta je primopredajnik, odnosno čitač oznake. Čitač se sastoji od radio frekventijskog modula i antene koja generiše visokofrekventno elektromagnetno polje. Sa druge strane, *transponder* je pasivni uređaj, koji sadrži mikročip koji skladišti informacije, i antenu za prijem i prenos signala. Kako bi se pročitala informacija kodirana na transponderu, ljubimac bi trebalo da se nalazi u neposrednoj blizini čitača, ali ne mora biti u direktnom vidnom polju.



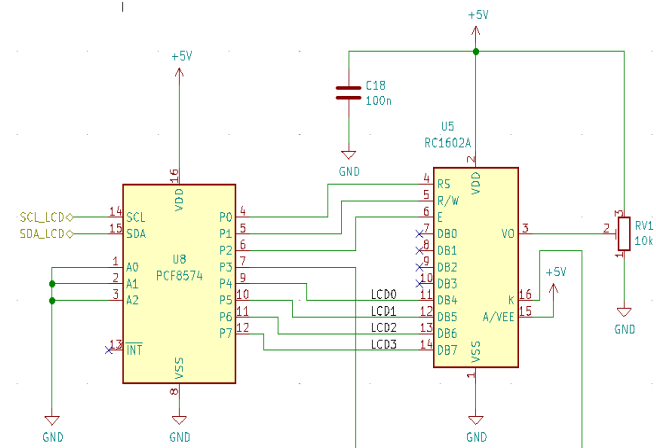
Slika 9. Izgled RFID modula

Pošto se RFID modul napaja sa 3,3 V, a mikrokontroler sa 5 V, bilo je neophodno da se modul poveže na bidirekcionni level šifter, pa tek onda na mikrokontroler, kako ne bi došlo do oštećenja modula.



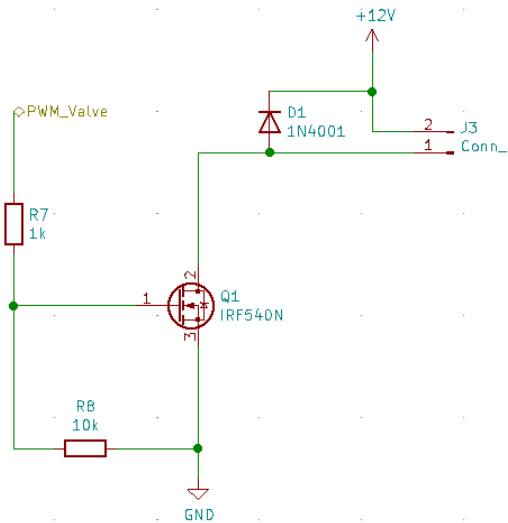
Slika 10. Šema povezivanja RFID modula

Ekran preko kog se vrši ispis vrednosti sa senzora je LCD RC1602A [10], koji ima 2×16 polja u koja stane po jedan karakter. Da bi se izvršila komunikacija sa mikrokontrolerom, i došlo do ispisa podataka na displeju, potrebne su najmanje četiri *data* linije, kao i dvije kontrolne. Pošto na mikrokontroleru ne postoji dovoljan broj odgovarajućih pinova kako bi se povezao LCD i sve ostale komponente sistema, bilo je potrebno da se koristi ulazno/izlazni ekspander [11].



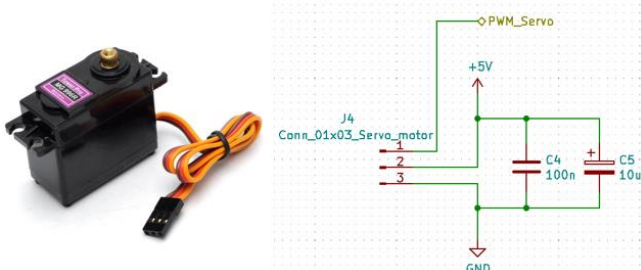
Slika 11. Šema povezivanja LCD ekrana

Za dosipanje vode je korišten magnetni ventil [12]. Ventil se uključuje i isključuje pomoću MOSFET-a. Ako se na *gate* pin MOSFET-a dovede napon, ventil će se uključiti. Ukoliko na *gate* pinu nema napona, odnosno povezan je na GND, ventil će se isključiti. Da bi ventil ostao isključen kada nema napona na *gate*-u, *gate* pin je uzemljen pomoću otpornika R8. Pomoću otpornika R7 *gate* pin je povezan na digitalni izlaz mikrokontrolera, odakle dobija ON/OFF signal. Dioda D1 je zamajna dioda, i njena funkcija je da štiti MOSFET od napona kontra elektromagnetne sile, koji se javlja prekidom struje.



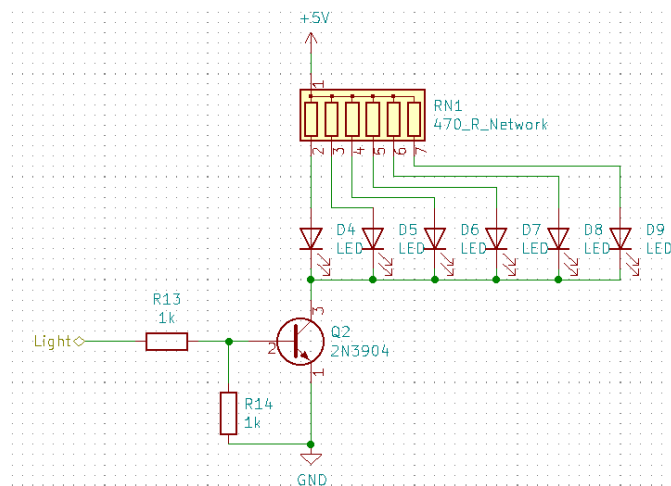
Slika 12. Šema povezivanja magnetnog ventila

Servo motor [13] se koristi za dosipanje hrane, i kontrolisan je pomoću PWM signala sa mikrokontrolera.



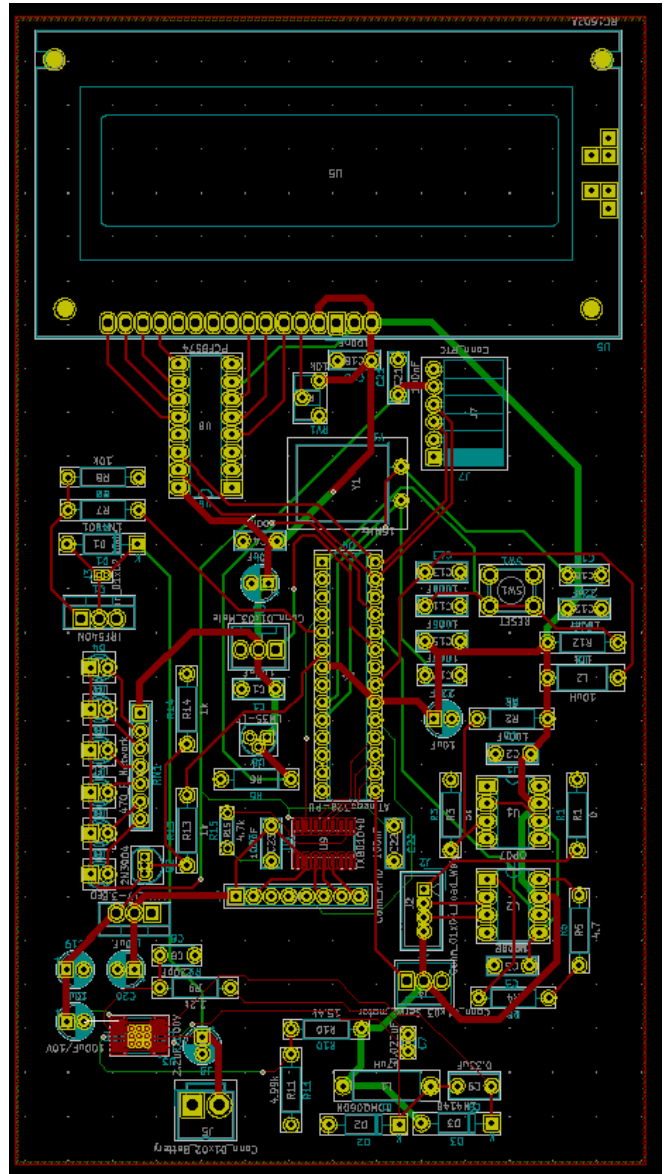
Slika 13. Izgled servo motora (levo) i šema povezivanja (desno)

Osvetljenje sistema je realizovano pomoću NPN tranzistora, koji ima ulogu prekidača, LED dioda i otporničke mreže. Svaki put kada RFID modul detektuje prisustvo ljubimca, svetlo će se uključiti.

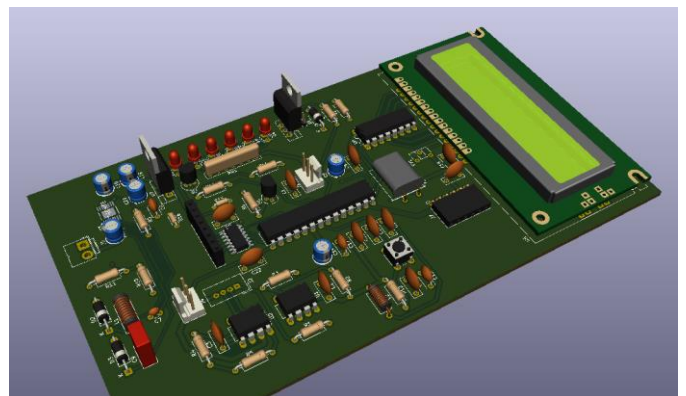


Slika 14. Šema osvetljenja sistema

PCB sistema je takođe realizovan u programu KiCad. Sve komponente su raspoređene na štampanu ploču dimenzija 165,74 mm × 90,81 mm.



Slika 15. Izgled štampane ploče sistema



Slika 16. 3D prikaz štampane ploče

B. Programski kod

Program sistema je pisan u programskom jeziku C, u Arduino IDE (*Integrated Development Environment*) [14] razvojnom okruženju. Arduino IDE je okruženje koje se koristi za razvoj softvera za različite tipove Arduino platformi. Zasniva se na otvorenom kodu (*open-source*), i uključuje veliki broj biblioteka korisnih funkcija.

U program sistema su uključene biblioteke sa funkcijama za upravljanje servo motorom i RTC-om, kao i biblioteka za komunikaciju sa RFID modulom. Napisane su funkcije koje čitaju, i zatim vrše ispis podataka sa senzora temperature, nivoa, mase, kao i podatke o vremenu i datumu. Funkcija za RTC je napisana tako, da se prvo unese vreme hranjenja od strane korisnika, a zatim se ispisuje informacija da li je vreme postavljeno ili ne. U funkciji za RFID se na početku proverava da li je čitaču prinesena nova oznaka, i ako jeste, potom se čitaju informacije koje su kodirane na oznaci. Zatim se ispituje da li je očitani identifikator tačan, tj. da li je ljubimac prepoznat. Ukoliko jeste, uključuje se svetlo, i ispisuju se vrednosti sa senzora. Ukoliko nije, na displeju se ispisuje da ljubimac nije prepoznat.

III. ZAKLJUČAK

Realizovano softversko rešenje sistema za automatsko hranjenje kućnih ljubimaca daje mogućnost korisniku da na vrlo jednostavan način olakša sebi svakodnevnicu pri brizi o kućnim ljubimcima. Kao što je već navedeno, sistem nudi personalizovan način brige o kućnim ljubimcima, što znači da je sistem prilagođen svakom korisniku i njegovom ljubimcu.

Sledeći korak bi bio pravljenje prototipa, i testiranje sistema i programa pisanog za sistem. Na osnovu testiranja bi bilo jasno na koje sve načine bi se hardverski deo sistema mogao unaprediti. Sistem bi se mogao unaprediti i softverski, razvojem aplikacija za različite mobilne i računarske platforme. Potencijalne aplikacije bi u mnogome olakšale upotrebu ovog sistema većini korisnika. U tom slučaju, korisnik bi bio u mogućnosti da u svakom trenutku, preko svog mobilnog telefona ili računara, prati stanje i informacije sa senzora. Unapređena verzija ovakvog sistema bi mogla da se koristi i u druge svrhe, tj. u drugačijim uslovima, kao što

su, na primer, azili ili farme.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : „Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a.“

LITERATURA

- [1] <https://www.kicad.org/>
- [2] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/1766fc.pdf>
- [3] https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf?ts=1625183429472&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [4] https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
- [5] <https://lastminuteengineers.com/water-level-sensor-arduino-tutorial/>
- [6] https://www.twinschip.com/Load_Cell_Weight_Sensor_1Kg
- [7] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
- [8] <https://microcontrollerslab.com/ds3231-rtc-module-pinout-interfacing-with-arduino-features/>
- [9] <https://lastminuteengineers.com/how-rfid-works-rc522-arduino-tutorial/>
- [10] <https://components101.com/displays/16x2-lcd-pinout-datasheet>
- [11] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf?ts=1625725551950>
- [12] <http://www.martyncurrey.com/controlling-a-solenoid-valve-from-an-arduino-updated/>
- [13] <https://components101.com/motors/mg996r-servo-motor-datasheet>
- [14] <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics>

ABSTRACT

This paper presents the realization of a system for automatic feeding of pets at home, using available software tools. The electronic schematic of the system was designed in the KiCad program, while part of the system code was written in the Arduino IDE development environment. The goal of the system is to measure the set values using different sensors, transmit, process and display data to the microcontroller, as well as to automate the operation of the servo motor and solenoid valve.

Automatic pet feeding system

Maja Perić, Marjan Urekar

Uređaj za pravilno sedenje baziran na merno-informacionim modulima

Jovana Jović i Marjan Urekar, *Member, IEEE*

Apstrakt— U ovom radu predstavljena je ideja za prototip uređaja za pravilno sedenje, koji bi bitno uticao na smanjenje pojave bola u leđima, oboljenje koje je sve prisutnije u svim starosnim grupama. Uređaj se sastoji od *Button load cell* ćelija pomoću kojih se prati da li korisnik sedi pravilno na sedalnom delu stolice. Pored toga postoji i senzor dodira QT100 koji detektuje da li je korisnik naslonjen na naslon stolice. Podaci se UART-om šalju na *web server*, koji se dalje učitavaju na *web sajtu*. Na *web sajtu* korisnik ima uvid u svoj sedeći stav, ali i upozorenje ukoliko ne sedi pravilno. Pored crvenih grafika i iskačućeg prozora na sajtu, kao identifikaciju nepravilnog sedenja imamo i vibro motor koji stvara vibracije i tako korisniku pruža trenutnu haptičku informaciju da popravi svoj stav.

Ključne reči—Uređaj za pravilno sedenje, HX711, QT100, Vibro motor, mikrokontroler, *web sajt*;

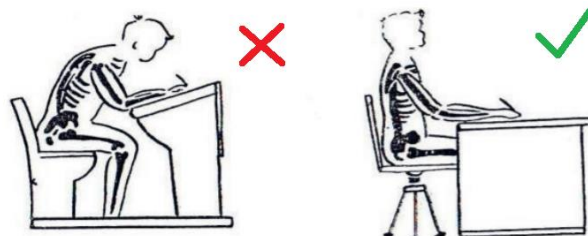
I. UVOD

Brzim razvojem nauke, matematike, fizike ali i medicine u poslednjih nekoliko decenija, postignut je veliki razvoj tehnologije koji olakšava život ljudi u svim sferama. U ovom radu opisan je uređaj za pravilno sedenje, koji je osmišljen kao odgovor na pojavu bola kako kod odraslih lica, tako sve češće i kod dece u najranijem dobu. Da bismo shvatili njegov značaj, prvo moramo uvesti osnovne medicinske pojmove vezane za bol u leđima i njegov nastanak, ali i da razumemo definiciju pravilnog sedećeg stava.

Bol u leđima (lumbago, lumbagia) predstavlja bol ili nelagodnost koju osoba oseća u području leđa, između rebranih lukova i donje glutealne brazde, sa ili bez širenja niz levu ili desnu nogu [1]. Prema definiciji, bol u leđima je simptom, ali oko 85% pacijenata nikada ne dobije tačnu dijagnozu [2]. Razlog tome je što bolovi nastaju ukrštanjem više faktora, kao što su loše držanje, dugotrajno sedenje, genetika, slabost određenih grupa mišića, emocionalni stres, promene uzrokovane starenjem mišićno-koštanog sistema (artritis, degenerativne promene diska ...).

Pored saznanja šta je bol u leđima i kako nastaje, potrebno je da razlikujemo i dobar sedeći položaj od onog koji to nije. Dobar sedeći položaj, prema definiciji, podrazumeva položaj kada je telo uspravno ili lagano nagnuto napred, glava pravilno uzdignuta, te na taj način stimuliše lagano i stalno napetost dugih mišića kičme i kratkih mišića vrata. Gornji i donji udovi su u simetričnom položaju, stopala su paralelno postavljena i

celom se površinom oslanjaju na pod. Ovakav položaj obezbeđuje najbolju udaljenost očiju od površine čitanja i manji zamor. [3]. Najčešće do pojave lošeg držanja tela dolazi usled slabosti određenih grupa mišića tonostatičke (opružaća vrata i trupa, mišića primicača lopatica, opružaća natkolenica i potkolenica i mišića stopala) muskulature. Ova pojava se može objasniti sa dva aspekta, dok nam je prvi od velikog značaja za nastanak ovog rada. Prvi aspekt: To je period kada je dete polaskom u školu, izloženo povećanom stato-dinamičkom opterećenju - dugotrajno sedenje u školskoj klupi, pisanje u povijenom položaju. [3].

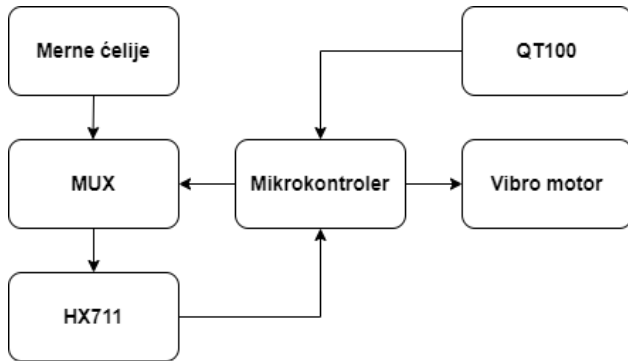


Sl. 1 - Nepravilan/pravilan sedeći stav

Kako bi se otklonio jedan od čestih razloga zbog kojeg nastaju bolovi u leđima u ovom radu je opisan uređaj za pravilno sedenje. Uređaj se sastoji od 8 mernih ćelija postavljenih na sedalni deo stolice. Pomoću njih može se utvrditi da li korisnik sedi pravilno (približno jednako je oslonjen sa obe noge na sedalni deo) ili to nije slučaj. Pored ovih senzora, na naslon stolice se postavlja elektroda senzora dodira QT100, pomoću koje se detektuje da li je korisnik sada naslonjen na naslon (sedi pravilno) ili ne. Sve ovo je spojeno sa mikrokontrolerom. Mikrokontroler obezbeđuje da kada sedenje nije pravilno (osoba vrši jači pritisak levom ili desnom nogom ili nije naslonjen na naslon stolice) korisnik dobija haptičku informaciju o tome. To je realizovano vibro motorom koji počinje sa radom baš u tom trenutku u kojem položaj tela ne odgovara pravilnom sedenju i tako opominje korisnika da popravi svoj sedeći stav. Mikrokontroler je preko UART-a povezan sa računarom i šalje podatke na internet. Na *web stranici* se u vidu grafika iscrstavaju očitavanja sa mernih ćelija. Tako korisnik ima direktan uvid u podatke o svom sedenju. Kada senzor dodira detektuje da korisnik nije naslonjen, na ekranu se pojavljuje “iskačući” prozor koji opominje korisnika na nepravilno sedenje.

II. TEHNIČKO REŠENJE SISTEMA

Blok dijagram uređaja za pravilno sedenje prikazan je na slici 2. U nastavku biće uopšteno opisano kako uređaj funkcioniše.



Sl. 2 - Blok dijagram uređaja

Kako bismo postigli neometano i normalno funkcionisanje uređaja, potrebno je obezbediti dva napona od +5 VDC i +3.3 VDC. Mrežni napon (230 VAC) se pomoću integrisanog kola LM7805 prilagođava na napon od +5 VDC, koji je neophodan za većinu elemenata u kolu. Za napajanje vibro motora potrebno je obezbediti napon od +3.3 VDC, a to je urađeno korišćenjem podesivog regulatora LM317. Kako bismo dobili željeni napon potrebno je podesiti vrednosti dva otpornika, čije vrednosti dobijamo korišćenjem jednostavne formule:

$$V_{OUT} = 1.25 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right). \quad (1)$$

Oba regulatora su obezbeđena blok kondenzatorima koji eliminišu brze promene napona, kao i elektrolitskim kondenzatorima koji dodatno doprinose stabilizaciji napona. Pored kondenzatora, integrisana kola su obezbeđena inverzno polarisanim zaštitnim diodama koje neće provoditi sve dok u kolu ne dođe do pojave inverznog ili negativnog napona. Pomoću dve LED diode na uređaju se može pratiti prisutnost oba napona.

Uređaj za pravilno sedenje poseduje dve vrste senzora pomoću kojih detektuje da li korisnik sedi pravilno. Na sedalni deo stolice postavlja se 8 mernih mostova (*Load cell* senzori koji se nalaze u kućnim vagama). Oni se raspoređuju po celom sedalnom delu, ispod leve i desne noge. Signale sa ovih ćelija dovodimo do analognog diferencijalnog multipleksera koji dovedene signale prosleđuje A/D pretvaraču jedan po jedan. HX711 je A/D konvertor osmišljen specijalno za vage i pomoću njega signal dalje putuje do mikrokontrolera.

Na naslon stolice postavlja se elektroda senzora dodira QT100. Ona ima mogućnost da preko tkanine detektuje da li je korisnik naslonjen na stolicu i sedi pravilno. Takođe, ovaj senzor je spojen sa mikrokontrolerom.

Vibro motor čini poslednji segment ovog uređaja. Zadatak mu je da korisniku pruži haptičku informaciju (informacija koja se može osetiti dodirom) onog trenutka kada korisnik ne sedi pravilno, a to se ostvaruje zahvaljujući mikrokontroleru.

Izgled stolice prikazan je na slici 3.

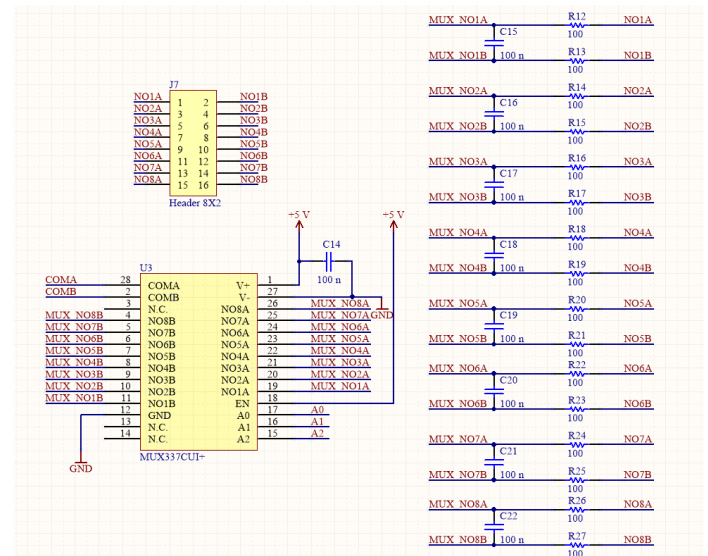


Sl. 3 - Finalni izgled stolice

III. HARDVERSKE KOMPONENTE SISTEMA

A. Analogni diferencijalni multiplekser

Kao što je već pomenuto, naš uređaj ima osam mernih mostova. Da bismo imali korisne informacije o svakom njihovom izlazu neopodno je korišćenje multipleksera. Multiplekser (MUX) je kolo koje jedan ulazni signal, koji je izabran od više ulaznih signala može da vodi ka jednom izlazu.

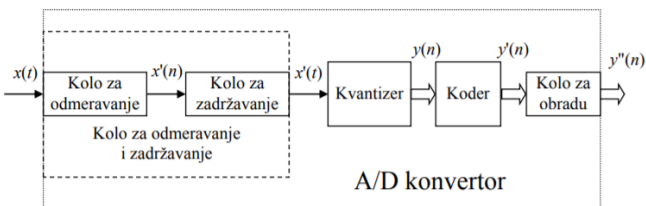


Sl. 4 - MAX337CUI+

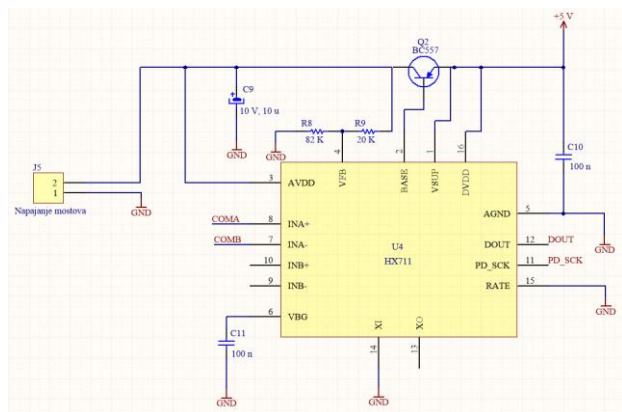
Kako imamo osam mernih ćelija koje poseduju po jedan diferencijalni izlaz, koristili smo diferencijalni multiplekser koji na izlaz dovodi i visok i nizak potencijal ulaznog signaa. Signal sa ćelija je filtriran pomoću otpornika od 100 Ω i kondenzatora od 100 nF. MAX 337 je dvostruki, 8-kanalni MUX koji je dizajniran da jedan od osam ulaza prosledi na zajednički izlaz, pomoću trobitne binarne adrese. Njega smo obezbedili *decoupling* kondenzatorom.

B. A/D konvertor HX711

Za pretvaranje analognih signala u digitalne signale prilagođene računarima (mikroprocesorima ili mikrokontrolerima) koriste se analogno – digitalni konvertori. Tipično, proces A/D konverzije obuhvata odmeravanje analogne veličine u vremenu i po amplitudi. Prema tome, A/D konvertori su uređaji koji prevode signale iz domena kontinualno vreme, kontinualna amplituda u domen diskretno vreme, diskretna amplituda. Odmeravanje signala po vremenu znači da se ulazni analogni signal odmerava (eng. *sampling*), tj. da se njegove vrednosti amplitude uzimaju u određenim vremenskim intervalima, a da se između tih intervala pretpostavlja da se signal ne menja ili da se ne menja značajno. Tipična blok šema A/D konvertora prikazana je na slici 5.



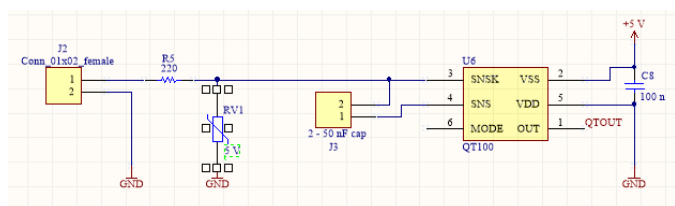
Sl. 5 - Blok šema A/D konvertora



Sl. 6 - HX711

Za potrebe ovog rada korišćeno je integrisano kolo HX711. Ono je 24-bitni A/D konvertor koji je dizajniran za kućne vage i industrijske uređaje koji su bazirani na mernim mostovima. Posедуje dva kanala, od kojih kanal A ima opciono pojačanje od 128 ili 64, dok kanal B ima fiksno pojačanje od 32. Rezultati merenja se šalju na serijski interfejs, preko kog se informacije prenose na mikrokontroler. I ovaj segment je obezbeđen *decoupling* kondenzatorima.

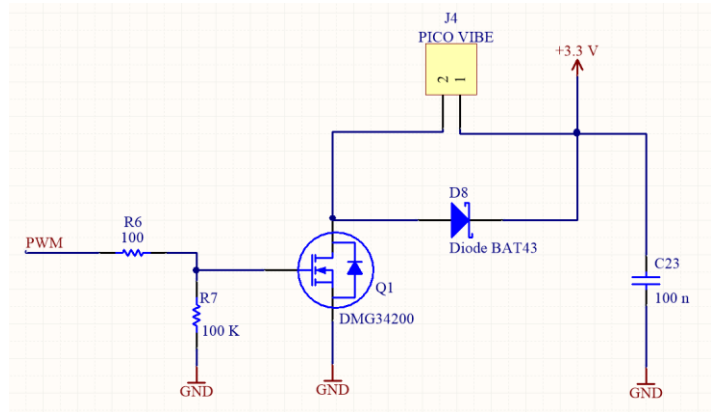
C. Senzor dodira QT100



Sl. 7 - QT100

QT100 senzor je samostalno digitalno integralno kolo, koje je sposobno da detektuje blizinu ili dodir. On stvara polje za dodir ili blizinu kroz bilo koji dielektrik, kao što su staklo, plastika, kamen, keramika, pa čak i većina drvenih površina. Takođe, može da pretvori mali metalni objekat u senzor osetljiv na dodir ili blizinu. Ova mogućnost, zajedno sa mogućnošću samokalibracije su u ovom projektu od velikog značaja. Ostavljen je priključak gde se dovodi elektroda pomoću koje se detektuje da li korisnik koristi naslon ili ne. Pored tog priključka, postoji i priključak za kondenzator. Pomoću kondenzatora (čija je vrednost između 2 nF - 50 nF) i otpornika se definiše osetljivost senzora. Vrednost kondenzatora zavisi od debljine naslona i njene dielektrične konstante. Pored kondenzatora, na osetljivost utiče i veličina i oblik electrode. QT100 je obezbeđen *decoupling* kondenzatorom, ali i varistorom koji služi za zaštitu od ESD udara.

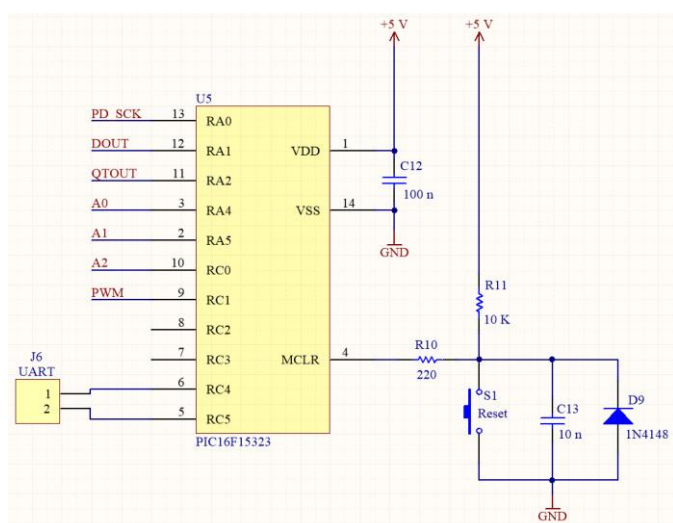
D. Vibro motor



Sl. 8 - Vibro motor

Vibro motor služi kao direktan podsetnik korisniku da ne sedi pravilno. On se uključuje ili kada se ne vrši podjednak pritisak sa obe noge ili kada korisnik ne koristi naslon stolice. Za potrebe ovog projekta koristi se ERM motor sa oznakom C102B002F. Poseduje malu ekscentričnu težinu na svom rotoru koja prilikom rotiranja stvara vibracije. Za pokretanje motora neophodno je koristiti i MOSFET, jer sam mikrokontroler ne može da pruži dovoljnu snagu. PWM signal pokreće motor, tačnije uključuje se gejt MOSFET-a sa impulsima određene širine. Zbog toga struja kroz motor varira u zavisnosti od širine impulse PWM signala, što direktno utiče na brzinu motora i tako određuje jačinu vibracija. Motor predstavlja induktivno opterećenje i njegovim isključenjem može doći do pojave inverznog napona što može oštetiti tranzistor, zbog toga koristimo zaštitnu diodu.

E. Mikrokontroler



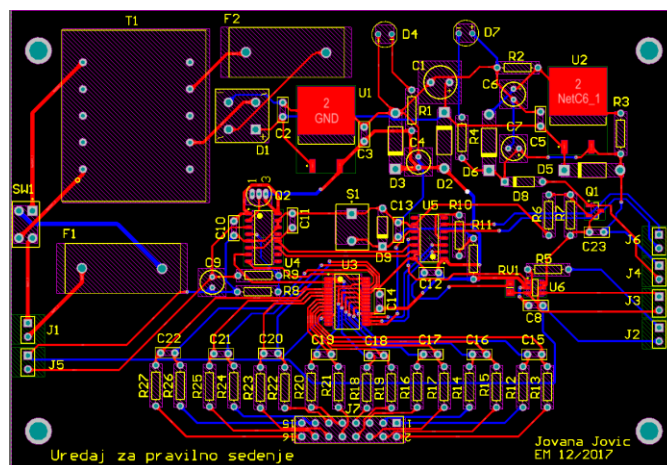
Sl. 9 - PIC16F5323

U ovom projektu korišćen je PIC16F5323 mikrokontroler. PIC16F5323 je 8-bitni mikrokontroler, serije PIC16F, sa brzinom od 32MHz. Malih je dimenzija, poseduje 14 pinova što su bili zahtevi uređaja za pravilno sedenje.

MCLR pin pruža dve posebne funkcije, a to su resetovanje uređaja i programiranje uređaja i otklanjanje grešaka. Ukoliko programiranje i otklanjanje grešaka nisu potrebni u nekom projektu, na MCLR pin dovoljno je samo dovesti +5 V. Dodavanjem komponenti povećava se otpornost uređaja na lažna resetovanja (na primer zbog pada napona). *Pull-up* otpornik na MCLR ulazu drži +5 V sve dok taster nije pritisnut. Taster služi upravo za resetovanje mikrokontrolera. Zaštita je obezbeđena *decoupling* kondenzatorom i signalnom diodom.

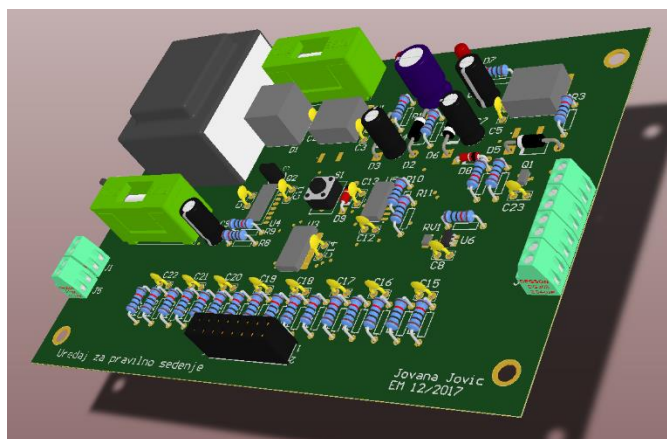
IV. PCB I 3D MODEL UREĐAJA

PCB uređaja za pravilno sedenje je napravljen u programskom paketu Altium Designer. Dizajniran je u dva sloja, jer uređaj poseduje i SMD i THT komponente. Dimenzije PCB ploče su 195 mm x 86 mm. Sve komponente uređaja, ali i designatori i naziv uređaja smeštene su na prednjoj strani. Debljine trekova variraju od 15 mil do 30 mil na ulazu kod napajanja. Korišćena je opcija Polygon Pours-a koja sve komponente koje koriste masu spaja slojem bakra. Na slici 10. prikazan je izgled PCB-a.



Sl. 10 - PCB uređaja za pravilno sedenje

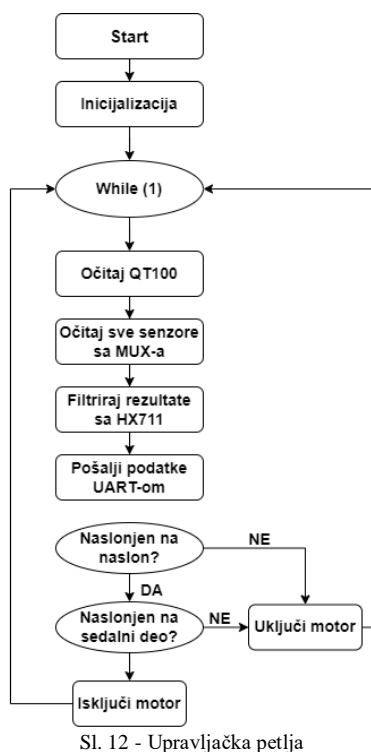
Pored PCB-a u Altium Designer program postoji mogućnost i za dizajniranje 3D modela. Ta opcija je veoma korisna, jer se i pre same izrade može videti izgled ploče i tako uticati na poboljšanje dizajna. Na slici 11. dat je izgled 3D modela.



Sl. 11 - 3D model uređaja za pravilno sedenje

V. FIRMVER I SOFTVER UREĐAJA

Pri pokretanju mikrokontrolera prvi korak predstavlja inicijalizaciju svih potrebnih modula i promenljivih unutar mikrokontrolera. Nakon toga se ulazi u glavnu programsku petlju. Glavna programska petlja je beskonačna petlja koja se izvršava sve dok mikrokontroler radi. U njoj je prvo potrebno očitati podatke sa senzora QT100, kako bi mikrokontroler imao uvid da li je korisnik naslonjen na naslon stolice. Nakon toga sledi očitavanje svih senzora koji se nalaze na sedalnom delu. Mikrokontroler pomoću multipleksera i AD konvertora HX711 pristupa svakom senzoru pojedinačno i očitava ih. Pošto su rezultati sa senzora zašumljeni, njih je potrebno filtrirati i softverski. Svi rezultati se preko UART-a dalje šalju na *Web* server. Kada su prikupljeni podaci sa svih senzora mase i sa senzora dodira, potrebno je odrediti da li korisnik pravilno sedi. Ako to nije slučaj, treba pokrenuti vibro motor. Na slici. 12 prikazan je izgled upravljačke petlje.



Sl. 12 - Upravljačka petlja

Internet of Things je koncept koji se sastoji iz mreže uređaja koji međusobno razmenjuju podatke. To su *embedded* sistemi koji imaju jedan ili više senzora. IoT ima sve širu primenu u svim sferama života, kako u *smart home* aplikacijama, tako i u medicini. Zbog tolike primene, IoT se može naći i u ovom radu.

Podaci sa *web* servera se učitavaju na *web* sajt, koji služi kao grafički interfejs za korisnika. Na slici 13. je prikazana naslovna strana sajta.



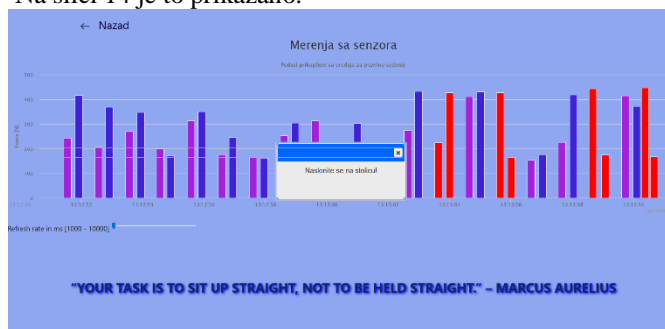
Good posture and an attitude let you get away with anything.
— Lorna Landvik



Sl. 13 - Naslovna strana

Na tom *web* sajtu korisnik može pratiti rezultate svog dosadašnjeg sedenja, kao i da bude upozoren ako njegovo sedenje u datom trenutku nije pravilno. Na grafiku se to identifikuje crvenom bojom kada korisnik ne vrši približno jednak pritisak sa obe noge ili iskaučim prozorom ako nije naslonjen na naslon. *Web* aplikacija bi takođe mogla da pruža i dodatne mogućnosti, kao što su arhiviranje rezultata sedenja, praćenje napredovanja ili ipak nazadovanja u veštini pravilnog sedenja. To bi od velikog značaja bilo roditeljima i vaspitačima koji bi imali uvid o napredovanju deteta pri stvaranju dobrih navika tokom sedenja. Uvid u rezultate sedenja bi mogao poslužiti u i medicinske svrhe, kako bi lekari imali jedinstven pristup za svakog pacijenta, kao i jedinstvenu dijagnozu.

Na slici 14 je to prikazano.

Sl. 14 - Grafik i "iskaučići" prozor na *web* sajtu

VI. DISKUSIJA

Uređaj za pravilno sedenje je osmišljen kako bi se otklonila određena grupa medicinskih problema koja se sve češće javlja i kod dece u najranijem dobu (dece školskog uzrasta). Korišćenjem dostupne tehnologije napravljen je prototip uređaja i predložena primena istog kako bi se smanjila pojava bola u leđima. Dalja istraživanja bi mogla dovesti do unapređenja uređaja i učinila da se on komercijalizuje i bude dostupan svima.

Na tržištu se mogu pronaći različiti uređaji u različitom cenovnom rangu. Lumo Lift je uređaj koji se pomoću magneta kači na odeću i koncentrisan je na gornji deo leđa, cena mu je oko 80 € [10]. UpRight je uređaj koji se lepi na gornji deo leđa (može se iskoristiti jednom za period od 15 min do 60 min). Njegova cena je oko 130 € [11]. Prana je još jedan uređaj koji je dostupan na tržištu. To je prenosivi uređaj koji se zakači u predelu struka i pomoću dijafragmalnog disanja i obrazaca disanja prati povijenost u lumbalnom delu. Cena je 100 € [12]. Svaki od njih je fokusiran samo na određeni deo leđa, torakali (gornji) ili lumbalni (donji). Uređaj koji je opisan u ovom radu predstavlja celinu jer prati položaj celog tela u sedećem stavu. To je njegova najveća prednost. Takođe, uređaj se postavlja na samu stolicu, tako da korisniku ne predstavlja nikakvu smetnju prilikom korišćenja.

Pored toga, ne postoji ograničenje u starosnom dobu osobe koja koristi uređaj, mogu ga koristiti i odrasli i deca. Takođe, zbog osam mernih ćelija masa koju uređaj može da podnese je 400 kg, pa ni u tom pogledu ne postoje ograničenja.

Najveća mana ovog uređaja je što se za pokrivanje sedalnog dela koriste *button load cell* ćelije koje imaju visoku cenu. Jedna ćelija se na tržištu može naći za 35 €, a nama je potrebno osam takvih. Taj problem je u budućnosti moguće rešiti tako što se umesto *button load cell* ćelija, mogu koristiti obične *load cell* ćelije koje se mogu naći u kućnim vagama. Njihova cena je oko 3 € i dostupne su svuda.

Uređaj trenutno ne poseduje baterijsko napajanje, već ga moramo postaviti blizu utičnice kako bi radio. To je još jedan način kako bismo unapredili uređaj. Mogu se dodati tri litijumske baterije od 3.7 V, koje bi malo povećale dimenzije uređaja, ali bi obezbedile da uređaj neko vreme radi i ako nije priključen na mrežno napajanje.

Uređaj se može koristiti u učionicama, ali bi za te svrhe bilo

potrebno razviti aplikaciju pomoću koje bi učitelj mogao da prati sedeći stav svakog deteta. Tako bi se uticalo na stvaranje dobrih navika, ali i na prevenciji bola u najranijem periodu. Pored učitelja, pristup aplikaciji može se dati roditeljima, koji bi u kućnim uslovima mogli da utiču na pravilno sedenje svog deteta.

ZAKLJUČAK

Ovaj rad nudi rešenje kako smanjiti pojavu bola u leđima i kako podstaći dete u stvaranju dobrih navika. Primenom dostupnih senzora ali i IoT-a kao deo Industrije 4.0 nudi se mogućnost za realizaciju kompletnog uređaja za pravilno sedenje.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru projekta MPNTR 200156: „Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a“. Takođe, zahvaljujem se na velikoj pomoći i podršci pri izradi ovog rada celoj Katedri za električna merenja na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.

LITERATURA

- [1] Rannou F, Poiraudou S, Henrotin Y. Low back pain including sciatica and DISH. U: Bijlsma JWJ, Burmester GR, Da Silva JAP, Faarvang KL, Hachulla E, Mariette X. EULAR Compendium on Rheumatic Diseases. 2009:477-479.
- [2] Barr KP, Harrast MA. Low back pain. U: Braddom RL. Physical Medicine and Rehabilitation. Philadelphia: Elsevier. 2007:883-927

- [3] Kosinac, Z. (1998). Nepravilno sedenje i tjelesno držanje, Školski vjesnik.
- [4] <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/lm317-d.pdf>
- [5] <https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/105810/0/0/1/qt100.html>
- [6] <https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/1836471/0/0/1/hx711.html>
- [7] <https://www.mikroe.com/vibro-motor-click>
- [8] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX336-MAX337.pdf>
- [9] https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC16_L_F1531_3_23_Data_Sheet_4_0001897C.pdf
- [10] <https://feelpeak.com/>
- [11] <https://www.uprightpose.com/>
- [12] <http://prana.co/>

ABSTRACT

In this paper the prototype for a proper sitting posture device is presented, which would lead to decrease in back pain. Back pain is a recurring problem in all age groups nowadays. The device consists of Button load cells that detect if a user is sitting properly or not on the seating part of the chair. Apart from them, there is a touch sensor QT100, which detects if the user is set against the backrest of the chair. The acquired data is sent through UART to a web server, and is showed on a web site. On the web site the user has an insight in his sitting posture, but there are also warnings if his sitting posture is incorrect. Besides a red graphic and pop-up window on the site, there is a vibration motor which warns the user about his bad sitting posture by a haptic feedback.

Device for proper sitting posture based on measurement-information modules

Jovana Jović, Marjan Urekar

Merno-akvizicioni sistem za pravilno sedenje

Mario Volaš, Dragan Pejić, *Member, IEEE*, Marjan Urekar, *Member, IEEE*

Apstrakt—U ovom radu predstavljeno je rešenje firmvera za prototip uređaja za pravilno sedenje, koji korisniku daje povratnu informaciju o položaju njegovog tela tokom sedenja. Ovaj uređaj je za cilj imao da popravi držanje korisnika, i tako smanji bolove koji nastaju posle višerasovnog sedenja. Za razvoj ovog prototipa korišćen je STM32F407 mikrokontroler sa razvojnom pločom STM32F4 Discovery. Na sedalnom delu stolice postavljene su merne ćelije za merenje sile, koje proveravaju položaj korisnika na sedalnom delu stolice. Izlazi mernih ćelija se na mikrokontroler dovode preko A/D konvertora HX711. Merenje udaljenosti korisnika od naslona stolice vrši Proximity click, dok povratnu informaciju o nepravilnom sedenju korisnik dobija preko vibro-motora koji se pokreće DC motor 4 click pločicom.

Ključne reči—Embedded, STM32F407, Merne ćelije, Proximity click, HX711, Merenje

I. UVOD

Bol u leđima postaje sve veći problem u modernom svetu. Istraživanja pokazuju da se od 1990. do 2016. godine broj godina provedenih sa invaliditetom (DALY- Disability adjusted life years) uzrokovanim bolom u leđima povećao za čak 50% [1]. Glavni uzrok ovih rezultat je stil života, u kom ljudi provode sve više i više vremena u sedećem položaju.

Kako bi što više smanjili rizik od bolova u leđima, potrebno je da osoba sedi pravilno. Dobar sedeći položaj podrazumeva položaj kada je telo uspravno ili lagano nagnuto napred, glava pravilno uzdignuta, te na taj način stimuliše lagano i stalno napetost dugih mišića kičme i kratkih mišića vrata. Gornji i donji udovi su u simetričnom položaju, stopala su paralelno postavljena i celom se površinom oslanjaju na pod. Ovakav položaj obezbeđuje najbolju udaljenost očiju od površine čitanja i manji zamor [2].



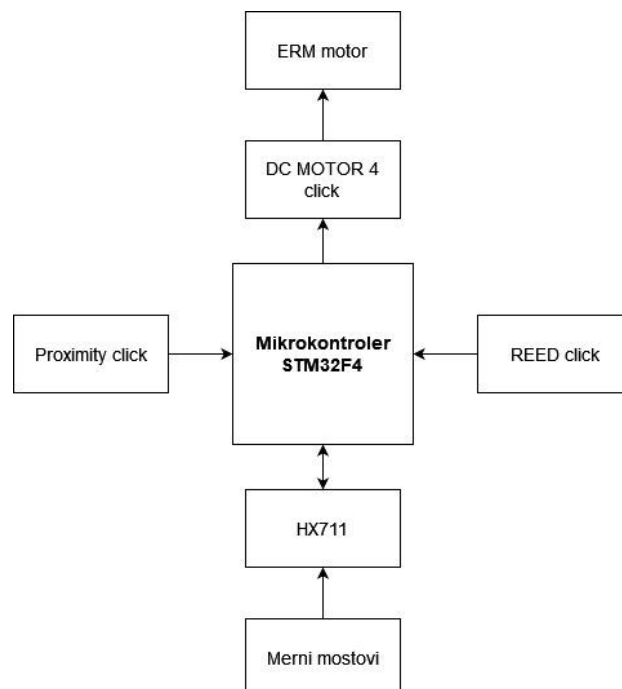
Sl. 1 - Nepravilan i pravilan položaj tela pri sedenju

Mario Volaš – Fakultet tehnikih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: mariovolas@gmail.com)

Dragan Pejić – Fakultet tehnikih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs).

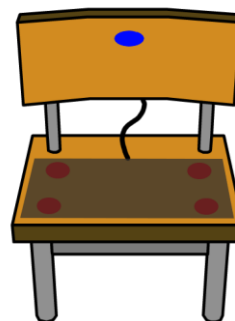
Marjan Urekar – Fakultet tehnikih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs)

Kako bi se korisnik podstakao na pravilan položaj tela pri sedenju, razvijen je Uređaj za pravilno sedenje. Ovaj uređaj prati položaj tela korisnika na sedalnom delu stolice kao i na naslonu stolice. Za razvoj prototipa korišćeno je razvojno okruženje STM32F4 Discovery [3], čiji je centralni deo STM32F407 mikrokontroler. Sila kojom se korisnik naslanja na jednu ili na drugu nogu meri se load cell-ovima, a na naslonu stolice se nalazi Proximity click [4] koji meri da li je korisnik naslonjen na stolicu. Za obaveštavanje korisnika o njegovom nepravilnom položaju koristi se motor sa ERM (Ekscentrična rotirajuća masa). Korisnik takođe može da izabere između striktnog i opuštenog režima rada. Blok šema uređaja je prikazana na slici broj 2.



Sl. 2 - Blok šema uređaja za pravilno sedenje

Na slici 3. prikazan je nacrt uređaja za pravilno sedenje.



Sl. 3 - Nacrt uređaja za pravilno sedenje

II. HARDVER

Radi bržeg, praktičnijeg i jednostavnijeg razvoja prototipa Uređaja za pravilno sedenje, korišćene su uglavnom modularne komponente i razvojne ploče.

A. Razvojno okruženje hardvera

STM32F4 Discovery razvojna ploča u sebi sadrži mikrokontroler STM32F407VG. On je 32-bitni mikrokontroler koji radi na frekvencijama do 168 MHz, 128 KB RAM memorije, 1024 KB FLASH memorije, 3xI2C, 2xUART, 3xSPI interfejsa, 17 tajmerskih modula, itd. Razvojna ploča takođe sadrži i ST-LINK/V2-A embeded alat za debugovanje.



Sl. 4 - STM32F4 Discovery [3]

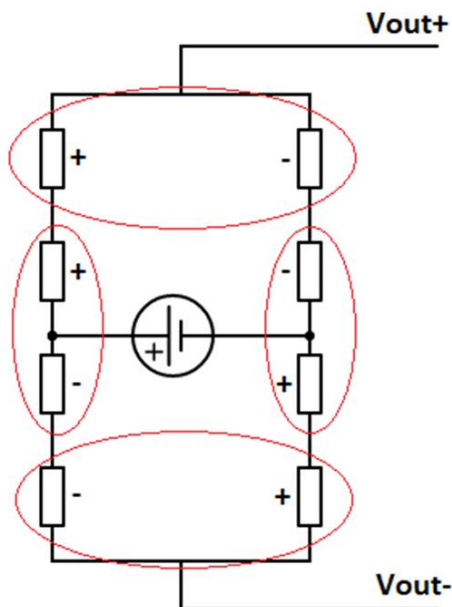
Kako bi na STM32F4 Discovery razvojnu ploču na najjednostavniji način priključili click pločice, korišćen je STM32F4 Discovery shield [5]. Na njega je moguće priključiti četiri click pločice, a pored toga poseduje i USB UART priključak, koji omogućava povezivanje mikrokontrolera na PC računar bez serijskog porta.



Sl 5 - STM32F4 Discovey shield [5]

B. Merne ćelije

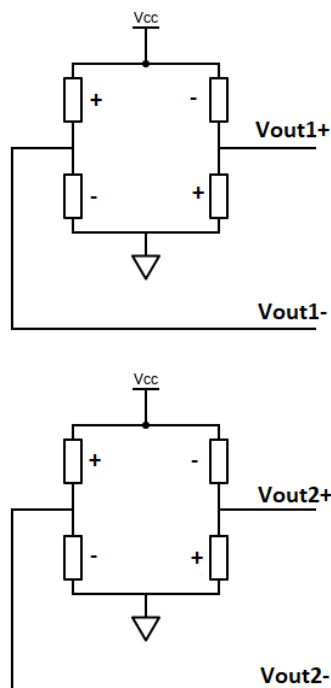
Za merenje sile pritiska na sedalnom delu stolice korišćene su merne ćelije koje se nalaze u komercijalnoj digitalnoj vagi za merenje telesne mase. U vagi se nalaze četiri merne ćelije, a svaka od njih predstavlja jedan polu-most.



Sl. 6 - Način povezivanja mernih mostova

Na slici 6. zaokruženi elementi predstavljaju jednu mernu ćeliju. Na ovaj način polu-mostovi čine jedan ceo most.

Uređaj za pravilno sedenje zahteva dva odvojena mosta, koja se nalaze na levoj i desnoj strani sedalnog dela stolice.



Sl. 7 - Način povezivanja mernih mostova u uređaju

Ovo prespajanje je izvršeno pomoću jumper-a kako bi izmena bila reverzibilna, te se nakon modifikacija uređaj može koristiti i kao vaga za merenje telesne mase, i kao uređaj za pravilno sedenje.

C. HX711

Za merenje izlaza mernih mostova korišćen je A/D konvertor HX711 [6]. HX711 je 24-bitni A/D konvertor, koji je dizajniran za vage i industrijske uređaje koji su bazirani na mernim mostovima. Posедуje dva kanala. Kanal A ima pojačanje od 128 ili 64, dok kanal B ima pojačanje od 32. Rezultati merenja se šalju na serijski interfejs, preko kog se informacije prenose na mikrokontroler. Da bi ovaj čip funkcionisao kako treba, potrebno mu je dodati i neke spoljašnje elemente, što je u ovom slučaju već urađeno na gotovoj štampanoj ploči (slika 8.).



Sl. 8 - Izgled štampane ploče sa HX711 [6]

HX711 sa mikrokontrolerom komunicira pomoću serijskog interfejsa za koji su potrebna dva pina, jedan za takt, a drugi za podatke.

D. Proximity click

Proximity click na sebi sadrži integrisano kolo VCNL4010, koje služi kao senzor blizine i ambijentalnog svetla. On kombinuje emiter infracrvenog svetla i PIN fotodiode za merenje blizine u dometu do 20 cm. Čip VCNL4010 ima 16-bitnu rezoluciju. Takođe, može se koristiti i kao senzor ambijentalnog svetla. Proximity click komunicira sa mikrokontrolerom preko I2C komunikacije. Ova click pločica može da se napaja sa 3,3 V ili 5 V.



Sl. 9 - Izgled Proximity click-a [4]

VCNL4010 sadrži sedamnaest 8-bitnih registara za kontrolu, postavku parametara i baferovanje očitanih rezultata. Svi ovi registri su dostupni mikrokontroleru preko I2C komunikacije.

E. DC MOTOR 4 click

DC MOTOR 4 click [7] je click pločica koja ima mogućnost pokretanja motora sa naponima napajanja od 5 V

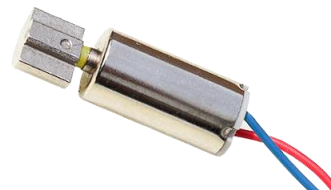
do 36 V. Sadrži MAX14870 drajver motora od kompanije Maxim Integrated. Ova click pločica je dizajnirana da radi na 3,3 V ili 5 V. Takođe, na njoj postoji i jumper, pomoću kog se može podesiti da li se koristi unutrašnje napajanje od 5 V, ili neko spoljašnje napajanje.



Sl. 10 - Izgled DC MOTOR 4 click-a [7]

Za komunikaciju sa mikrokontrolerom koriste se linije PWM, FLT, DIR i EN. Kontrola brzine okretanja motora vrši se pomoću PWM signala. Veća ispunjenost PWM signala znači i brže okretanja motora. Integrisano kolo MAX14870 nudi i mogućnosti izbora smera kretanja motora pomoću linije DIR.

U ovom projektu DC MOTOR 4 click služi za pokretanje motora sa ekscentričnom rotirajućom masom (ERM), koji proizvodi vibracije, kako bi korisnik bio obavešten o nepravilnom sedenju.



Sl. 11 - Izgled ERM motora [8]

F. REED click

REED click [9] je jednostavna pločica koja na sebi sadrži standardni (jednopolni, jednapoložajni, normalno otvoren) reed relej. Kada se na ovaj relej utiče magnetnim poljem, njegovi kontakti se zatvore. Tada se na mikrokontroler šalje logička jedinica.

Za ovu aplikaciju REED click je izabran kako bi korisnik preko tkanine na stolici mogao da bira mod rada uređaja.



Sl. 12 - Izgled REED click-a [9]

III. FIRMVER

A. Razvojno okruženje firmvera

Firmver za prototip uređaja za pravilno sedenje napisan je u STM32CubeIDE [10] razvojnom okruženju.

Uređaj za pravilno sedenje se bazira na razvojnoj ploči STM32F4 Discovery koja u sebi sadrži STM32F407VG mikrokontroler. Kompanija STMicroelectronics za programiranje ovog mikrokontrolera nudi razvojno okruženje STM32CubeIDE. STM32CubeIDE je napredno C/C++ razvojno okruženje sa periferalnom konfiguracijom, generatorom koda, kompajlerom koda i svojstvima za debugovanje STM32 mikrokontrolere i mikroprocesore.

Pomoću ovog okruženja moguće je na jednostavan način konfigurirati sve periferije mikrokontrolera, GPIO pinove, takt rada, interne i eksterne interapte itd. Takođe sadrži i debager, pomoću koga se može pratiti izvršavanje koda korak po korak.

Jedan od glavnih prednosti STM32CubeIDE razvojnog okruženja je njegov Device configuration tool. On nam omogućava da na jednostavniji i brži način konfiguriramo pinove, oscilatore, periferije itd.

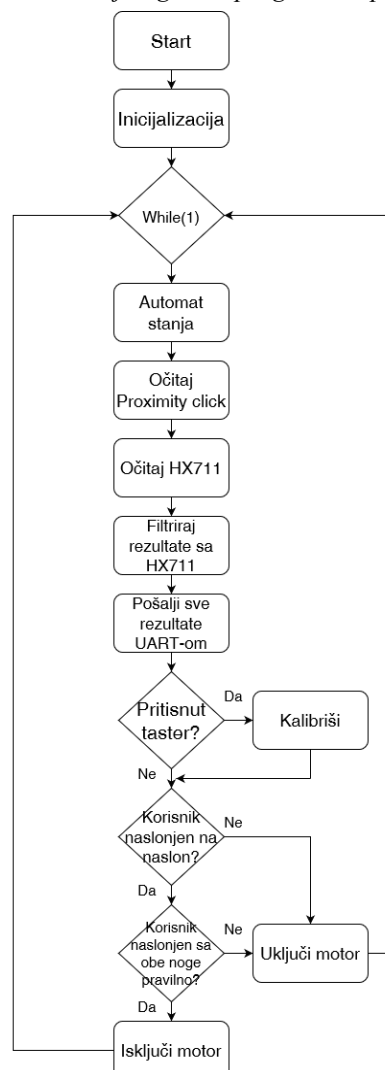
U ovom alatu najpre je podešena brzina takta koji zadaje brzinu rada mikrokontrolera. Brzina ovog takta je 168 MHz. Ova brzina se postiže pomoću eksternog oscilatora od 8 MHz, unutrašnjeg PLL-a (množača takta), i preskalera. Iako ova brzina nije neophodna za ovakvu primenu mikrokontrolera, veća brzina je omogućila da mikrokontroler sigurno izvršava sve zadatke.

Pomoću Device configuration tool-a su takođe podešeni i GPIO pinovi. Ovi pinovi služe kako bi se prikupljali podaci sa ostalih uređaja ili kako bi se njima upravljalo. Tako imamo pinove za upravljanje AD konvertorom HX711, za prikupljanje podataka sa Proximity click-a, itd.

Ovde su takođe podešeni i tajmeri. U ovom projektu oni su korišćeni za generisanje PWM signala, kao i za kreiranje funkcije koja pravi kašnjenje (eng. *delay*) od mikrosekunde.

Konfiguracija komunikacionih modula je takođe odrađena pomoću Device configuration tool-a. Za ovaj projekat bili su potrebni USART2 i I2C3 moduli, pomoću kojih je mikrokontroler komunicirao sa PC računarnom i proximity click-om.

B. Algoritam izvršavanja i glavna programska petlja



Sl. 13 - Algoritam izvršavanja

U glavnoj programskoj petlji se nalazi glavni deo koda, koji se izvršava beskonačno puta. Prvo se izvršava automat stanja (eng. *state machine*) koji pomoću reed releja određuje u kojem modu rada treba da radi uređaj (opušteno ili striktno).

Sledeća celina se odnosi na čitanje razdaljine sa Proximity click-a. Prvo se upisuje vrednost za konfiguraciju čipa VCNL4010 tako da on prikuplja podatke sa senzora blizine. Nakon toga, posle kratkog delay-a čitaju se podaci iz njegovih registara, u kojima se skladište podaci o razdaljini. Ove podatke smeštamo u dve 8-bitne promenljive, a nakon toga ih spajamo u jednu 16-bitnu.

Posle isčitavanja vrednosti sa Proximity click-a sledi očitavanje vrednosti sa AD konvertora HX711. Kada su vrednosti očitane, njih je potrebno i filtrirati. Implementacijom FIR filtra ovo je odrađeno na jednostavan i efikasan način. Filter je dizajniran pomoću online alata Tfilter, koji za zadate vrednosti frekvencija i pojačanja sam generiše kod i konstante.

Kako bi ovaj uređaj odgovarao svakom korisniku, bez obzira na njegovu masu, potrebno je izvršiti kalibraciju. Kada korisnik sedne, pritiskom na taster za kalibraciju uređaj u

promenljivu upisuje referentnu vrednost sa kojom će kasnije da upoređuje nove vrednosti.

Za komunikaciju sa PC računarom koristi se UART komunikacija. Kada su svi potrebni podaci prikupljeni, oni se upoređuju sa dozvoljenim vrednostima. Kada je neka vrednost van dozvoljenog opsega, uključuje se motor, i preko UART-a se ispisuje poruka. Ovo se radi za obe strane sedalnog dela, kao i za rastojanje od naslona.

IV. DISKUSIJA

Uređaj za pravilno sedenje je uređaj koji bi pomogao ljudima u modernom svetu, a koji se bave poslom koji zahteva viščasovno sedenje. Pomoću njega, korisnik u svakom trenutku ima uvid u položaj svog tela, i na nepravilnosti u držanju. Dizajniran je tako da ga korisnik na jednostavan način može kalibrisati za svoje potrebe, a takođe ga može koristiti i kao vagu za telesnu masu uz jednostavnu rekonfiguraciju.

Kako je ova verzija uređaja dizajnirana pomoću razvojne ploče, njegova cena nije pristupačna za većinu korisnika, ali uz male modifikacije mogao bi biti veoma pristupačan. Naime, za potrebe ovog sistema mogao se koristiti i mikrokontroler sa slabijim karakteristikama i sa manje mogućnosti. Takođe, većina elemenata bi se mogla postaviti na jednu ploču, i tako uštedeti na izradi pojedinačnih click pločica.

Tokom izrade prototipa, osim izrade samog sistema, dodatne izazove predstavljalo je i samo mehaničko rešenje. Naime, kako bi Proximity click merio odstojanje korisnika od naslona stolice, bilo je potrebno probušiti rupu na naslonu stolice da bi infracrveni zraci iz senzora stigli do korisnika, a da pritom senzor ne bude sa prednje strane naslona i time izazove neudobnost pri sedenju. Takođe, za prototip nije izrađeno kućište, pa iz ovog razloga razvojna ploča nije mogla da se zašrafi na stolicu.

Još jedna mana prototipa je njegova udobnost. Da bi korisnik ovaj uređaj mogao da koristi svakodnevno i duže vremena, potrebno je dizajnirati sedalni deo koji bi za to bio pogodan.

Problem pri merenjima sa mernim ćelijama predstavljao je A/D konvertor HX711. Iako on poseduje dva kanala za merenje, oni nemaju isto pojačanje. Ovo je predstavljalo problem, jer je prvobitna ideja bila da se računa odnos između dve strane sedalnog dela, što nije moguće kada su pojačanja različita.

Ovaj uređaj bi se mogao i dodatno nadograditi tako što bi se podaci koji se sakupljaju mogli dalje slati na WEB server. Obrada mernih podataka zahteva veću procesorsku moć, kakvu imaju PC računari i serveri. Na taj način bi mikrokontroler mogao da se u potpunosti svede na minimalne specifikacije, jer ne bi obavljao komplekse obrade, kao što su filtriranje podataka. WEB server bi takođe mogao i da skladišti prethodne podatke, i na taj način bi korisnik mogao da prati poboljšanje svog sedećeg položaja. Takođe, razvojem aplikacije za Android ili IOS mogao bi se vršiti i nadzor pravilnog sedenja dece, i roditelj bi na jednostavan način mogao da utiče na razvoj deteta.

Prednost ovog uređaja u odnosu na već postojeće komercijalne uređaje je što pokriva i sedalni deo, kao i naslon stolice. Takođe, uređaj se može montirati na bilo koju stolicu, pa korisnik ne mora da brine o postavljanju uređaja svaki put kad ga koristi.



Sl. 14 - Izgled Uređaja za pravilno sedenje

V. ZAKLJUČAK

Izradom ovog prototipa pokazana je osnovna funkcionalnost uređaja, koji može biti dobra osnova za gotov proizvod. On bi se, uz male nadogradnje, mogao koristiti u svakodnevnom životu, obrazovanju, pa čak i za naučna istraživanja.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : "Inovativna naučna i umetnička isptivanja iz domena delatnosti FTN-a".

LITERATURA

- [1] Hartvigsen J et al. Low Back Pain Series: What Low Back Pain Is and Why We Need to Pay Attention. Lancet, June 2018; Volume 391, Issue 10137; p2356-2367. J. K. Author, Title of Book, xth ed. City of Publisher, Country: Abbrev. of Publisher, year.
- [2] Kosinac, Z. (1998). Nepravilno sedenje i tjelesno držanje, Školski vjesnik.
- [3] <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
- [4] <https://www.mikroe.com/proximity-click>
- [5] <https://www.mikroe.com/stm32f4-discovery-click-shield>
- [6] <https://www.digikey.com/htmldatasheets/production/1836471/0/0/1/hx711.html>
- [7] <https://www.mikroe.com/dc-motor-4-click>
- [8] <https://www.ricmotor.com/details/erm-vibration-motor>
- [9] <https://www.mikroe.com/reed-click>
- [10] <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>

ABSTRACT

This paper presents the firmware solution for the “Device for proper sitting posture” prototype, which gives insight to the users’ posture during sitting. The devices goal is to correct the users posture and thus reduce the back pain which is caused by long sitting hours. The STM32F407 microcontroller, which is on theSTM32F4 Discovery development board, is used for the development of the prototype. Load cells are located on the sitting part of the chair which check the users sitting posture. The outputs of the load cells are connected to the microcontroller through an A/D convertor named HX711. The users’ distance from the back rest of the chair is measured with a Proximity click, while the feedback of the users’ posture is transmitted through a vibromotor which is powered by a DC motor 4 click board.

Measurement and acquisition system for proper sitting posture

Mario Volaš, Dragan Pejić, Marjan Urekar

Razvoj softvera za merenje vremena reakcije na vizuelne i zvučne stimulse

Milica Đorđević, Đorđe Novaković, *Member, IEEE*, Majran Urekar, *Member, IEEE*

Apstrakt—Ovaj rad prikazuje softversku aplikaciju koja služi za merenje vremena reakcije korisnika kod prepoznavanja simbola i tonova. Softver je napravljen za desktop uređaje, gde se od ispitanika očekuje da u što kraćem vremenskom periodu odgovori na svaki stimulus od interesa, nakon čega se izračunava prosečno vreme reakcije na iste. Pritom, arhitektura aplikacije je takva da se beleže i impulsivne reakcije nastale neposredno pre pojave samih stimulusa. U izgradnji ovog softvera korišćen je programski jezik Pajton u razvojnom okruženju Visual Studio Code. Za razvoj korisničkog interfejsa korišćena je PyQt5 biblioteka i Qt Designer.

Ključne reči—Softver; Stimulus; Vizuelna stimulacija; Zvučna stimulacija; Pažnja; Vreme reakcije; Pajton; PyQt5.

I. UVOD

Prvu stepenicu u saznavnom procesu kod čoveka predstavlja opažanje (opservacija) spoljašnjeg sveta, a drugu psihički procesi koji podrazumevaju pamćenje, mišljenje, zaključivanje i druge. Od svih mogućih stimulusa koji u svakom trenutku postoje u polju oko čoveka, samo oni koji su najznačajniji ili najdominantniji u odnosu na njegova interesovanja, namere i ciljeve, bivaju registrovani. Pažnja je bazična psihička funkcija koja omogućava selekciju informacija, usmerenost i usredsređenost psihičke aktivnosti na izvesne sadržaje (predmete, pojave, procese) iz neposredne i dalje okoline. Ona je uslov prijema i obrade informacija.

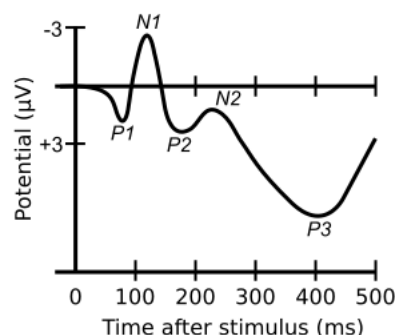
Karakteristika stalnosti ili postojanosti pažnje odnosi se na sposobnost usredsređenosti tokom dužeg vremenskog perioda. Ukoliko je potrebno duže vremena održavati pažnju, na nekom objektu recimo, postoji kolebanje u njenom intenzitetu. Pažnja je dinamična, pa su joj potrebni stalni voljni podsticaji da bi se održala na istoj, i posebno za subjekta neinteresantnoj aktivnosti. Nedostatak pažnje često se javlja među kliničkom populacijom, uključujući one sa poremećajem pažnje sa hiperaktivnošću (ADHD – Attention Deficit Hyperactivity Disorder) i traumatskim povredama mozga (TBI – Traumatic Brain Injury) [1]. Na sreću, pažnja se može tretirati i poboljšati uz odgovarajući kognitivni trening.

U kognitivnoj psihologiji, vremenski interval između predstavljanja stimulusa i pokretanja voljnog motoričkog odgovora naziva se vreme reakcije. Procena vremena reakcije daje predstavu o integritetu i sposobnostima centralnog

nervnog sistema za obradu informacija, a takođe je jednostavan alat za određivanje motoričko-senzornog odnosa kod ispitanika [2]. Komponente pomenutog vremena su: detekcija, identifikacija, odluka i na kraju reakcija.

II. MOTIV I IDEJA

Potencijali vezani za događaje (ERP) su fluktuacije napona koje se snimaju na skalpu i koje su vremenski vezane za događaje. Kao električno polje izazvano protokom informacija u neuronskim mrežama, mere se istim elektronskim uređajima kao EEG. Prošlo je više od pola veka od kada smo prvi put saznali da ređi stimulusi, predstavljeni među češćim, izazivaju u EEG-u pozitivni talas sa tipičnim pikom latence nešto veće od 300 ms (Sl. 1.). Kasnije je utvrđeno da ovaj „zakasneli“ pozitivan potencijal povezan sa događajem, nazvan P300 ili P3, uključuje dve različite komponente, P3a i P3b [3]. Štaviše, pokazalo se čak da ni P3b nije jedinstven talas, već se sastoji od daljih podkomponenti.



Sl. 1. Komponente ERP-a.

Kako je P3 najčešće razmatrana ERP komponenta, a njena tačna struktura je do danas ostala nejasna, došli smo na ideju da smislimo modifikaciju standardnog testa koji se koristi pri snimanju ERP-a (poznatiji kao „Oddball“ paradigma) [4]. Zamisao je da ovaj modifikovani kompjuterizovani test bude predlog za dalje istraživanje podkomponenti i pre svega nađe eksperimentalnu primenu.

Postoji mnogo varijacija testova zasnovanih na Oddball paradigmi, a najčešće se tiču vrste predstavljenih stimulusa. Modifikacija prezentovana u ovom radu ogleda se u dužini vremenskih intervala između određenih događaja, što će dalje biti detaljnije objašnjeno.

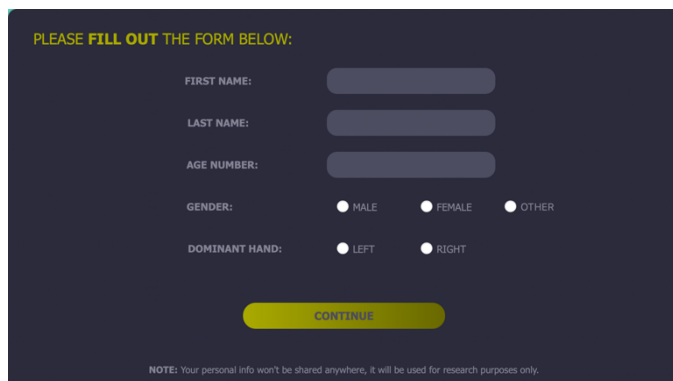
Milica Đorđević – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: milicadjordjevic.mas@gmail.com).

Đorđe Novaković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs).

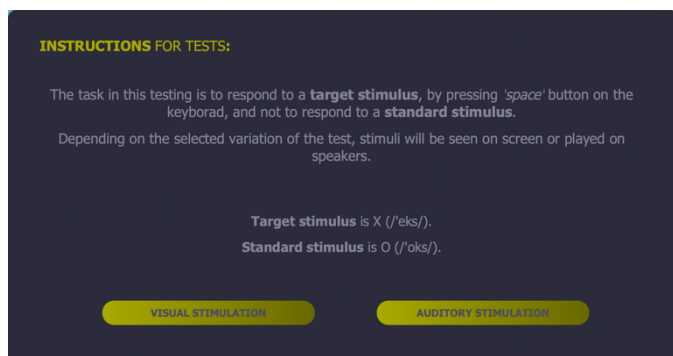
Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

III. OPIS RADA APLIKACIJE

Kroz celu aplikaciju, odnosno sve njene prozore korisniku se daju jasna uputstva za upotrebu, koja ukazuju na ono što se od njega zahteva. Takođe, korisniku je omogućeno da pritiskom na predviđeno dugme prelazi sa jednog prozora na drugi, intuitivno prateći proces ispitivanja. Prolazeći kroz nekoliko prozora grafičkog korisničkog interfejsa, korisnik unosi svoje lične podatke (Sl. 2.), bira jedan od dva ponuđena testa (Sl. 3.), odrađuje test i potom dobija rezultate.



Sl. 2. Prozor sa forma za popunjavanje ličnih podataka.

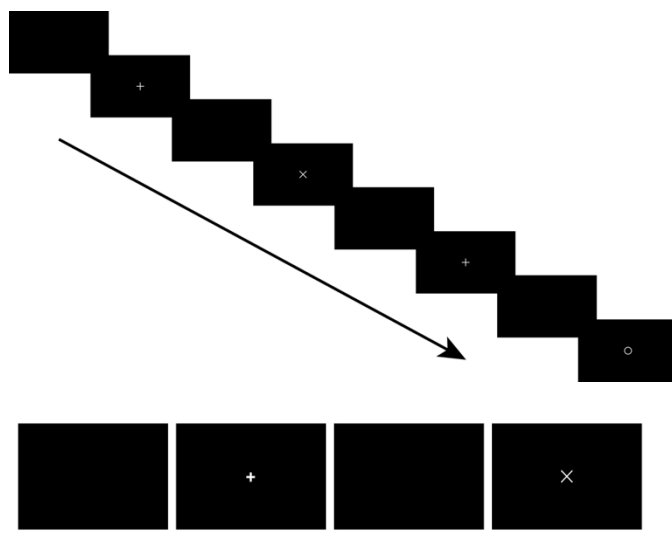


Sl. 3. Prozor sa instrukcijama i izborom testa.

U glavnom delu aplikacije, gde se vrši testiranje, korisnikov senzorni aparat stimuliše se sa 35 stimulusa, vizuelne ili zvučne prirode, od kojih je 24 standardnog karaktera, a 11 devijantnog. Redosled prikazivanja stimulusa je nasumičan. Od korisnika se traži da na svaki devijantni (ređi) stimulus, za koji se u ovoj aplikaciji podrazumeva iks (X), odgovori pritiskom na taster „Space“ na tastaturi računara na kom se vrši testiranje. Pod standardnim (češćim) stimulusom se u ovoj aplikaciji podrazumeva oks (O) i na njega korisnik ne treba da odgovori. Aplikacija meri vreme od generisanja devijantnog stimulusa do korisnikovog odgovora na isti, koje ne bi trebalo da bude duže od 1,5 s. Nakon generisanja svih 35 stimulusa, koristeći zabeležne podatke aplikacija izračunava prosečno vreme koje je korisniku bilo potrebno za davanje adekvatnog odgovora, kao i standardnu devijaciju. Ove vrednosti, zajedno sa ličnim podacima korisnika, smeštaju se u SQL tabelu koja se formira nakon prve upotrebe aplikacije. Svakim narednim testiranjem, dopunjavaće se već postojeća tabela bez kreiranja nove, osim u slučaju da je ona ručno izbrisana ili premeštena iz glavnog direktorijuma programa.

A. Vizuelna stimulacija

Kada se testiranje vrši uz pomoć vizuelne stimulacije, u centru crnog ekrana će se u krug i nasumično prikazivati stimulusi. Osim što je ekran potpuno crn pre i nakon pojavljivanja stimulusa, dodatno se pre svakog stimulusa prikazuje i fiksacioni objekat za fiksiranje pogleda na monitoru. Ovaj fiksacioni objekat se obično implementira u obliku krsta, vodeći računa o odgovarajućem kontrastu u odnosu na pozadinu. Sekvencijalni tok prikazivanja različitih objekata na ekranu može se videti na Sl. 4.



Sl. 4. Primer toka vizuelne stimulacije (gore) i redosled prikazivanja vizuelnih komponenti ispitniku (dole).

B. Zvučna stimulacija

U slučaju testiranja sa zvučnom stimulacijom, umesto prikazivanja iks i oks na ekranu, oni će biti emitovani kao zvučni signali sa zvučnika.

IV. UPOTREBLJENI ALATI

Za realizaciju ove aplikacije korišćen je programski jezik Pajton i njegove biblioteke: PyQt5 [5] i sqlite3 [6].

PyQt5 je sveobuhvatan skup Pajtonovih veza za paket Qt v5, koji omogućava da se Pajton koristi kao alternativa jeziku C++ za razvoj aplikacija na svim podržanim platformama. Uz pomoć pomenute biblioteke i Qt Designer-a napravljen je grafički korisnički interfejs.

Biblioteka sqlite3 korišćena je za kreiranje baze podataka i upisivanje dobijenih vrednosti.

V. STRUKTURA VREMENSKIH INTERVALA

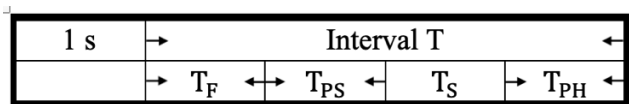
Kako bi se izbeglo formiranje navike kod ispitanika, vremenski intervali između određenih događaja nisu konstantni, već se njihova vrednost generiše kao slučajni parametar između dve granične vrednosti.

Granične vrednosti osnovnog intervala T su 2 s i 4 s, a redom ga sačinjavaju sledeći podintervali (Sl. 5.):

- T_F vreme prikazivanja fiksacionog objekta, graničnih

- vrednosti 200 ms i 600 ms;
- T_{PS} prestimulaciono vreme, graničnih vrednosti 300 ms i 500 ms;
- T_S vreme prezentovanja stimulusa, koje je konstantno i iznosi 200 ms;
- T_{PH} vreme praznog hoda, ono se ne definiše već je posledica prethodno definisanih intervala:

$$T_{PH} = T - T_F - T_{PS} - T_S. \quad (1)$$



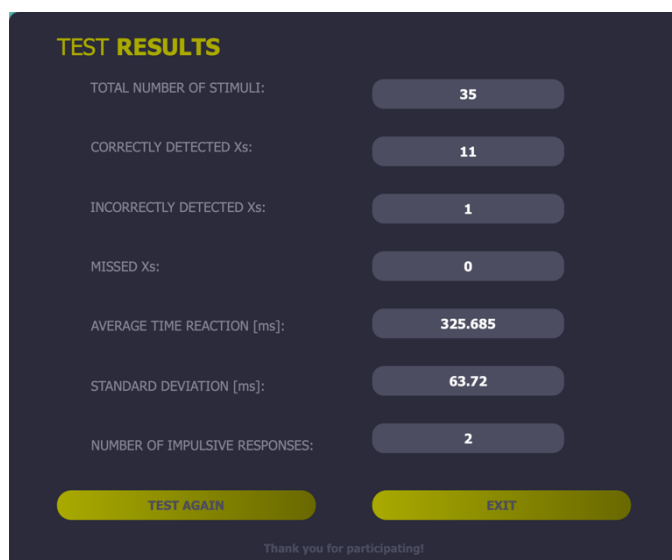
Sl. 5. Prikaz vremenskih intervala

Osnovni intervali odvojeni su jednom sekundom radi lakšeg detektovanja.

VI. REZULTATI

Pored osnovnog zahteva koji podrazumeva izračunavanje prosečnog vremena reakcije na ciljane stimuluse uz standardnu devijaciju, aplikacija beleži još neke bitne podatke (Sl. 6.):

1. broj tačnih odgovora – pritiskanje predviđenog tastera nakon emitovanja devijantnog stimulusa;
2. broj netačnih odgovora – pritiskanje tastera nakon emitovanja standardnog stimulusa;
3. broj propuštenih devijantnih stimulusa – usled isteka vremena koje je predviđeno za odgovor od strane ispitanika;
4. broj impulsnih odgovora – usled pritiskanja tastera tokom prikazivanja fiksacionog objekta ili neposredno pre pojave stimulusa.



Sl. 6. Prozor sa rezultatima testiranja.

Poslednje spomenut podatak predstavlja jednu od inovacija u ovoj vrsti testova, jer može ukazati i na probleme sa impulsivnošću. Takođe, napravljeno je ograničenje kod vremena koje je predviđeno za dobijanje odgovora od strane

ispitanika kako bi se iz razmatranja izuzele ekstremne vrednosti usled slučajnih grešaka.

Srednja vrednost vremena reakcije \bar{x} dobija se deljenjem sume eksperimentalno dobijenih vrednosti x_i sa ukupnim brojem merenja n :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (2)$$

Standardna devijacija s predstavlja meru odstupanja razmatranih vremena reakcije x_i od njihove aritmetičke sredine, odnosno srednje vrednosti \bar{x} , a računa se po sledećoj formuli:

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}}{n - 1}. \quad (3)$$

VII. DISKUSIJA

U odnosu na zamišljene početne ideje i razvoj aplikacije prilagođene za snimanje evociranih potencijala, napravljen je jedan korak u nazad. Odnosno, realizovana je aplikacija koja meri prosečno vreme reakcije uz standardnu devijaciju i još neke indikatore. Ona svakako može naći primenu u eksperimentalnoj praksi kao prvi korak u ispitivanju potencijalnog uticaja promenljivih vremenskih intervala, u ovom slučaju na prosečno vreme reakcije. Takođe, aplikacija je napravljena tako da je korisniku jednostavna za samostalno korišćenje, pa može naći primenu i kao alat za vežbu u različite svrhe.

Ono što bi za početak moglo da se poboljša, kako bi aplikacija išla u zamišljenom pravcu, jeste grafičko prikazivanje rezultata uz markere kada je predstavljen stimulus i kada je korisnik na njega reagovao.

VIII. ZAKLJUČAK

Merenje vremena reakcije ima široku primenu. Koristi se za procenu zdravstvenog stanja osobe, kao i za praćenje stanja pojedinca tokom njegovog svakodnevnog života radi boljeg obavljanja mentalnih aktivnosti, donošenja odluka i planiranja potrebnih za vožnju, bavljenje sportom i druge aktivnosti koje zahtevaju visok fokus i brzinu.

Vreme reakcije usko je povezano sa pažnjom, osnovnom funkcijom koja je neophodna za obavljanje svakodnevnih aktivnosti, među kojima su učenje, pamćenje, percepcija i rešavanje problema. Zbog toga se pažnja smatra polaznom kognitivnom funkcijom koja ako je oslabljena može dovesti do deficita u drugim kognitivnim domenima.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : „Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena

delatnosti FTN-a“.

LITERATURA

- [1] L. Penkman, „Remediation of attention deficits in children: A focus on childhood cancer, traumatic brain injury and attention deficit disorder“. *Paediatric Rehabilitation*, no. 7, 111-123, year 2004.,
- [2] G. K. Lofthus, „Sensorimotor performance and limb preference“, *Percept Mot Skills*, 683-693, year 1981.,
- [3] J. Polich, „Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b“, *Clin. Neurophysiol.*, year 2007.,
- [4] B. Bišević, „Varijabilnost amplitude kognitivnog evociranog P300 potencijala dobijenog auditornom oddball paradigmom“, Medicinski fakultet, Univerzitet u Prištini, 2015. godine,
- [5] Python Package Index, "PyQt5" [Online]. Available: <https://pypi.org/project/PyQt5/>,
- [6] Python Documentation, „sqlite3“ [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/sqlite3.html>.

ABSTRACT

This paper presents a software application that is used to measure user's reaction time when recognizing symbols and tones. The software is made for desktop devices, where respondents are expected to respond to stimulus of interest in the shortest possible time, after which average reaction time is calculated. At the same time, the architecture of the application is such that impulsive reactions that occurred just before the appearance of the stimulus are also recorded. The Python programming language was used for building the application in Visual Studio Code development environment. The PyQt5 library and Qt Designer were used to develop the graphical user interface.

Software development for measuring reaction time to visual and audio stimuli

Milica Djordjevic, Djordje Novakovic, Marjan Urekar

Projektovanje univerzalne razvojne ploče za merenje i regulaciju

Ninoslav Srdić, Marjan Urekar, Dragan Pejić, Platon Sovilj

Apstrakt—Ovaj rad opisuje projektovanje univerzalne razvojne ploče za merenje fizičkih veličina i regulaciju, na bazi AVR atmega32u4 mikrokontrolera. Prikazana je blok šema uređaja, šematici pojedinačnih blokova i navedeni su primeri primene ove razvojne ploče.

Ključne reči: univerzalna razvojna ploča; mikrokontroler; industrijski senzori

I. UVOD

Prilikom razvoja novog proizvoda, dok još ideja i tehničko rešenje nisu sasvim formirani i da bi nam početak razvoja bio lakši i ekonomski efikasniji, potreban nam je hardverski razvojni alat. Iako nije neuobičajeno da pravimo revizije hardvera, uvek je bolje da prvo svoju ideju proverimo na postojećoj platformi, odnosno na takozvanoj univerzalnoj razvojnoj ploči.

Ovaj rad ukratko objašnjava projektovanje univerzalne razvojne ploče za potrebe laboratorijskih vežbi na fakultetu kao i za prototipovanje proizvoda. Na tržištu već postoji mnoštvo ovakvog hardvera sa različitim kontrolerima, periferijama, različitim dimenzijama i cena. Prednost ove ploče jeste što nudi dosta periferija u odnosu na druge ploče sa ATmega32u4 kontrolerom i to u kompaktnom formatu.

Ova razvojna ploča omogućava korisnicima da koriste različite industrijske senzore sa logičkim izlazom, termopar K tipa za merenje temperature, ulazima na koja se mogu dodati spoljašnji razdelnici napona za različita analogna merenja i da se sve to može programirati u Arduino okruženju ili pristupiti i programirati iz Labview-a, tj. okruženja koja su studentima već poznata.

Ideja je da se od jedne kompaktne ploče mogu razviti uređaji za različite primene (npr. temperaturni regulator, merenja nekih fizičkih veličina, prenos izmerenih vrednosti preko serijske komunikacije RS485 i prikaz tih podataka na Labview SCADA sistemu) i da se ovaj sklop može primeniti za vežbe iz različitih predmeta na fakultetu, a da nije neophodno dodatno napajanje osim konekcije sa računarom.

Marjan Urekar – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: urekarm@uns.ac.rs).

Platon Sovilj – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: platon@uns.ac.rs).

Dragan Pejić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs).

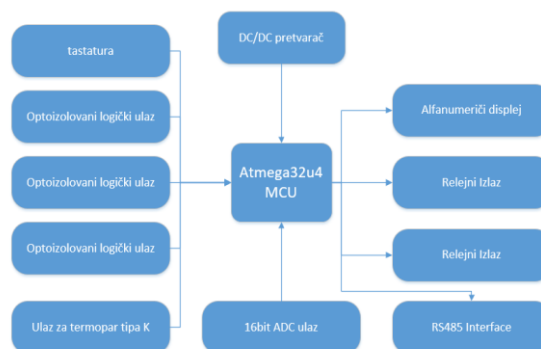
Ninoslav Srdić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: ninosrdicd@gmail.com)

Primena ove razvojne ploče su predmeti koji se bave merenjem, embedded programiranjem i Labview okruženjem ili kao platforma za razvoj softvera za *embedded* aplikacije.

II. DIZAJN SKLOPA

Postavljen je zahtev da se napravi razvojna ploča koja će moći da se koristi sa industrijskim sensorima sa tranzistorskim izlazima, odnosno sa sensorima koji na svom izlazu daju logičku vrednost, kao i sensorima za merenje analognih vrednosti i jedan ulaz za merenje temperature termoparom tipa K. Za izvršavanje komande razvojna ploča ima dva relejna izlaza, a za prikazivanje merenih vrednosti alfanumerički displej kao i mogućnost slanja podataka serijskom komunikacijom. Takođe na ploči imamo četiri tastera. Još jedan od zahteva je da se ploča napaja sa 5 V a za potrebe napajanja industrijskih senzora potreban je napon od 24 Vdc, pa je napravljen *Step-up* pretvarač (*converter*).

Prvi korak prilikom dizajna celog sklopa je bio da se napravi blok dijagram, gde su objedinjeni svi zahtevi pa su na osnovu toga izabrane komponente.



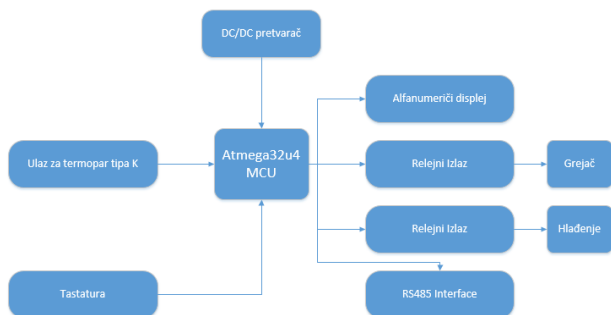
Sl. 1. Blok šema celog sklopa

Kao što se na blok šemi može videti razvojna ploča se sastoji od:

- Tri optoizolovana logička ulaza za industrijske senzore
- AD konvertor sa dva ulaza za analogna merenja
- Ulaz za termopar sa pretvaračem koji vrši kompenzaciju hladnog kraja, kao i linearizaciju karakteristike termopara i AD konverziju
- DC/DC boost pretvarač sa 5 V na 24 V
- Dva relejna izlaza
- Alfanumerički displej
- RS485 interface
- Četiri programibilna tastera

Primeri primena:

A. Temperaturni regulator



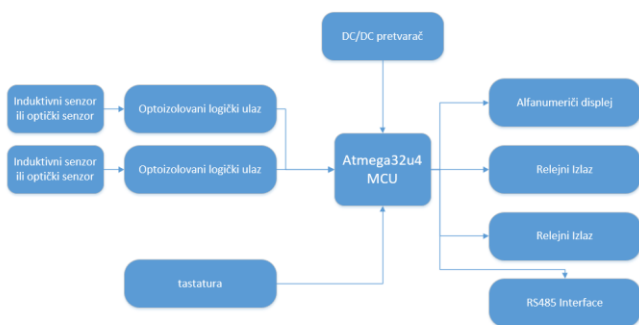
Sl. 2. Blok šema temperaturnog regulatora

Na slici 2. je prikazana blok šema temperaturnog regulatora koji se može napraviti uz korišćenje ove razvojne ploče. Na ulazu razvojne ploče možemo povezati termopar tipa K. Na relejne izlaze možemo povezati grejač i sistem za hlađenje.

Alfanumerički displej nam pruža mogućnost prikaza temperature i zadatih parametara. Tasterima dobijamo mogućnost promene parametara odnosno zadavanje graničnih vrednosti temperature. Na računaru možemo grafički predstaviti vrednosti promene temperature po vremenu, slanjem podataka preko RS485 komunikacije.

Ovakav sistem bi imao primenu za održavanje temperature alata prilikom brizganja plastike.

B. Brojač komada

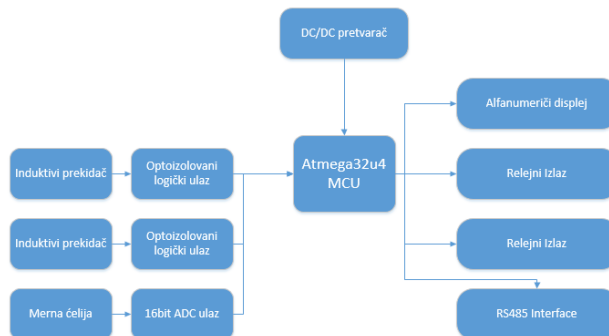


Sl. 3. Blok šema brojača komada

Na slici 3. se može videti drugi primer primene (brojač komada). Induktivnim senzorima ili optičkim prekidačima na ulazu detektujemo prolazak komada ili neke referentne tačke za brojanje (npr. istureni vijak na osovini). U zavisnosti od redosleda okidanja senzora možemo da uvećavamo ili smanjujemo izbrojane vrednosti i to da predstavimo na displeju. Relejne izlaze možemo koristiti za uključivanje ili

isključivanje pogona nakon postizanja zadatih vrednosti.

C. Vaga za doziranje



Sl. 4. Blok šema vage za doziranje

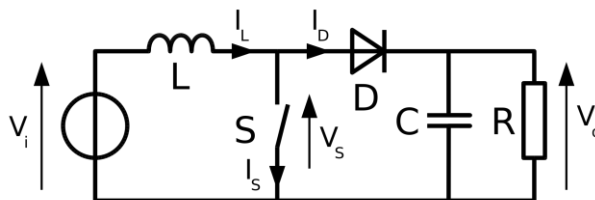
Još jedna primena razvojne ploče jeste razvoj softvera za vagu za doziranje praškastih ili zrnastih proizvoda (Sl. 4.). Na ulazu AD konvertora imamo mernu ćeliju pomoću koje merimo masu, a relejne izlaze možemo iskoristiti za grubo i fino doziranje, tj. za otvaranje veće i manje klapne na košu vage. Induktivni prekidači nam služe za detektovanje položaja klapne. Na alfanumeričkom displeju prikazujemo izmerenu i zadatu vrednost i grešku doziranja.

III. TEHNIČKO OBJAŠNENJE

Jedan od bitnih zahteva projekta, jeste mogućnost da se mikrokontroler može programirati preko Arduino okruženja, pa je na osnovu toga izabran kontroler iz AVR familije. Za ostale komponente napravljena je excel tabela sa nekim od ključnih parametara, kao i cene komponenti. Potom je sagledano koje komponente su optimalne u odnosu na cenu i karakteristike.

Nakon odabira ključnih komponenti i njihove dokumentacije sledi crtanje električne šeme, gde je korišten alat po imenu Altium Designer.

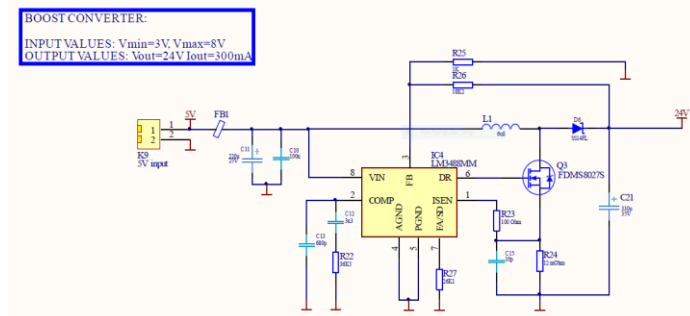
Za projektovanje DC/DC pretvarača korišten je alat Texas Instruments Power Designer, gde se definišu potrebni parametri i topologija pretvarača, a alat potom sam izračuna vrednosti komponenti.



Sl. 5. Blok šema Boost pretvarača

Na slici 5. prikazan je primer pretvarača, podizачa napona (*Boost converter*).

U ovoj topologiji pretvarača, za prebacivanje energije iz jednosmernog izvora nižeg napona ka opterećenju na kome je viši napon, koristi se magnetna energija kalema. Kada je prekidač zatvoren, struja izvora protiče kroz kalem L i prekidač S . Tada kalem skladišti energiju u svom magnetnom polju. Otvaranjem prekidača, struja kalema, koja je jednaka struji izvora počinje da pada. Pošto se kalem suprotstavlja promeni struje, dolazi do porasta napona u kalemu. Upravo ovaj efekat se koristi za podizanje napona u *boost* pretvaraču.

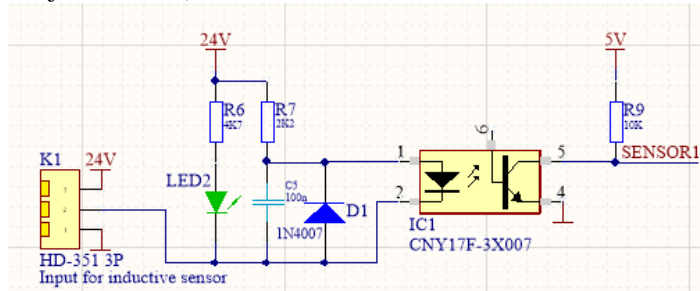


Sl. 6. Šema Boost pretvarača

Optički izolovan logički ulaz na slici 7. namenjen je za priključivanje industrijskih senzora sa logičkim izlazom. Optokapleri se koriste radi galvanskog odvajanja dva dela kola, tj. kao dodatani vid zaštite.

Pošto je za napajanje industrijskih senzora uglavnom potreban napon od 24 V, na ovaj ulaz je doveden napon sa *step-up* (*boost*) pretvarača.

Ukoliko želimo da imamo galvanski odvojen ulaz, ne smemo koristiti napajanje USB porta, nego koristimo posebno napajanje od 5 V (prethodno se mora skinuti *jumper* H2 vidljiv na Sl. 11.).



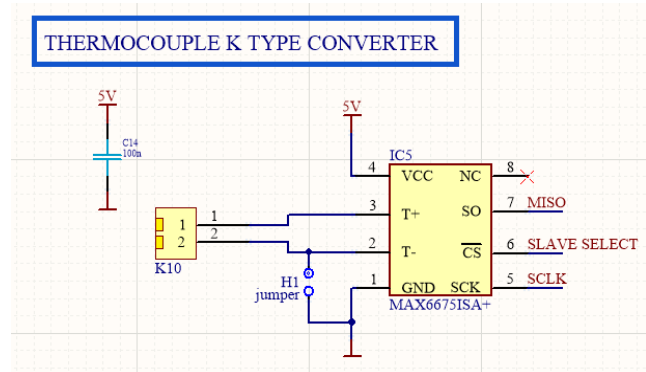
Sl. 7. Optički izolovan ulaz

Ulaz za termopar (Sl. 8.) je omogućen uz pomoću MAX6675 pretvarača. Termopar tipa K nije linearan, pa je pored pojačavanja ulaznog signala potrebno i linearizovati isti. Ovaj pretvarač u sebi ima kompenzaciju hladnog kraja u opsegu od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, linearizaciju signala i 12-bitni AD konvertor. MAX6675 omogućava veoma jednostavno merenje temperature termoparom tipa K, pošto na SPI izlazu dobijamo tačno izmerenu vrednost temperature.

Rezolucija ovog pretvarača je $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ i može se koristiti za merenja temperature do $+1024\text{ }^{\circ}\text{C}$.

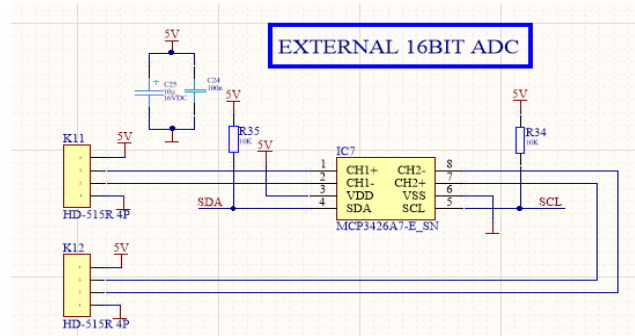
U ovom projektu koristimo napajanje od 5 V.

Podatke mikrokontroleru šaljemo pomoću SPI komunikacije.



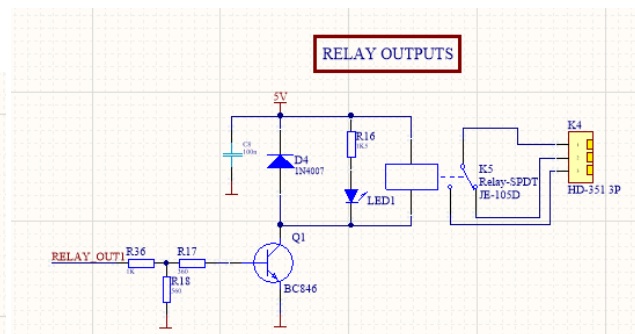
Sl. 8. Ulaz za termopar

Sklopu je dodat i 16-bitni eksterni ADC (Sl. 9.) jer je ADC u mikrokontroleru 12-bitne rezolucije. Ovaj AD konvertor ima dva kanala, a sa mikrokontrolerom komunicira preko I2C-a.



Sl. 9. ADC ulaz

Na slici 10. se može videti primer relejnog izlaza, preko koga se može povezati neki izvršni element veće snage.

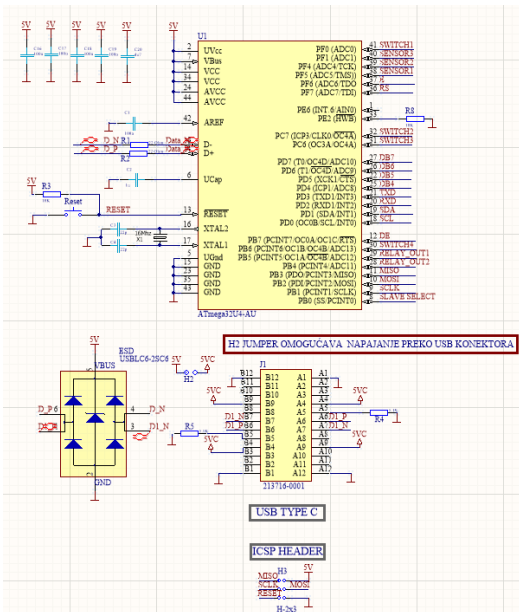


Sl. 10. Relejni izlaz

Na slici 11. se može videti 8-bitni, RISC mikrokontroler, Atmega32u4 sa malom potrošnjom struje, eksterni kristal od 16 MHz, ESD zaštita u vidu kola USBLC6 i USB type-C konektor.

Napajanje mikrokontrolera je od 2.7 V - 5.5 V.

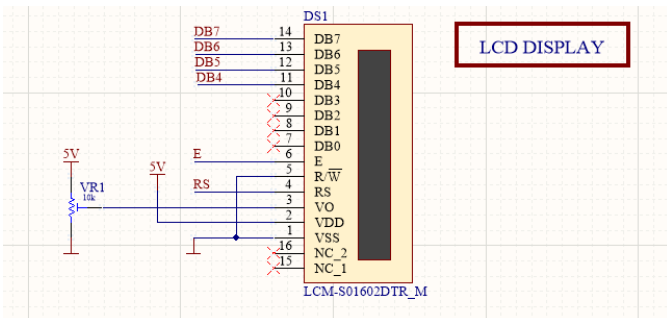
Odučili smo se za ovaj mikrokontroler jer je on odlična platforma za studente, hobiste i brzo prototipovanje zbog postojanja mnoštva *open-source* primera programa i kompatibilan je sa Arduino okruženjem. Još jedna prednost ovog mikrokontrolera jeste što se može programirati preko USB priključka.



Sl. 11. Mikrokontroler

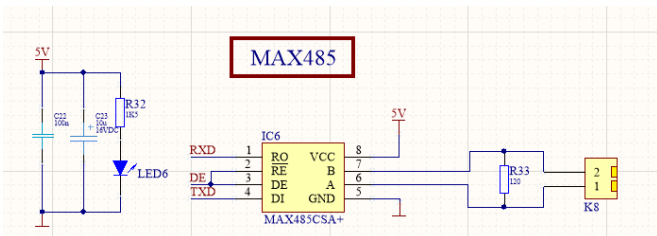
Slika 12. pokazuje alfanumerički displej 2x16 karaktera. Komunikacija mikrokontrolera sa displejom je omogućena u 4-bit modu, kako bi smanjili broj potrebnih pinova na mikrokontroleru.

Da bi prikazali karakter na displeju u 4-bit modu, potrebna su dva ciklusa, tj. prvo se šalju viša 4 bita a potom preostala niža 4 bita.



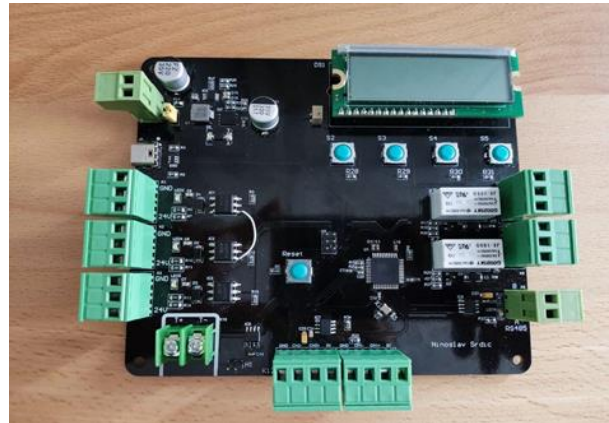
Sl. 12. Displej

Na slici 13. se može videti deo šeme za RS485 komunikaciju. Projekat je osmišljen tako da se merene vrednosti mogu prikazati na displeju na ploči, ali takođe da se razvojna ploča može povezati sa računarom i da se preko RS485 komunikacije pošalju podaci na SCADA sistem.



Sl. 13. RS485 komunikacija

Na sledećoj slici se može videti gotova razvojna ploča.



Sl. 14. Gotov sklop

U ovom projektu korištena je četvoroslojna štampa zbog boljih EMC karakteristika ("Elektromagnetna usaglašenost"). Svi električni uređaji utiču jedni na druge kada su ili međusobno povezani ili postavljeni u blizini. Zahtevi EMC-a su tako koncipirani da se ova sporedna dejstva svedu na minimum.

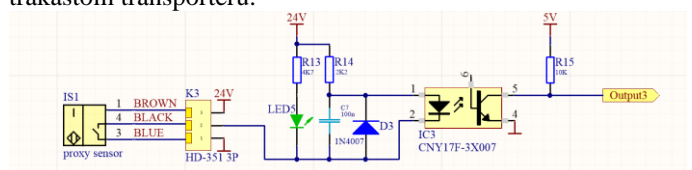
IV. PRIMER VEŽBE

Cilj prve vežbe jeste da se napravi prosto *flip-flop* prekidačko kolo.

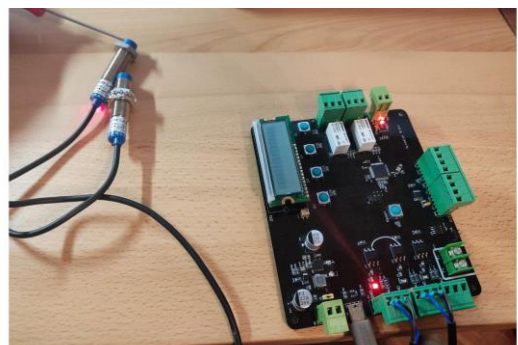
Na optički izolovane ulaze povezali smo dva induktivna senzora sa NPN tranzistorskim izlazom. U svrhe ove vežbe nisu nam neophodni galvanski odvojeni ulazi, pa ceo sklop napajamo preko USB priključka.

Program za razvojnu ploču je napisan u *Microchip Studio* okruženju tako da jedan induktivni senzor uključuje oba relejna izlaza, jedan u momentu detektovanja a drugi sa zakašnjenjem. Drugi induktivni senzor isključuje oba relejna izlaza, jedan u momentu detektovanja a drugi sa zakašnjenjem.

Vežba je namenjena za kontrolu elektromotora na trakastom transporteru.



Sl. 15. Šema povezivanja senzora



Sl. 16. Primer vežbe

V. ZAKLJUČAK

Nakon sklapanja i testiranja uređaja došli smo do zaključka da je projekat opravdao očekivanja i da se uspešno može primeniti za razvoj različitih merno-regulacionih uređaja. U sledećoj iteraciji bi se mogao dodati drajver za koračni motor, DA konvertor, sat realnog vremena i da se na optoizolovanom ulazu mogu dodati kratkospojnici za izbor senzora sa tranzistorskim NPN ili PNP izlazom.

Prednost ovakve razvojne ploče jeste jednostavnost priključivanja periferija i relativno jednostavno programiranje.

Mana ove ploče je što nema mogućnost daljeg proširenja periferija.

Zahvalnica

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehnickih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : "Inovativna naucna i umetnicka isptivanja iz domena delatnosti FTN-a".

Literatura

- [1] Carl Nelson & Jim Williams, "Boost Converter Operation",LT1070 Design Manual,
- [2] EGProjects, "Lcd in 4 bit mode and 8 bit mode"
- [3] Warwick A. Smith, "C programiranje za Arduino", 2016.
- [4] Paul Horwitz & Winfield Hill, "The Art of Electronics", 2003.
- [5] Fang Lin Luo & Hong Ye, "Advanced DC/DC Converters", 2004.
- [6] Ian R. Sunclair, "Sensors and Transducers", 2001.

ABSTRACT

This paper explains the design and making of a universal development board for measurements and regulation, based on the ATmega32u4 microcontroller. Block diagrams are also shown, as well as schematics of these block and even examples of how this board could be used in practice.

Designing a universal development board for industrial sensors

Ninoslav Srđić, Marjan Urekar, Dragan Pejić, Platon Sovilj

Merni sistem za detekciju padova zasnovan na akcelerometru, žiroskopu i GPS modulu

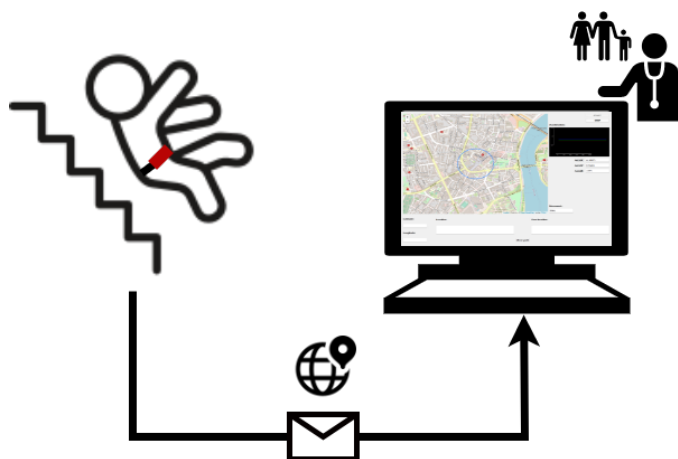
Sanja Mandić, Đorđe Novaković

Apstrakt—U ovom radu opisan je sistem za detekciju pada, sa ciljem pomoći starim i nemoćnim licima. Kroz rad je dat uvid u sve delove realizovanog sistema za detekciju pada. Sistem podrazumeva prikupljanje podataka o kretanju korisnika upotrebom akcelerometra i žiroskopa, prikupljanje podataka o lokaciji korisnika upotrebom GPS modula, klasifikaciju kretanja i detekciju pada, kao i prikaz informacija u okviru odgovarajućeg korisničkog interfejsa.

Ključne reči— Detekcija pada; mikrokontroler; GPS; akcelerometar; žiroskop; mašinsko učenje; klasifikacija

I. UVOD

Padovi su česte pojave kod starijih osoba usled različitih faktora kao što su gubitak oslonca, nesvestica, moždani ili srčani udar, poremećaji čula vida, slabost u mišićima, demencija i deformacija kičmenog stuba. Starenje za posledicu ima i nesposobnost da se na iznenadne promene položaja tela reaguje pravovremeno i da se održi ravnoteža, što značajno povećava verovatnoću pada kod starijih osoba. Istraživanja su pokazala da jedna trećina populacije starije od 65 godina doživi pad jednom ili više puta u toku jedne godine. Padovi predstavljaju jedan od vodećih uzroka povreda, preloma, gubitka mobilnosti i smrtnih ishoda izazvanih nezgodama kod starijih osoba. Kako bi se izbegle teške povrede usled padova, pa i fatalni ishodi padova, pravovremeno pružanje medicinske pomoći povređenoj osobi je od izuzetnog značaja. Teške posledice koje padovi mogu da izazovu kod starijih osoba i potreba za trenutnim pružanjem pomoći osobama koje su pretrpele pad dovele su do velikog broja istraživanja u oblasti uređaja za detekciju pada i praćenja kretanja.

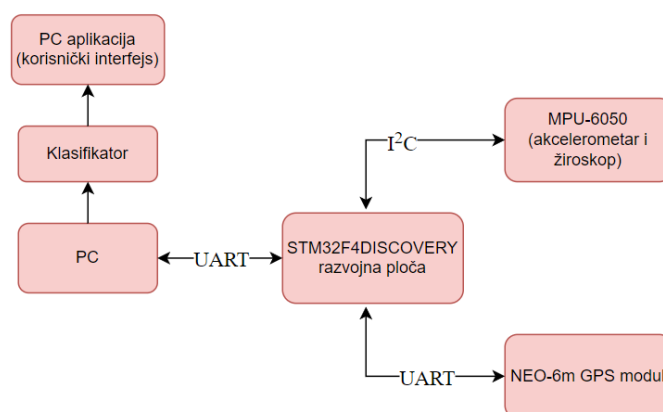


Slika 1. Ilustracija sistema za detekciju pada

Sanja Mandić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: sanja.mandic@uns.ac.rs).

Đorđe Novaković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs).

Cilj ovog rada je izrada prototipa sistema za detekciju pada koji bi služio kao pomoć starijim licima, a ilustracija ovakvog sistema prikazana je na slici 1. Kretanje korisnika prati se pomoću akcelerometra i žiroskopa MPU-6050 senzorskog modula. Na osnovu veličina prikupljenih datim sensorima izdvaja se vektor obeležja koji se prosleđuje prethodno obučenom modelu klasifikatora. Model vrši klasifikaciju uzorka u jednu od pet klasa - pad unapred, pad u stranu, sedenje, stajanje ili hodanje. Ukoliko je kretanje okarakterisano kao pad unapred ili pad u stranu, putem korisničkog interfejsa se prikazuje lokacija korisnika na osnovu podataka prikupljenih GPS modulom. Sensorski moduli sistema integrisani su na STM32F4DISCOVERY razvojnoj ploči, koja sadrži STM32F407VGT mikrokontroler. Blok dijagram realizovanog sistema prikazan je na slici 2.



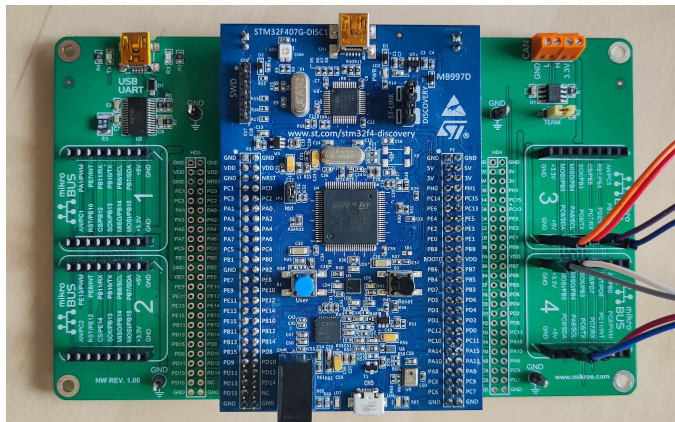
Slika 2. Blok dijagram sistema za detekciju pada

II. HARDVERSKE KOMPONENTE SISTEMA ZA DETEKCIJU PADA

A. STM32F4DISCOVERY razvojna ploča

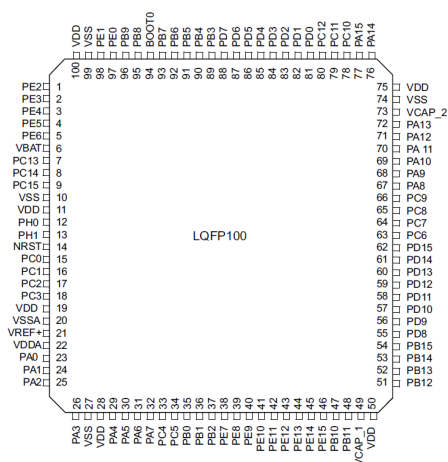
STM32F4DISCOVERY razvojna ploča (slika 3) je proizvod kompanije *STMicroelectronics*, koja na sebi integriše 32-bitni STM32F407VGT mikrokontroler. STM32F4DISCOVERY ploča sadrži mikro USB (*Universal Serial Bus*) AB konektore, pomoću kojih se ostvaruje veza računara i date razvojne ploče. U sistemima koji podrazumevaju 32-bitne STM mikrokontrolere zastupljen je USB full-speed interfejs za komunikaciju sa računarom. Na ploči se nalazi ST-LINK/V2-A kolo za programiranje i debugovanje mikrokontrolera. ST-LINK/V2-A komunicira sa STM 32-bitnim mikrokontrolerom putem SWIM (*Single Wire Interface Module*) interfejsa, odnosno, putem JTAG ili SWD (*Serial Wire Debugging*) interfejsa. Ploču je moguće napajati na nekoliko različitih načina - putem ST-LINK veze, putem USB konektora ili putem eksternih izvora napajanja. Na ploči se nalazi osam indikatorskih LED (*Light Emitting Diode*) - za USB komunikaciju, za napajanje od 3,3 V, četiri korisničke LED (narandžasta, zelena, crvena i plava) i dve LED za USB OTG (*On The Go*) interfejs. Na razvojnoj ploči nalaze se reset taster, kao i korisnički taster. Dodatno, data razvojna ploča sadrži MEMS (*Micro Electronic*

Mechanical Systems) omni-direkcionni digitalni mikrofon, audio DAC (Digital to Analogue Converter), konektor za slušalice, kao i MEMS digitalni akcelerometar [1]. STM32F4DISCOVERY razvojna ploča postavljena je na STM32F4 Discovery Shield, kompanije MikroElektronika, u cilju lakšeg povezivanja sa senzorskim modulima.



Slika 3. STM32F4DISCOVERY razvojna ploča na STM32F4 Discovery Shield-u

Mikrokontroler STM32F407VGT nalazi se u okviru STM32DISCOVERY razvojne ploče u LQFP100 pakovanju sa sto pinova, čiji je prikaz dat na slici 4. STM32F407VGT sadrži ARM 32-bit Cortex CPU (Central Processing Unit). Kapacitet FLASH memorije datog mikrokontrolera je 1 MB, dok je kapacitet SRAM (Static Random-Access Memory) memorije 192 kB. Napon napajanja mikrokontrolera je u opsegu od 1,8 V do 3,6 V. Interni oscilator STM32F407VGT mikrokontrolera obezbeđuje frekvenciju takta od 16 MHz, a osim internog oscilatora, mikrokontroleru je moguće dovesti i spoljašnji izvor takta frekvencije od 4 MHz do 26 MHz. Signal takta vodi se na PLL (Phase Locked Loop), čime je obezbeđeno povećanje frekvencije do 168 MHz. STM32F407VGT sadrži tri 12-bitna ADC (Analog to Digital Converter) i dva DAC. Dati mikrokontroler sadrži dvanaest 16-bitnih tajmera i dva 32-bitna tajmera. Mikrokontroler sadrži tri SPI (Serial Peripheral Interface), dva CAN (Controller Area Network) i tri I²C (Inter-Integrated Circuit) komunikaciona interfejsa, dok je broj USART (Universal Synchronous/Asynchronous Receiver Transmitter) modula mikrokontrolera šest [2].

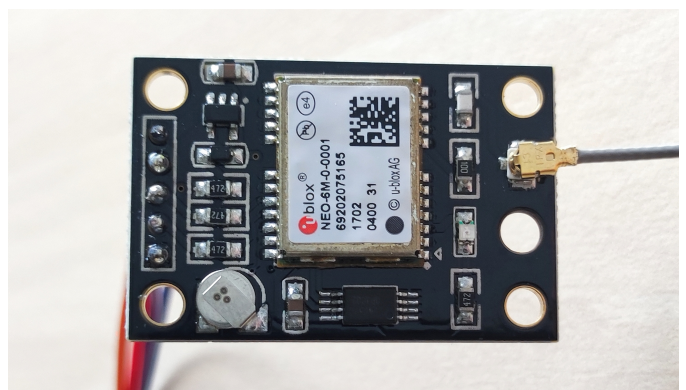


Slika 4. Pinovi STM32F407VGT mikrokontrolera

Odgovarajući firmver za STM32F407VGT mikrokontroler i čipove senzora napisan je u STM32CubeIDE razvojnom okruženju.

B. NEO-6m GPS modul

NEO-6m predstavlja GPS modul koji omogućava primanje podataka sa GPS (Global Positioning System) satelita. Dati modul sadrži kristalni oscilator. NEO-6m modul sadrži UART, USB, DDC (Display Data Channel) i SPI komunikacione interfejse. NEO-6m čip predstavlja prijemnik sa 50 kanala. Podaci se prenose kao kodirane poruke, definisane određenim protokolima. Jedan od protokola koji je podržan na NEO-6m GPS modulu jeste NMEA (National Marine Electronics Association) protokol. Svaka linija podataka koja se prenosi na ovaj način naziva se rečenicom, a sve sadrže specifične podatke o lokaciji. Neke od NMEA rečenica koje se mogu primiti putem NEO-6m prijemnika su GLL (Position Data), RMC (Recommended Minimum Sentence) i GGA (Global Positioning System Fix Data). U realizovanom sistemu za detekciju pada upotrebljene su GGA NMEA rečenice, koje sadrže podatke kao što su vreme, geografska širina, geografska dužina, broj satelita i nadmorska visina [3], [4].



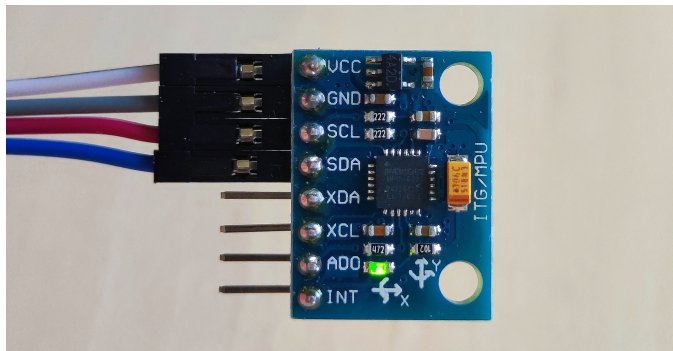
Slika 5. NEO-6m GPS modul

Senzorski modul NEO-6m je povezan sa mikrokontrolerom STM32F407VGT posredstvom mikroBUS 3 socket-a STM32F4 Discovery Shield-a. Razmena podataka između NEO-6m i mikrokontrolera vrši se putem UART komunikacionog interfejsa, a brzina prenosa podataka je 9600 bps. Pin za prijem podataka (RX) NEO-6m povezan je na PC6 pin mikrokontrolera, koji odgovara predajnoj liniji njegovog USART 6 modula. Pin za slanje podataka (TX) NEO-6m povezan je na odgovarajući prijemni pin USART 6 modula mikrokontrolera, odnosno, na pin PC7. Na pločicu sa NEO-6m čipom dovodi se napajanje od 5 V, preko VCC pina, dok je GND pin povezan na GND pin mikroBUS 3 socket-a STM32F4 Discovery Shield-a.

C. MPU-6050 senzor

MPU-6050 senzor na pločici GY-521 (slika 6) integriše MEMS akcelerometar sa tri ose, MEMS žiroskop sa tri ose i DMP (Digital Motion Processor). Ovaj senzor koristi I²C komunikaciju sa mikrokontrolerom razvojne ploče (pinovi SCL – clock i SDA – podaci). MPU-6050 čip sadrži tri 16-bitna ADC za podatke svake ose akcelerometra i tri 16-bitna ADC za podatke svake ose žiroskopa. Podaci sa senzora o sve tri ose, x, y i z, prikupljaju se istovremeno, a MPU-6050 sadrži adekvatne read-only registre u koje se smeštaju vrednosti sa senzora i kojima se pristupa putem serijskog interfejsa. Opseg pune skale za žiroskop može biti ± 250 °/s, ± 500 °/s, ± 1000 °/s i ± 2000 °/s, dok su vrednosti za opseg pune skale akcelerometra ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g i ± 16 g ($g = 9,81$ m/s²). Čip sadrži FIFO (First In First Out) bafer od 1024 bajta, koji služi za privremeno skladištenje

izlaznih podataka, a korisnik može da bira koje podatke će skladištiti u baferu. Dodatno, MPU-6050 čip sadrži oscilator, kao i temperaturni senzor [5].



Slika 6. Senzor MPU-6050 na GY-521 pločici

Za datu primenu MPU-6050 je konfigurisan tako da je opseg pune skale akcelerometra ± 8 g, opseg pune skale žiroskopa ± 2000 $^{\circ}/s$, a frekvencija odabiranja je 1 kHz. Pinovi GY-521 pločice povezani su na pinove mikrokontrolera posredstvom STM32 Discovery Shield-a. Pinovi Vcc i GND GY-521 povezani su na 3,3 V i GND mikroBUS 4 socket-a STM32 Discovery Shield-a, dok su SDA i SCL pin sa GY-521 povezani na odgovarajuće pinove mikroBUS 4 socket-a za I²C komunikaciju, koji odgovaraju pinovima PC9 i PA8 mikrokontrolera, redom.

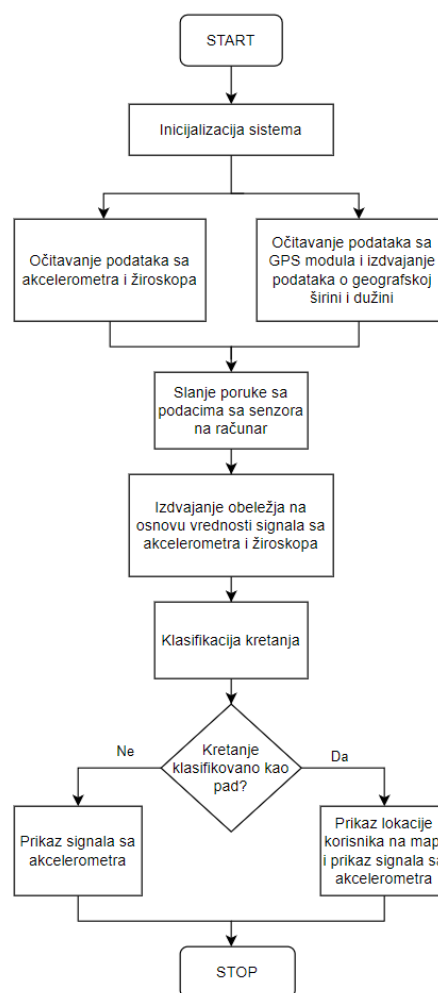
III. SOFTVER SISTEMA ZA DETEKCIJU PADA

Kako bi bila omogućena razmena podataka i obaveštenje odgovornog lica o padu korisnika uređaja kreiran je grafički korisnički interfejs upotrebom Python programskog jezika. Na slici 7 prikazan je izgled aplikacije po pokretanju programa. U okviru kreiranog korisničkog interfejsa, u gornjem desnom uglu omogućen je prikaz signala sa akcelerometra, po x, y i z osi, kao i ispis trenutnih vrednosti ubrzanja za sve tri ose (polja AccelX, AccelY i AccelZ). Takođe, omogućen je prikaz mape, na kojoj se prikazuje lokacija korisnika uređaja. U polja označena sa Latitude, Longitude i Location ispisuju se podaci o geografskoj širini, geografskoj dužini i lokaciji korisnika uređaja, ukoliko dođe do pada. Korisničkim interfejsom omogućen je unos lokacije odgovornog lica i prikaz najkraće putanje do lokacije na kojoj se nalazi osoba koja je pala. U dodatnom polju, označenom kao Movement, prikazuje se jedna od pet mogućih radnji (stajanje, sedenje, hodanje, pad unapred, pad unazad), određena na osnovu signala sa akcelerometra i žiroskopa.



Slika 7. Izgled aplikacije po pokretanju

Na slici 8 prikazan je tok izvršavanja programa koji obuhvata inicijalizaciju hardverskih komponenti, slanje podataka sa mikrokontrolera, prijem, obradu i prikaz podataka na računaru, kao i klasifikaciju kretanja. Inicijalizacija sistema podrazumeva konfiguraciju odgovarajućih modula mikrokontrolera, kao i senzorskih modula. Nakon inicijalizacije svih celina neophodnih za rad sistema vrši se simultano očitavanje podataka sa akcelerometra MPU-6050, žiroskopa MPU-6050 i NEO-6m GPS modula. Kako bi se formirala odgovarajuća poruka koja se šalje na računar vrši se obrada podataka sa senzora. Obrada podataka podrazumeva konverziju sirovih vrednosti sa akcelerometra i žiroskopa u vrednosti izražene u vidu umnožaka ubrzanja Zemljine teže g - akcelerometar, i $^{\circ}/s$ - žiroskop. Takođe, proces obrade podataka podrazumeva parsiranje NMEA GGA rečenica, koje se prikupljaju sa GPS modula, i izdvajanja podataka od interesa iz njih. U sistemu za detekciju pada od interesa su elementi GGA rečenice koji daju podatke o geografskoj širini i dužini, kao i o odgovarajućim hemisferama. Obradeni podaci šalju se na računar putem UART komunikacionog modula u vidu poruka sledećeg formata: <ax|ay|az|gx|gy|gz|geografska širina|hemisfera|geografska dužina|hemisfera|>.



Slika 8. Algoritam izvršavanja programa za detekciju pada

Pritiskom na taster START u aplikaciji, vrši se konfiguracija serijskog porta, započinje komunikacija računara i mikrokontrolera i iscrta se mapa sa referentnom lokacijom. Podaci o ubrzanju po x, y i z osi se izdvajaju iz pristigle poruke i iscrtavaju na odgovarajućem grafiku u aplikaciji (slika 9).

IV. KLASIFIKACIJA KRETANJA

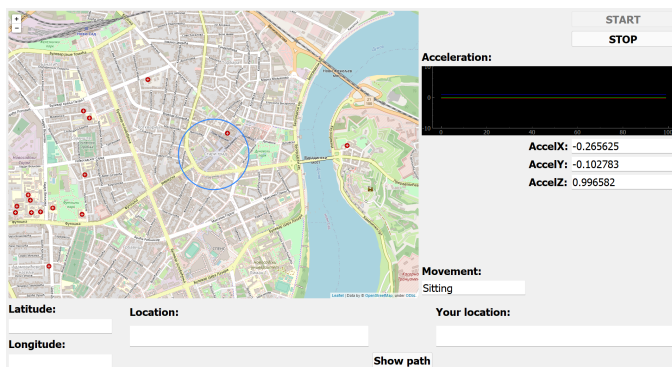
A. Baza podataka

Bazu podataka čini 332 uzorka, a svaki uzorak opisan je pomoću 20 obeležja. Uzorak predstavlja prozor dužine 100 odbiraka. Dakle, kroz signale koji su prikupljeni sa akcelerometra i žiroskopa, prolazi se prozorom dužine 100 odbiraka, tako da je preklapanje dva susedna prozora 50 %. Za jedan prozor računaju se srednja, maksimalna i minimalna vrednost za signale sa akcelerometra po x, y i z osi, srednja, maksimalna i minimalna vrednost za signale sa žiroskopa po x, y i z osi, kao i roll i pitch uglovi. Navedene veličine predstavljaju obeležja u bazi podataka. Sva obeležja su numerička i nema nedostajućih vrednosti u bazi. Svaki uzorak potrebno je dodeliti jednoj od pet klasa - stajanje (ST - *Standing*), sedenje (SIT - *Sitting*), hodanje (WA - *Walking*), pad unapred (FF - *Fall Forward*) ili pad u stranu (FL - *Lateral Fall*). U datoj bazi podataka 6,41 % uzoraka je iz klase FF, 6,41 % uzoraka je iz klase FL, a uzorci iz klasa SIT, ST i WA su podjednako zastupljeni, sa udelom od 29,06 %, za svaku od navedene tri klase. U cilju obuke i testiranja modela mašinskog učenja oznake klasa pretvorene su u numeričke vrednosti dodelom brojeva 0, 1, 2, 3 i 4 klasama FF, FL, SIT, ST i WA, redom.

B. Obuka modela i rezultati

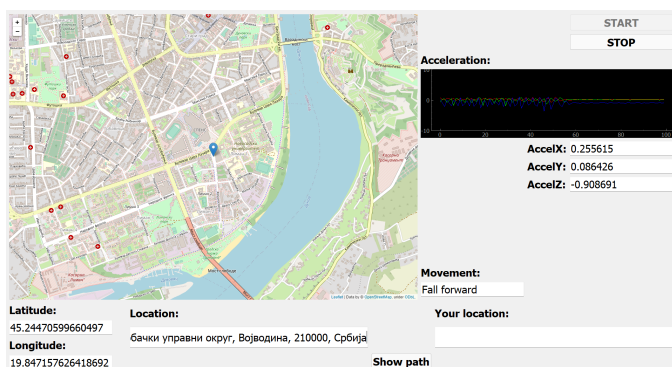
Kako bi bio kreiran optimalan model za klasifikaciju kretanja čoveka na osnovu date baze podataka, poređena su tri algoritma mašinskog učenja - metoda k najbližih suseda (kNN - *k Nearest Neighbors*), stabla odluke i mašine na bazi vektora nosača. Pre same obuke i evaluacije pojedinačnih modela, baza podataka je podeljena na dva skupa - trening skup i test skup. Trening skup čini 80 % ukupnih podataka, dok preostalih 20 % početne baze podataka čini test skup. Uzorci su podeljeni u dva navedena skupa tako da je za svaki od njih održana zastupljenost pojedinačnih klasa kao u početnom skupu. U okviru preobrade podataka izvršena je Z-normalizacija (standardizacija) obeležja, tako da sva obeležja imaju srednju vrednost 0 i standardnu devijaciju 1. Na ovaj način sva obeležja su skalirana na isti opseg vrednosti i time je sprečeno odlučivanje na osnovu onih obeležja koja variraju u većem opsegu vrednosti. Nakon preobrade podataka, kako bi optimalni modeli bili formirani, izvršena je unakrsna validacija sa deset podskupova na skupu za obuku i na taj način utvrđeni su optimalni parametri pojedinačnih modela. Za tako odabrane parametre izvršena je unakrsna validacija sa deset podskupova na skupu za obuku. Matrice konfuzije dobijene su akumulacijom matrica konfuzije svih deset iteracija. Kako bi se procenile performanse klasifikatora potrebno je uporediti predviđene i stvarne klasne oznake. Uzorci u bazi podataka klasifikovani su u pet klasa, te se kao mere uspešnosti klasifikatora analiziraju prosečna tačnost (prosek tačnosti po klasama), mikroprosečna osetljivost, preciznost i F-mera, kao i makroprosečna osetljivost, preciznost i F-mera. Završni korak u kreiranju klasifikatora jeste evaluacija modela na test skupu. Tabelom I dat je prikaz pojedinačnih mera uspešnosti za tri obučena klasifikatora.

Kao najuspešniji algoritam pri rešavanju datog problema pokazala se metoda k najbližih suseda. Tačnost od 88 % ostvarena je za deset najbližih suseda čija rastojanja se računaju na osnovu Manhattan metrike. Ukoliko se posmatra matrica konfuzije C (1) dobijena nakon testiranja kNN klasifikatora na test skupu, moguće je uočiti da klasifikator uspešno prepoznaje sve uzorke iz klase WA, da od 19 uzoraka iz klase SIT 17 uzoraka dodeljuje upravo toj klasi, dok dva uzorka pogrešno klasifikuje kao ST. Dati model pogrešno klasifikuje 4 uzorka iz klase ST, kao SIT, dakle, postoje poteškoće pri razlikovanju pokreta stajanja i sedenja. Klasa sa najvećom tačnošću je klasa FL, gde je lateralni pad za svih pet uzoraka klasifikovan ispravno, dok



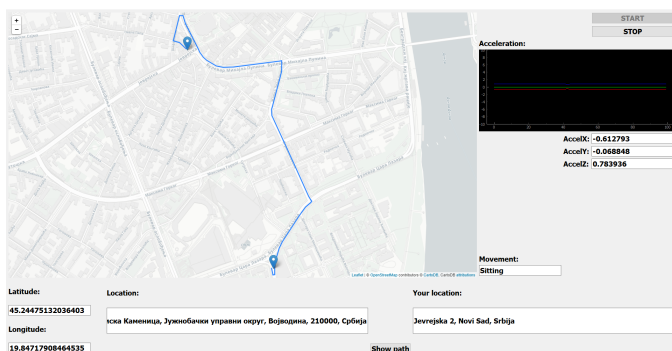
Slika 9. Prikaz referentne lokacije i signala sa akcelerometra

Dati podaci o ubrzanju, kao i podaci o orijentaciji koji pristižu na računar smeštaju se u odgovarajuće baferne, a kada pristigne 2000 odbiraka vrši se izdvajanje obeležja i formira se vektor obeležja koji opisuje jedan uzorak. Vektor obeležja prosleđuje se prethodno obučenom modelu mašinskog učenja i vrši se klasifikacija uzorka. Uzorak, koji karakteriše kretanje korisnika, može biti klasifikovan kao hodanje, stajanje, sedenje, pad u stranu ili pad unapred. Ukoliko je uzorak svrstan u klasu koja odgovara padu u stranu ili padu unapred, detektovan je pad i potrebno je obavestiti korisnika aplikacije o datom događaju. U tom trenutku se na mapi prikazuje trenutna lokacija na kojoj se nalazi korisnik uređaja za detekciju pada (slika 10).



Slika 10. Detekcija pada i prikaz trenutne lokacije korisnika uređaja

Unosom lokacije odgovornog lica u polje Your location i pritiskom na taster Show Path, na mapi se pored lokacije osobe koja je pala prikazuje i lokacija korisnika aplikacije, kao i optimalna putanja između te dve tačke, što je prikazano na slici 11.



Slika 11. Prikaz najkraće putanje od odgovornog lica, koje je primilo obaveštenje, do osobe koja je pretrpela pad

su uzorci iz klase FF greškom dodeljeni klasi WA (jedan uzorak) i klasi FL (jedan uzorak).

$$C = \begin{bmatrix} 19 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 17 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 4 & 15 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad (1)$$

TABELA I
MERE USPEŠNOSTI KLASIFIKATORA

	kNN	Stablo odluke	SVM
Tačnost	0.88	0.31	0.37
Preciznost (mikro)	0.88	0.31	0.37
Preciznost (makro)	0.89	0.21	0.19
Osetljivost (mikro)	0.88	0.31	0.37
Osetljivost (makro)	0.85	0.43	0.44
F mera (mikro)	0.88	0.31	0.37
F mera (makro)	0.86	0.28	0.26

V. ZAKLJUČAK

Usled pada, kod starijih osoba može doći do različitih povreda kao što su povrede ili prelomi ruke, ručnog zgloba, karlice, kuka, glave, unutrašnje povrede, poremećaj i gubitak mobilnosti. Ove povrede značajno mogu smanjiti kvalitet života povredene osobe. Sistem za detekciju pada mogao bi da doprinese pravovremenom pružanju pomoći starim licima, a time i prevenciji komplikacija nastalih usled povreda prilikom pada. Dalja istraživanja podrazumevaju proširenje baze podataka i poboljšanje performansi klasifikatora, kao i vršenje klasifikacije na nivou mikrokontrolera. Takođe, sve hardverske komponente sistema neophodno je integrisati u okviru jednog prenosivog uređaja koji bi korisnik mogao da nosi na kaišu ili ruci.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : "Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a".

LITERATURA

- [1] STMicroelectronics (2011). STM32F4DISCOVERY Data brief, Discovery kit with STM32F407VG MCU. Preuzeto 28. marta 2022., sa <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>
- [2] STMicroelectronics (2011.). STM32F405xx STM32F407xx data sheet. Preuzeto 28. marta 2022., sa <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f407vg.html#overview>
- [3] U-blox (2013). U-blox 6 Receiver Description. Preuzeto 30. marta 2022., sa https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/u-blox6_ReceiverDescrProtSpec_%28GPS.G6-SW-10018%29_Public.pdf
- [4] U-blox (2011.). NEO-6 u-blox 6 GPS Modules data sheet. Preuzeto 30. marta 2022., sa https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf
- [5] InvenSens Inc. (2012). MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification. Preuzeto 23. marta 2022., sa <http://www.haoyuelectronics.com/Attachment/GY-521/mpu6050.pdf>

ABSTRACT

In this paper, a fall detection system, whose main purpose is assistance to the elderly, is described. The paper gives an insight into all parts of the implemented fall detection system. Measurement system for fall detection includes the acquisition of user movement data using an accelerometer and a gyroscope, acquisition of location data using GPS module, classification of movements, and fall detection, as well as displaying this data within the user interface.

Measurement system for fall detection based on accelerometer, gyroscope, and GPS module

Sanja Mandić, Đorđe Novaković

Merenje karakteristika i modelovanje Hamonovih etalon otpornika u naizmeničnom režimu

Stefan Mirković, Dragan Pejić, Aleksandar Dimitrijević

Apstrakt—Razmatranje primene Hamonovih etalon otpornika u naizmeničnom režimu, kao i ispitivanje njihovih karakteristika su tema ovog rada. U ranijim istraživanjima ustanovljeno je da prenosni odnos ovih etalona ne bi trebao da značajno zavisi od frekvencije. Drugim rečima, moduo transfera se očekuje da će biti blizak kvadratu broja otpornika od kojih se formira transfer, dok će fazni stav transfera biti blizak nuli. Sa dostupnom opremom koja je bila raspoloživa kada je vršeno istraživanje, merenja su obavljena na osnovu dve merne metode, čiji će rezultati biti prikazani u radu.

Ključne reči—Hamonov etalon, transfer, električna otpornost.

I. UVOD

Kao jedan veoma koristan alat kod određivanja odnosa napona, a pogotovo otpornosti su Hamonovi etalon otpornici. Ovi etaloni se sastoje od n redno vezanih otpornika iste nazivne vrednosti, gde je povezivanje obavljeno četvorožično tako da je omogućen direktan pristup bilo kojem naponskom i strujnom izvodu svakog otpornika pomoću ugrađenih terminala. Otpornost terminala ovih spojeva uračunata je u otpornost pojedinačnih otpornika. Pojedinačnim merenjem i podešavanjem otpornosti svakog otpornika teži se da se postigne visoka tačnost. Prvenstvena uloga Hamonovih otpornika nije da budu etaloni otpornosti, već etaloni prenosnog odnosa otpornosti (transfer). Prespajanjem serijske u paralelnu vezu postiže se smanjenje otpornosti za približno n^2 puta. Četvorožični spoj se koristi kako bi se potisnuli negativni efekti otpornosti spojeva u cilju povećanja tačnosti Hamonovog etalona. Zahvaljujući dobrim karakteristikama, treba razmisliti o njihovoj primeni u ac režimu sa obzirom na ohrabrujuće rezultate nekih istraživanja [1]. Ovde je osnova tvrdnje da ako se svaki pojedinačni otpornik Hamonovog etalona modeluje kao redna veza otpornosti i reaktanse, moduo transfera će biti blizak broju n^2 . Prvo su ove tvrdnje simulaciono proverene, a zatim su izvršena i merenja čiji su rezultati doveli do zaključka da ove tvrdnje imaju smisla. U cilju ispitivanja frekventnih karakteristika Hamonovog etalona, kao i provere da li je modelovanje pojedinačnih otpornika kao redne veze otpornosti i reaktanse dovoljno dobro, izvršena su merenja i proračuni.

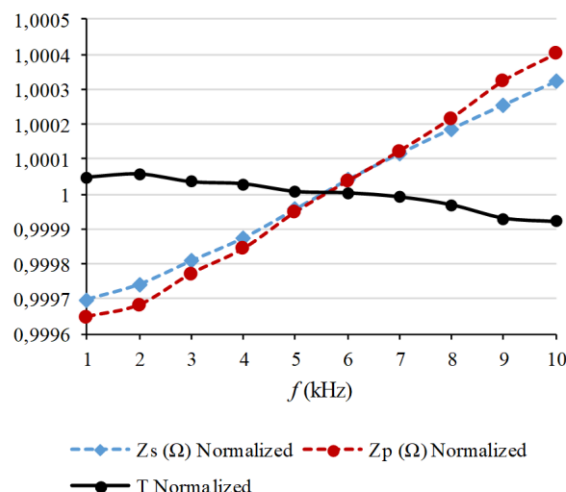
Stefan Mirković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad, Srbija (e-mail: mirkovicst@uns.ac.rs).

Dragan Pejić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad, Srbija (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs).

Aleksandar Dimitrijević – Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" a.d. Beograd, Srbija (e-mail: adimitrijevic22@gmail.com).

II. EKSPERIMENTALNA MERENJA

Merenja su vršena u cilju prvenstveno procene modula transfera. Prva merna metoda se zasnivala na UI metodi, dok je druga metoda bila bazirana na direktnom merenju pomoću instrumenta namenjenog za ispitivanje impedansi. Za prvu metodu korištena je sledeća oprema: izvor stabilisanog napona (Time Electronics 5025), ac voltmetar (Fluke 8846A), ac ampermetar (Fluke 8846A), kao i transfer etalon SR1010 sa deset otpornika (sa transferom $10\text{ k}\Omega : 100\ \Omega$). Otpornost voltmetra i ampermetra su poznate i njihov uticaj na rezultat merenja je korigovan. Kapacitivnost voltmetra je deklarirana kao manja od 100 pF , ali nije poznata njena vrednost. Kako bi uticaj kapacitivnosti voltmetra bio minimalan, korišćene su različite varijante UI metode za merenje serijske i paralelne impedanse. Kod određivanja modula serijske impedanse korišten je strujni spoj, gde je ampermetar povezan redno sa etalomom, a voltmetar paralelno toj vezi. U slučaju paralelne impedanse korišten je naponski spoj kod koga je voltmetar povezan paralelno sa etalomom, a ampermetar redno toj vezi.



Sl. 1. Zavisnost normalizovanih vrednosti modula impedanse redne i paralelne veze i transfera T (UI metoda)

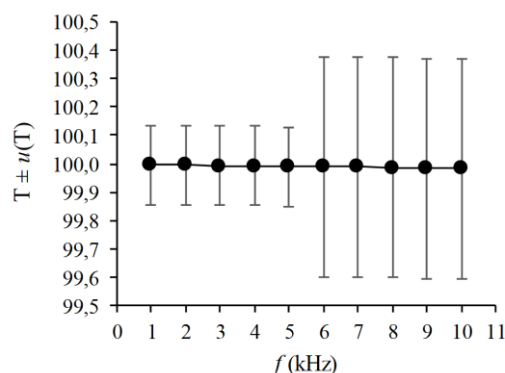
Kako su Hamonovi otpornici izvedeni četvorožično, logično se nameće korišćenje naponskog spoja. Problem je nepoznavanje stvarne kapacitivnosti voltmetra, pri čemu se pokazuje da to više smeta ako bi se koristio naponski spoj prilikom merenja na serijskoj konfiguraciji. Tada bi se, nazivnoj otpornosti od $10\text{ k}\Omega$, paralelno vezivao voltmetar

deklarisane ulazne otpornosti $1\text{ M}\Omega \pm 1\%$ i nepoznata kapacitivnost. Ova činjenica je prevagnula ka korišćenjem strujnog spoja pri merenju modula impedanse serijske konfiguracije. U tom slučaju se gube pozitivni efekti četvorožične izvedbe Hamonovih otpornika, ali se rešava problem nepoznavanja kapacitivnosti voltmetra. Moduo impedanse paralelne konfiguracije je meren primenom naponskog spoja uz korišćenje četvoržične izvedbe otpornika. Pri promeni frekvencije od 1 kHz do 10 kHz, očitavani su napon i struja, određivan je moduo impedanse uz korigovanje uticaja otpornosti instrumenata. Na Sl. 1. su prikazane normalizovane vrednosti rezultata merenja modula impedanse serijske i paralelne veze Hamonovih otpornika, kao i vrednost modula transfera. Postupak normalizacije je sproveden kako bi se pregledno, na jednom grafiku dao prikaz rezultata eksperimenta koji se razlikuju po vrednosti (serijska otpornost je približno $10\text{ k}\Omega$, redna otpornost je približno $100\ \Omega$, moduo transfera je bezdimenziona veličina približno jednaka 100). Sa grafika se vidi da moduo serijske i paralelne veze Hamonovih otpornika raste sa frekvencijom, što opravdava pretpostavku o postojanju reaktivne komponente. Rezultati simulacija predviđaju da su ove dve zavisnosti približno iste, što rezultira pretpostavkom da transfer ne zavisi od frekvencije. S druge strane, merenjem dobijeni profil zavisnosti modula redne i modula paralelne veze nije potpuno isti, pa je dobijeno da i moduo transfera (količnik modula serijske i paralelne veze) takođe zavisi od frekvencije. Promena transfera usled frekvencije je primetno manja (oko pet puta), u poređenju sa promenom modula serijske i paralelne veze. U Tabeli I prikazani su rezultati merenja UI metodom.

TABELA I
REZULTATI UI METODE

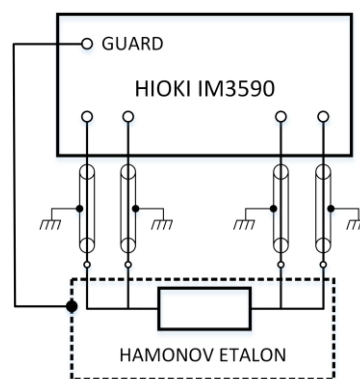
f (kHz)	T	$u(T)$ ($k=1$)
1	99.995	0.14
2	99.996	0.14
3	99.994	0.14
4	99.993	0.14
5	99.991	0.14
6	99.990	0.39
7	99.989	0.39
8	99.987	0.39
9	99.983	0.39
10	99.982	0.39

Postavlja se pitanje u kojoj meri nesavršenosti korištene opreme utiču na zavisnost modula transfera od frekvencije. Da bismo odgovorili na ovo pitanje, sproveden je postupak određivanja merne nesigurnosti. U obzir je uzeta merna nesigurnost usled deklariranih grešaka korišćenog voltmetra i ampermetra, kao merna nesigurnost usled nepoznavanja prave vrednosti otpornosti voltmetra. U tabeli su date vrednosti modula transfera i procenjene merne nesigurnosti pri faktoru obuhvata 1.



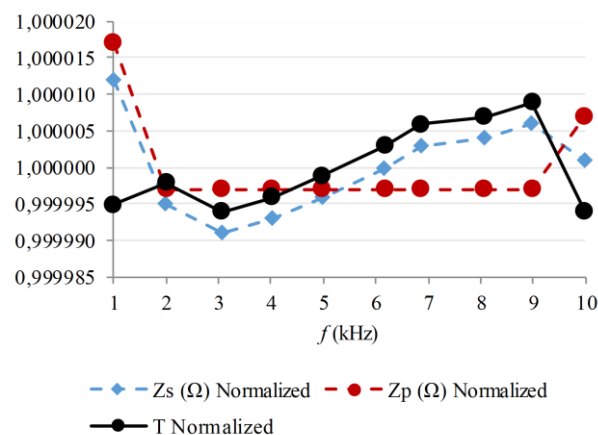
Sl. 2. Zavisnost modula transfera od frekvencije uz prikaz merne nesigurnosti za faktor obuhvata 1 (UI metoda)

Druga merna metoda je bazirana na određivanju impedanse serijski (Z_S) i paralelno (Z_P) konfigurisanog etalona, kao i faznih stavova (φ_s i φ_p) direktnim očitavanjem korišćenjem instrumenta HIOKI IM3590, čija je glavna uloga analizator impedansi.



Sl. 3. Šema povezivanja pri merenju direktnom mernom metodom

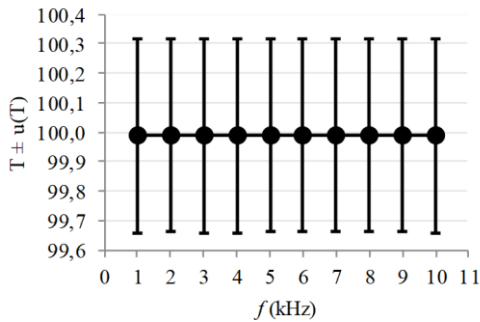
Na početku je izvršena korekcija prilikom kratkog spoja i korekcija prilikom otvorene veze. Na ovaj način bi trebalo u najvećoj meri da su eliminisane parazitne induktivnosti i kapacitivnosti samih vodova korišćenih za četvorožično povezivanje merene impedanse.



Sl. 4. Zavisnost normalizovanih vrednosti modula impedanse redne i paralelne veze i transfera (direktna metoda)

TABELA II
REZULTATI DIREKTNE METODE (MODUO TRANSFERA)

f (kHz)	T	$u(T)$ ($k=1$)
1,0000	99,989	0.33
2,0052	99,989	0.33
2,9165	99,989	0.33
4,0208	99,989	0.33
4,9806	99,989	0.33
5,8480	99,990	0.33
6,8665	99,990	0.33
8,0624	99,990	0.33
8,9733	99,990	0.33
9,9871	99,989	0.33



Sl. 5. Zavisnost modula transfera od frekvencije uz prikaz merne nesigurnosti za faktor obuhvata 1 (direktna metoda)

Ovde je očitavana vrednost izmerenog modula i faznog stava etalona za različite frekvencije. Na osnovu ovih rezultata može se videti da je relativna promena modula i faznog stava etalona pri različitim frekvencijama značajno manja od deklarisanе greške instrumenata.

TABELA III
REZULTATI DIREKTNE METODE (ARGUMENT TRANSFERA)

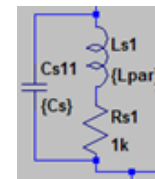
f (kHz)	φ	$u(\varphi)$ ($k=1$)
1,0000	0.038	0.26
2,0052	0.077	0.26
2,9165	0.117	0.26
4,0208	0.154	0.26
4,9806	0.191	0.26
5,8480	0.236	0.26
6,8665	0.263	0.26
8,0624	0.309	0.26
8,9733	0.343	0.26
9,9871	0.383	0.26



Sl. 6. Zavisnost argumenta transfera od frekvencije uz prikaz merne nesigurnosti za faktor obuhvata 1 (direktna metoda)

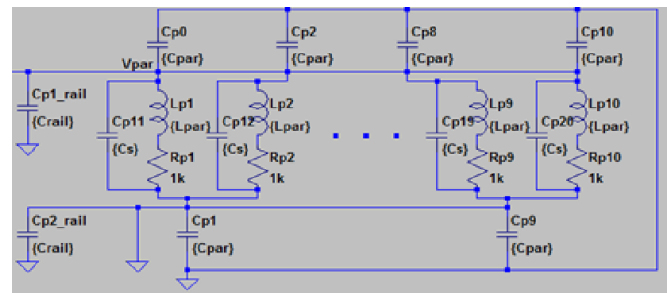
Kao posledica toga, ne može se zaključiti sa velikom sigurnošću kako se zaista ponaša moduo i fazni stav.

Kako bi se simulaciono analizirao uticaj parazitnih induktivnosti i kapacitivnosti na transfer, realizovana je LTSpice simulacija, gde je svaka pojedinačna impedansa Hamonovog etalona modelovana kao otpornost nazivne vrednosti 1 k Ω kojoj je redno vezana parazitna induktivnost L_{Par} a svemu tome paralelno vezana parazitna kapacitivnost C_s . Sada pretpostavljamo da su sve vrednosti jednake kako bismo mogli proveriti/proceniti uticaj dodatnih parazitnih efekata na transfer. Ako se variraju vrednosti parazitnih induktivnosti i kapacitivnosti dobija se da je transfer nepromenljiv po frekvenciji, dok je faza transfera vrlo mala.



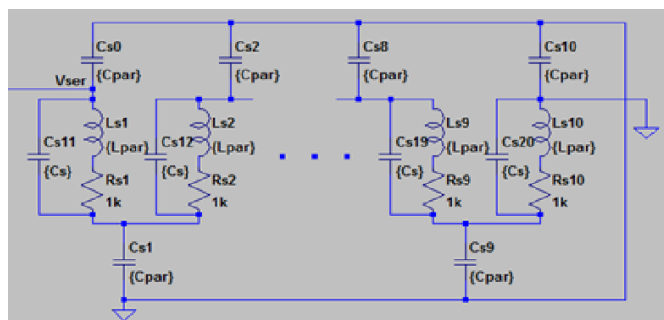
Sl. 7. Model pojedinačne impedanse Hamonog etalona u LTSpice simulaciji

Pored ovih parazitnih efekata, dodate su i kapacitivnosti svakog kontakta Hamonog etalona prema kućištu vrednosti C_{Par} . Kod paralelne konfiguracije, uticaj parazitnih kapacitivnosti ka kućištu utiče na jednostavniji način na sam transfer nego u slučaju serijske veze.



Sl. 8. Modelovan paralelno vezan Hamonov etalon u LTSpice okruženju

Kod paralelne veze, ove kapacitivnosti se usled kratkospojnika vezuju paralelno, ali podeljene u dve grupe (za jednu i drugu stranu priključaka). Kapacitivnosti jedne od ove dve grupe su ustvari kratkospojeni, jer je jedan kratkospojnik vezan na uzemljenje isto kao i kućište. Kod serijske konfiguracije pojedinačne impedanse i kapacitivnosti kao kućištu čine višestepeni filter, gde je logično da će se pri ovoj konfiguraciji dobiti veći fazni pomeraj. Dodatno je modelovano i da kratkospojnici imaju neku svoju kapacitivnost prema kućištu. Ovde se takođe dobija da je jedna kapacitivnost kratkospojena jer je samo kratkospojnik uzemljen, pa prema kućištu koje je takođe uzemljeno nema naponske razlike. Primećeno je da kapacitivnost kratkospojnika i pri značajnim vrednostima ne utiče značajano na transfer.



Sl. 8. Modelovan serijski vezan Hamonov etalon u LTSpice okruženju

Ako se pretpostave redna induktivnost i paralelna kapacitivnost za svaki element u Hamonovoj kutiji, i da su im vrednosti za svaki element jednake, dobija se da transfer ne zavisi od frekvencije. Ako se pretpostavi parazitna kapacitivnost kontakata Hamonovih elemenata prema kućištu onda se dobija da moduo i fazni stav transfera zavise od frekvencije. Rezultati simulacija pokazuju šta od parazitnih elemenata utiče i u kojoj meri.

III. ZAKLJUČAK

Ono što se za sad može videti je da rezultati nisu opovrgnuli dosadašnje pretpostavke za ponašanje modula i faznog stava, ali ih i ne potvrđuju sa velikom sigurnošću. Rezultati sa kojima se trenutno raspolaze su dobijeni korištenjem najbolje raspoložive merne opreme. Pored ovog nedostatka usled velike greške instrumenata, postavlja se pitanje da li je model kada se etalon posmatra kao impedansa ispravan. Pored induktivnih i kapacitivnih efekata koji se javljaju na samim pojedinačnim otpornicima unutar etalona, postoje i drugi efekti. Kapacitivnost prema kućištu etalona, kapacitivnost kratkospojnika kojima se etalon konfigurise iz serijsku u paralelnu vezu, kao i ulazna kapacitivnost instrumenata su samo jedna od stvari o kojima treba razmišljati. Različitim pristupima ovom problemu dobijeni su već neke procenjene vrednosti spomenutih parazitnih efekata, koje treba još detaljno ispitati. Procena je vršena pomoću raznih simulacijskih metoda i matematičkih modela. Ukoliko se ispostavi da ovi efekti značajno doprinose grešci etalona, moraće se trenutni modela komplikovati dok se ne dođe do zadovoljavajućih rezultata. Osnovni problem je nazivna greška instrumenata. Kako je Hamonov etalon etalon visoke tačnosti, potrebno je koristiti isto tako i instrumente visoke tačnosti kako bi se moglo sa velikom pouzdanošću proceniti njegovo ponašanje u zavisnosti od frekvencije. U prethodnim istraživanjima primenjena je Monte Carlo simulacija u cilju procene modula i faznog stava transfera, ali pri jednostavnijem modelu nego što je ovde opisan. Tamo je pojedinačni otpornik posmatran kao redna veza otpornosti i reaktanse. Hipoteza da

se moduo i fazni stav transfera neznatno menjaju sa promenom frekvencije nije potvrđena, ali isto tako nije ni opovrgnuta. Potrebna je merna oprema sa manjom mernom nesigurnošću. Jedan način rada jeste merenje na višim frekvencijama gde uticaj parazitnih efekata više dolazi do izražaja. Problem je što je i oprema kojom raspolazemo takva da sa porastom frekvencije dolazi do degradacije granica greške.

LITERATURA

- [1] S. Mirković, D. Pejić, M. Subotin, N. Gazivoda, Z. Gotovac, "Mogućnost primene Hamonovih presloživih otpornika u naizmeničnom režimu," ETRAN - Konferencija za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, Bijeljina, 2021.
- [2] "SR-1010 Series Resistance Transfer Standards User and Service Manual," IET LABS, INC., 534 Main Street, Westbury, NY 11590, November, 2008.
- [3] R. Radetić, *Električna otpornost: pojava i merenja: sa originalnim rešenjima autora*, Agencija Eho, Niš, 2015.
- [4] D. G. Jarrett, "Evaluation of Guarded High-Resistance Hamon Transfer Standards," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 48, no. 2, April, 1999.
- [5] B. V. Hamon, "A 1-100 Ω build-up resistor for the calibration of standard resistors", *Jour. Sci. Instr.*, vol. 31, pp. 450-453, 1954.
- [6] J. Bohacek, "Evaluation of frequency performance of resistance standards", IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2002.
- [7] J. C. Riley, "The Accuracy of Series and Parallel Connections of Four-Terminal Resistors", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 16, 1967.
- [8] White, D.R., Jones, K., Williams, J.M., Ramsey, I.E., "A simple resistance network for calibrating resistance bridges", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 46, 1997.
- [9] L. Cimeanu, M. Simionescu, "Metrological characterization of reference standard resistors group of 100 Ω by means of Hamon resistor," 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, Iasi, Romania, 25-27 October, 2012.

ABSTRACT

Consideration of the application of Hamon standard resistors in alternating mode, as well as examination of their characteristics are the topic of this paper. Previous research has found that the transmission ratio of these standards should not significantly depend on frequency. In other words, the transfer moduo is expected to be close to the square of the number of resistors from which the transfer is formed, while the phase position of the transfer will be close to zero. With the available equipment that was available when the research was conducted, the measurements were performed on the basis of two measurement methods, the results of which will be presented in the paper.

Measurement of characteristics and modeling of Hamon standard resistors in alternating mode

Stefan Mirković, Dragan Pejić, Aleksandar Dimitrijević

Merni sistem za određivanje modula i faznog stava impedanse baziran na virtuelnoj instrumentaciji

Milan Šaš, Dragan Pejić, Nemanja Gazivoda, Đorđe Novaković, Bojan Vujčić, *Members, IEEE*

Apstrakt—U ovom radu će biti predstavljen realizovani merni sistem za određivanje modula impedanse i faznog stava superkondenzatora. Sistem se sastoji od dvokanalnog generatora funkcija, dva digitalna multimetra i baferskog pojačavača struje koji su spojeni u električno kolo koje se koristi za četvorožično merenje impedanse. Kao generator signala koristi se Siglent SDG 1025 generator funkcija koji generiše sinusni signal superponiran za DC vrednost. Kao digitalni multimetri koriste se dva FLUKE 8846A 6-1/2 cifarska multimetra gde se jedan koristi kao voltmetar, a drugi kao ampermetar. Kapacitivnost superkondenzatora je reda stotina Farada pa je potrebno koristiti strujni pojačavač kako bi se obezbedila potrebna struja. Kako bi se postigla sinhronizacija rada uređaja, oni su umreženi i njima se upravlja pomoću računara na kom se nalazi skripta, napisana u Python programskom jeziku. Frekvencije na kojima se mere moduo impedanse i fazni stav su u opsegu od 1 mHz do 50 Hz.

ključne reči— superkondenzator; FLUKE 8846A; Siglent SDG 1025; Python; Scipy; curve_fit; matplotlib; PySerial; PyVISA.

I. UVOD

Pojavom i razvojem električnih automobila dolazi i do razvoja uređaja za skladištenje električne energije poput litijumskih baterija. Kako je eksploatacija litijuma i proizvodnja baterija štetna za okolinu, istraživanja su se usmerila ka pronalasku novih komponenata koje mogu da efikasno skladište energiju. Istraživanjem i razvojem došlo se do superkondenzatora [1][2][3] čija kapacitivnost može biti reda stotina Farada, ali namenjenih za nizak naponski nivo reda volti. Povezivanjem ovakvih kondenzatora u redne i paralelne veze, realizuju se superkondenzatori sa nazivnim naponom reda 100 V, kakvi su neophodni za korišćenje u auto industriji. Prednosti superkondenzatora u odnosu na baterije jesu brzina punjenja i količina energije koja se isporučuje u

Milan Šaš – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: milansas@uns.ac.rs)

Dragan Pejić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs)

Nemanja Gazivoda – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: nemanjagazivoda@uns.ac.rs)

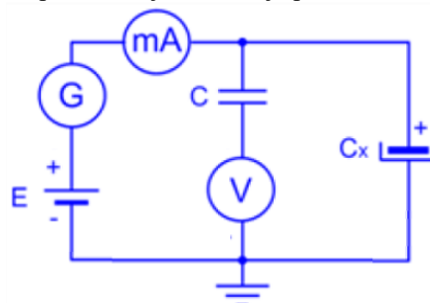
Đorđe Novaković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs)

Bojan Vujčić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: bojanvuj@uns.ac.rs)

kratkom intervalu. Superkondenzatori pronalaze sve širu primenu, pa je potrebno poznavati njihove karakteristike kako bi se mogli adekvatno predstaviti u simulacijama i prilikom projektovanja novih uređaja. Ovaj rad se bavi sistemom za određivanje dve vrlo važne karakteristike superkondenzatora: modul i faznog stava impedanse superkondenzatora na frekvencijama u opsegu od 1 mHz do 50 Hz.

II. POSTAVKA PROBLEMA

Najčešći model superkondenzatora jeste model koji, pored kapacitivnosti C ima rednu R_s i paralelnu (otočnu) R_o otpornost. Redna otpornost predstavlja otpor priključnih krajeva i ploča superkondenzatora, a paralelna otpornost modeluje realan dielektrik. U ovom radu će se, kao test primer, koristiti superkondenzator [4] nazivne kapacitivnost 100 F, nazivnog napona 2.7 V, serijske otpornosti reda desetina m Ω i paralelne otpornosti reda 10 k Ω . Autori su rešavanju ovog problema pristupili polazeći od klasične šeme za određivanje kapacitivnosti elektrolitskog kondenzatora merenjem napona i struje, kao što je prikazano na Sl. 1.



Sl. 1 Osnovna šema za merenje napona i struje na polarisanom kondenzatoru

Ovo kolo je, po svojoj konstrukciji, slično kolu za merenje otpornosti UI metodom naponskim spojem. U kolu se nalazi izvor jednosmernog napona E , na koji se dodaje naizmenična komponenta iz generatora funkcije G . Uloga pomoćnog kondenzatora C , redno vezanog sa voltmetrom, je da potiskuje jednosmernu komponentu napona na krajevima C_x . U tom slučaju voltmetar V meri samo preostalu naizmeničnu komponentu napona.

Ako se ovakva šema primeni za merenje impedanse superkondenzatora javljaju se sledeća ograničenja:

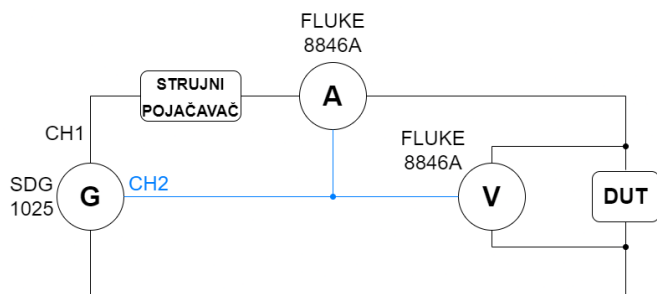
1. Kako bi pomoćni kondenzator C uspešno filtrirao jednosmernu komponentu i pri najnižim vrednostima frekvencije, njegova kapacitivnost bi morala biti

izuzetno visoka – reda Farada.

2. Pri visokim vrednostima frekvencije signala, očekivana vrednost modula impedanse superkondenzatora je reda $m\Omega$, pa otpornost vodova dolazi do izražaja.
3. Raspoloživi instrumenti namenjeni za merenje napona i struje nisu u stanju da mere pri frekvencijama manjim od 3 Hz.

III. PREDLOG REŠENJA

Kako bi se rešili navedeni problemi, autori predlažu rešenje prikazano na Sl. 2. Pomoćni kondenzator C je izbačen pa se filtriranje jednosmerne komponente napona vrši softverskim putem. Superkondenzator, na šemi označen kao DUT (*Device Under Test*), je vezan četvorožično kako bi se uticaj otpornosti vodova eliminisao. Zbog nemogućnosti multimetara da ispravno mere efektivnu vrednost signala na frekvencijama manjim od 3 Hz, multimetri su konfigurisani da rade u DC režimu. Prikupljanjem odbiraka signala napona i struje direktnim očitavanjem rezultata analogno-digitalne (A/D) konverzije i korišćenjem softverskih alata mogu biti određene amplitude (efektivne vrednosti, takođe) napona i struje.



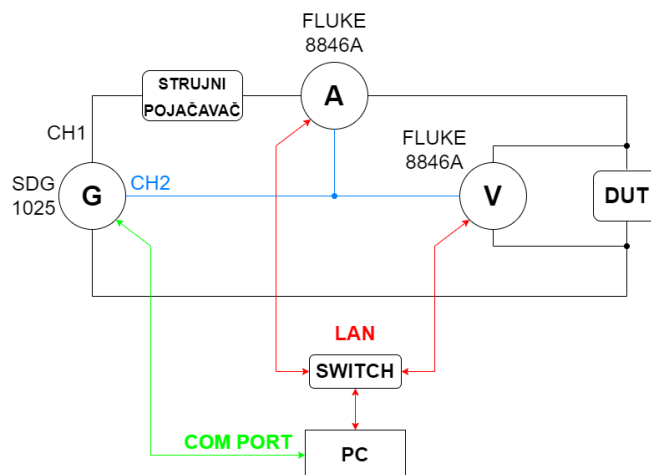
Sl. 2 Prikaz predloženog električnog kola

Kao ampermetar i voltmetar su korišćeni FLUKE 8846A [6] digitalni 6- $\frac{1}{2}$ cifarski multimetri koji imaju *multi-slope* A/D konvertor kao i mogućnost programiranja putem SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) komandi. Ampermetar i voltmetar su povezani u šemu za četvorožično merenje impedanse. Opseg merenja ampermetra je postavljen na 1 A, a opseg voltmetra na 1 V. Kao izvor naizmeničnog signala koristi se Siglent SDG 1025 [7] dvokanalni generator funkcija koji generiše, na svom prvom kanalu, sinusni signal amplitude 0.5 V i frekvencije u rasponu od 1 mHz do 50 Hz. Generisan napon je superponiran na jednosmernu komponentu kako bi se obezbedilo ispravno polarisanje superkondenzatora. Za pojačavanje strujnih mogućnosti funkcijskog generatora korišćen je baferski (jediničnog naponskog pojačanja) strujni pojačavač koji, na svom izlazu, daje vrednost struje do 2 A.

Sinhronizacija rada dva multimetra je izvedena korišćenjem eksternog trigera u obliku povorke pravougaonih impulsa dobijenih na drugom kanalu dvokanalnog izvora. Multimetri su podešeni da prihvate eksterni triger signal. Korišćenjem eksternog trigera eliminiše se pojava fazne greške usled neistovremenog odabiranja napona i struje. Raspon frekvencija periodičnog signala je veoma širok. Prilikom

odabiranja tri periode signala najmanje frekvencije vrednosti 1 mHz, uzimanje odbiraka traje 50 minuta. Pri povećanju frekvencije se smanjuje vreme merenja na postavljenoj frekvenciji. Ukupno trajanje merenja počevši od najniže pa sve do najviše frekvencije je oko dva sata.

Posle obavljenog umrežavanja dobijeno kolo je predstavljeno na Sl. 3.



Sl. 3 Konačan izgled šeme za merenje

Strujni pojačavač je četvoropol, ali je na blok šemi predstavljen kao dvopol, kako bi šema bila lakša za čitanje. Multimetri su povezani na LAN (*Local Area Network*) dok je generator funkcije povezan na jedan COM port na računaru. Upravljanje celokupnim sistemom se vrši preko računara na kome se nalazi skripta napisana u Python [8] programskom jeziku. Operater ovakvog sistema treba da unese željene frekvencije naizmeničnog signala i pokrene skriptu. Kao izlaz, skripta isporučuje vrednosti modula impedanse i faznog stava u zavisnosti od frekvencije, u tabelarnom i grafičkom obliku.

IV. KONTROLA SISTEMA I OBRADA PODATAKA

Kontrola sistema se vrši pomoću skripta napisane u Python programskom jeziku. Korišćene su biblioteke za mrežnu i serijsku komunikaciju [9], biblioteka *scipy* [10] za matematičke proračune i *matplotlib* [11] za grafički prikaz podataka. Kontrola sistema se odvija po sledećem principu:

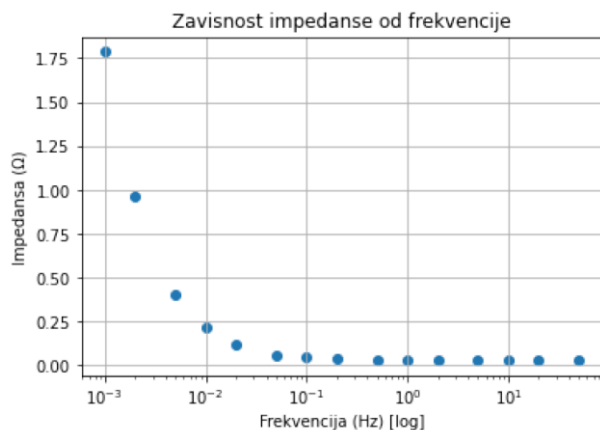
- provera prisutnosti uređaja,
- postavljanje uređaja u početna stanja,
- ciklus merenja,
- obrada podataka i
- prikaz podataka.

U ciklusu merenja se vrši odabiranje talasnih oblika napona i struje. Na kraju ciklusa merenja od multimetara se traže podaci koji pristižu u obliku liste vrednosti pojedinačnih odbiraka. Za određivanje amplituda i faznih stavova napona i struje, prikupljeni odbirci se prosleđuju funkciji *curve_fit* [12] koja je deo *scipy* biblioteke. Pored odbiraka, funkcija zahteva i definiciju očekivanog talasnog oblika. Za napon je to suma jednosmerne i prostoperiodične komponente poznate frekvencije, dok se za struju (u ustaljenom režimu) očekuje samo prostoperiodična komponenta. Kao povratne vrednosti, funkcija *curve_fit* vraća vrednosti jednosmerne i naizmenične

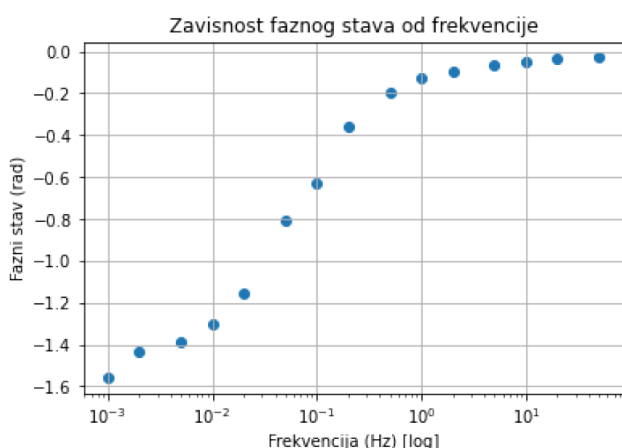
komponente napona, naizmeničnu komponentu struje i fazne stavove za obe veličine. Količnik vrednosti amplitude napona i struje predstavlja vrednost modula impedanse. Fazni stav impedanse se dobija oduzimanjem faznih stavova napona i struje. Na kraju izvršavanja skripte podaci se zapisuju u CSV (*Comma Separated Values*) fajl koji se može naknadno obrađivati. Dodatno, rezultati obrade se prikazuju grafički pomoću biblioteke *matplotlib* kako bi se dobio grafički prikaz vrednosti koje su merene.

V. DISKUSIJA

Predloženi sistem je u potpunosti realizovan i izvršena su merenja. Podešen je da uzima sedam odbiraka po periodu. Merenje se vrši tokom tri periode signala na svakoj zadatoj frekvenciji. Parametar NPLC (*Number of Power Line Cycles*) je podešen na 0.02, što je najmanja moguća vrednost. Za mrežnu učestanost 50 Hz definisano je vreme integraljenja od 0.4 ms. Na kraju ciklusa rada dobijeni su grafici na kojima je predstavljena zavisnost vrednosti modula impedanse i faznog stava od frekvencije signala. Na Sl. 4 i 5 je dat prikaz navedenih zavisnosti, pri čemu je x-osa na kojoj se nalazi frekvencija predstavljena u log razmeri.

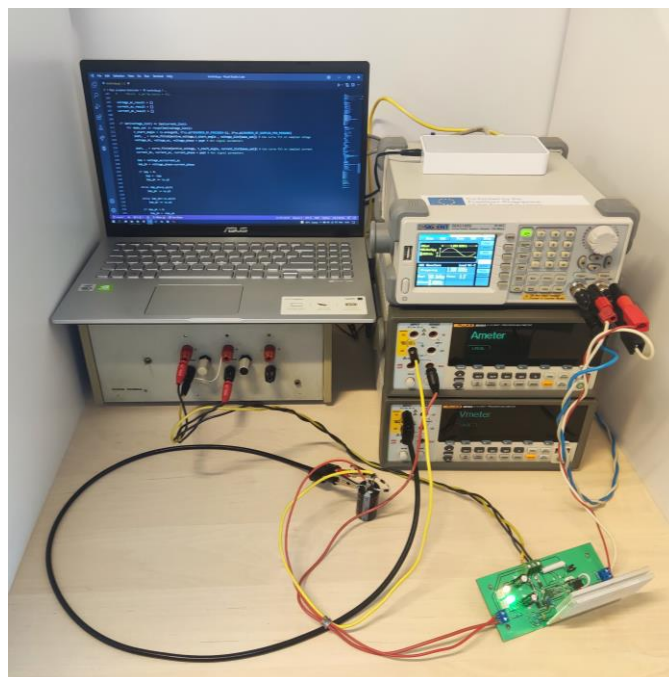


Sl. 4 Zavisnost vrednosti modula impedanse od frekvencije signala



Sl. 5 Zavisnost vrednosti faznog stava od frekvencije signala

Na Sl. 6 je data fotografija opreme koja je korišćena u ovom radu.



Sl. 6 Prikaz realizovanog sistema

VI. ZAKLJUČAK

Prikazani sistem je uspešno realizovan. Primećeno je da postoji prelazni proces prilikom promene frekvencije signala pa je potrebno sačekati sa merenjem dok se ne postigne ustaljeno stanje. Ovde je potrebno dodatno ispitati prelazne procese i optimizovati vreme čekanja, gde, sa povećanjem frekvencije, prelazni procesi kraće traju. Dalji planovi uključuju simuliranje rada sistema i određivanje merne nesigurnosti ovakvog merenja impedanse i faznog stava superkondenzatora na unapred zadatim frekvencijama. Ove simulacije bi se realizovale u Python programskom jeziku, koristeći Monte Karlo princip. U daljem razmatranju i testiranju može se povećati vrednost NPLC-a kod nižih frekvencija kako bi princip rada *multi-slope* A/D konvertora došao do izražaja u potiskivanju smetnji mrežne učestanosti. Na nižim frekvencijama je moguće povećavati broj odbiraka po periodu. Pri višim frekvencijama (kraće periode) postoji ograničenje u pogledu vrednosti vremena integraljenja.

Na osnovu dosadašnjih merenja se stiče utisak da nema potrebe za prevelikim brojem odbiraka po periodu, kao i da nema potrebe za povećanjem broja perioda. Moguće obrazloženje je činjenica da se poznaje talasni oblik napona i struje, pa zbog toga *curve_fit* funkcija već na osnovu malog broja odbiraka uspeva da odredi potrebne parametre signala napona i struje.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u sklopu internog projekta Centra za metrologiju pod nazivom "Razvoj naučno-stručnih metoda u oblasti SMART koncepata u industriji, naučne i industrijske metrologije, neuronauka i biomedicinskih merenja primenom napredne metodologije i digitalne tehnologije".

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i

telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : "Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a".

LITERATURA

- [1] Jha, Deepu & Karkaria, Vispi & Karandikar, Parashuram & Desai, R.S.. (2022). Statistical modeling of hybrid supercapacitor. Journal of Energy Storage. 46. 103869.
- [2] Chakraborty, Sohini & N.L, Mary. (2022). Review - " An Overview on Supercapacitors and Its Applications. Journal of The Electrochemical Society. 169. 10.
- [3] Zhang, Jianan & Zhang, Xiaoyu & Xue, Dongping & Huicong, Xia & Jiang, Su. (2021). Supercapacitors. 10.
- [4] <https://www.xump.com/science/Super-Capacitor-100F-2.7V.cfm>
- [5] https://www.hioki.com/global/learning/usage/lcr-meters_4.html
- [6] <https://us.flukecal.com/products/data-acquisition-and-test-equipment/bench-multimeters/8845a8846a-65-digit-precision-multime>
- [7] <https://siglentna.com/product/sdg1025/>
- [8] <https://www.python.org/>
- [9] <https://pyvisa.readthedocs.io/en/latest/>
- [10] <https://scipy.org/>
- [11] <https://matplotlib.org/stable/index.html>
- [12] https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html

ABSTRACT

This paper presents the implemented measurement system for measuring the impedance modulus and phase angle of a

supercapacitor. The system consists of a two-channel function generator, two digital multimeters and a buffer current amplifier connected into an electrical circuit used for four-wire resistance measurement. The Siglent SDG 1025 function generator is used as the signal generator, which generates a sine wave signal superimposed on a DC value. Two FLUKE 8846A 6-1/2 digit digital multimeters are used as digital multimeters, one of which is used as a voltmeter and the other as an ammeter. The capacitance of the supercapacitor is of the order of hundreds of Farads, so it is necessary to use a current amplifier to provide the required current. In order to synchronize the operation of the devices, they are networked and managed using a computer that contains a script written in the Python programming language. The frequencies at which the impedance modulus and phase position are measured are in the range of 1 mHz to 50 Hz.

Measurement system for determining the modulus and phase angle of the impedance based on virtual instrumentation

Milan Šaš, Dragan Pejić, Nemanja Gazivoda, Đorđe Novaković, Bojan Vujičić

Simulaciona analiza metode pogodne za metrološku karakterizaciju impedanse na niskim frekvencijama

Milan Šaš, Dragan Pejić, Nemanja Gazivoda, Đorđe Novaković, Bojan Vujičić, *Members, IEEE*

Apstrakt—U radu je prikazana simulaciona analiza metode koja je primenjiva za metrološku karakterizaciju dvokrajnih elemenata na niskim frekvencijama. Program napisan u programskom jeziku Python simulira rad dva multimetra tipa FLUKE 8846A, od kojih je jedan konfigurisan kao ampermetar, a drugi kao voltmetar. Odbirci napona i struje se obrađuju u programu, koji na osnovu odbiraka određuje vrednost amplitude naizmenične komponente i faznog stava napona i struje, a onda na osnovu tih vrednosti izračunava moduo i fazni stav impedanse. Program uračunava deklarisanе greške oba instrumenta i daje mogućnost za procenu merne nesigurnosti rezultata merenja.

Ključne reči—Simulacija, moduo i fazni stav impedanse, merna nesigurnost, Monte Karlo metoda, FLUKE 8846A.

I. UVOD

Pojam impedanse je definisao Oliver Heaviside (Oliver Heaviside) 1886. godine [1], a kompleksnu notaciju je uveo Artur Keneli (Arthur Kennelly) 1893. godine [2]. Kompleksna vrednost impedanse sadrži dva podatka: a) moduo impedanse predstavlja količnik amplitude napona i amplitude struje prostoperiodičnog talasnog oblika i b) fazni stav impedanse predstavlja razliku faznih stavova napona i struje. Ako se ograničimo na sampling metodu i prostoperiodični režim, potrebno je:

- a) sinhrono odabirati talasni oblik napona i struje,
- b) na osnovu odbiraka odrediti amplitude i fazne stavove napona i struje i
- c) odrediti moduo i fazni stav impedanse.

Za dobijanje odbiraka napona i struje su korišćena dva multimetra FLUKE 8846A, od kojih je jedan konfigurisan kao ampermetar, a drugi kao voltmetar. Oba instrumenta su konfigurisana za rad u jednosmernom (DC, *direct current*) režimu, kako bi se pristupanjem njihovim analogno-digitalnim (AD) konvertorima dobili odbirci merenih veličina.

Milan Šaš – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: milansas@uns.ac.rs)

Dragan Pejić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: pejicdra@uns.ac.rs)

Nemanja Gazivoda – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: nemanjagazivoda@uns.ac.rs)

Đorđe Novaković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: djordjenovakovic@uns.ac.rs)

Bojan Vujičić – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija (e-mail: bojanvuj@uns.ac.rs)

Ampermetar i voltmetar mogu da se konfigurisu da rade i u naizmeničnom (AC, *alternate current*) režimu, što se na prvi pogled čini logičnijim, jer se pojam impedanse i definiše u AC režimu. U tom slučaju bismo dobijali efektivnu vrednost napona i struje, što je dovoljno za određivanje modula impedanse. Određivanje faznog stava impedanse bi ostao nerešen problem, jer se ovakvim pristupom ne raspoložuje vrednošću faznog stava napona i struje.

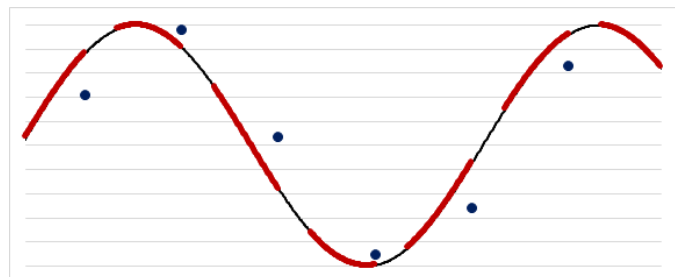
Korišćeni multimetri imaju ugrađen integrišući (*multi slope*) AD konvertor [3]. Umesto da vrše odabiranje u tački, ovi AD konvertori ustvari određuju srednju vrednost ulazne veličine na intervalu integraljenja zadanog trajanja. Integrišući AD konvertori imaju osobinu da potiskuju smetnje čija je perioda ceo broj puta duža od trajanje integraljenja, zbog čega se vrlo često koriste u industrijskim uslovima gde se očekuje značajno prisustvo smetnje mrežne frekvencije. Trajanje vremena integraljenja se zadaje parametrom NPLC (*Number of Power Line Cycles*). Kod korišćenih multimetara, pored celobrojnih vrednosti za NPLC, postoje i vrednosti manje od jedan, a najmanja je 0.02. Za minimalnu vrednost parametra NPLC, pri mrežnoj frekvenciji od 50 Hz, se dobija najkraće vreme integraljenja od $0.02/50 \text{ Hz} = 0.4 \text{ ms}$. Vrednost najkraćeg vremena integraljenja i željeni broj odbiraka po periodi su dva parametra koji ograničavaju primenljivost ove metode pri višim frekvencijama prostoperiodične pobude. Kada se vreme integraljenja ponderiše i iskaže u odnosu na trajanje periode signala čije odabiranje se vrši, onda se koristi termin ugao integraljenja i iskazuje se u radijanima.

II. SIMULACIONI MODEL

Simulacioni model je realizovan u programskom jeziku Python [4] sa ciljem da se ispita uticaj bitnih parametara (broj odbiraka po periodi, trajanje/ugao integraljenja, greška ampermetra i voltmetra) na rezultate merenja (greška određivanja modula i faznog stava impedanse). Drugi razlog korišćenja simulacija je određivanje merne nesigurnosti dobijenih rezultata merenja simulacionim putem, odnosno primenom Monte Karlo metode.

Na Sl. 1. je prikazana ilustracija prostoperiodičnog talasnog oblika (crna linija) koji je doveden na ulaz integrišućeg AD konvertora. Vrednosti ulaznog talasnog oblika koje pripadaju periodima integraljenja su obeležene debljom linijom crvene boje. Rezultat AD konverzije se saopštava na kraju intervala integraljenja (plava tačka) i predstavlja srednju vrednost ulazne veličine u toku trajanja AD konverzije.

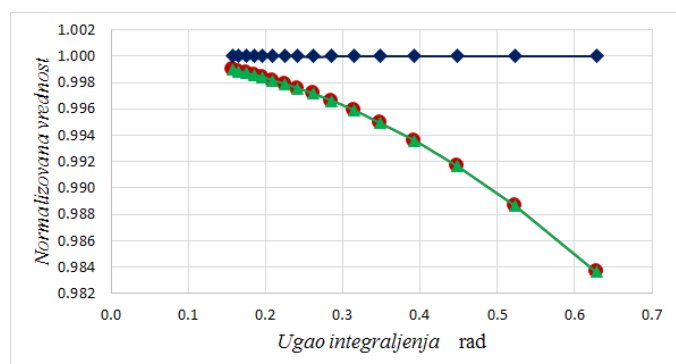
Sa Sl. 1. se vidi da rezultati AD konverzije (plave tačke) ne leže na ulaznom talasnom obliku (crna kriva), nego su fazno pomereni. Što je duži interval integraljenja u odnosu na periodu signala, dobija se sve veće fazno kašnjenje. Slična greška se javlja i u pogledu amplitude talasnog oblika koja bi bila određena na osnovu dobijenih odbiraka. Fazna i amplitudna greška teže nuli kada interval integraljenja teži nuli, odnosno kada integrišući AD konvertor postaje *sampling* AD konvertor.



Sl. 1. Ilustracija uticaja ugla integraljenja. Ulazni talasni oblik (tanka crna linija), integracioni period (debela crvena linija) i rezultat AD konverzije (plave tačke).

Postavlja se pitanje opravdanosti korišćenja integrišućeg AD konvertora za određivanje modula i faznog stava impedanse, kada međurezultati (amplitude i faze napona i struje) u sebi sadrže opisane greške. Simulacionim postupkom je proveravana navedena nedoumica.

Pretpostavljeni su prostoperiodični talasni oblici napona i struje na ulazu AD konvertora zadatog vremena integraljenja. Simulirano je odabiranje u svega pet tačaka po periodi, a onda je na osnovu odbiraka, postupkom fitovanja, određena amplituda i fazni stav napona. Na Sl. 2. je prikazan grafik zavisnosti normalizovane vrednosti (količnik vrednosti izmerene i zadate amplitude) opisanim postupkom određene amplitude napona i struje, kao i izračunatog modula impedanse. Na horizontalnoj osi je ugao integraljenja iskazan u radjanima, kako bi bio uporediv prema periodu prostoperiodične funkcije koja iznosi 2π rad.

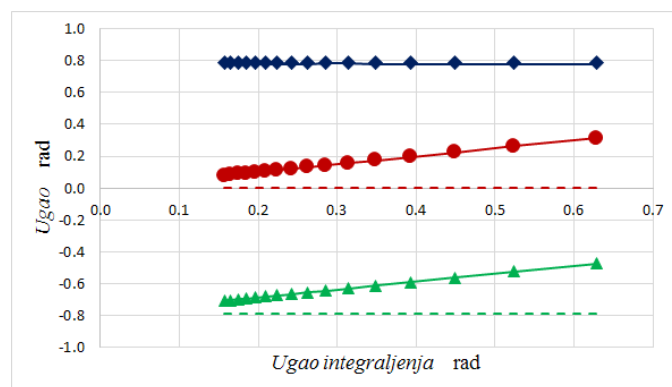


Sl. 2. Zavisnosti normalizovane vrednosti određene amplitude napona (crveni krugovi) i struje (zeleni trouglovi), kao i izračunatog modula impedanse (plavi rombovi).

Sa porastom ugla integraljenja javlja se sve primetnija sistematska greška, za koju se pokazuje da zavisi samo od ugla integraljenja. Greška je multiplikativnog tipa, jednaka je

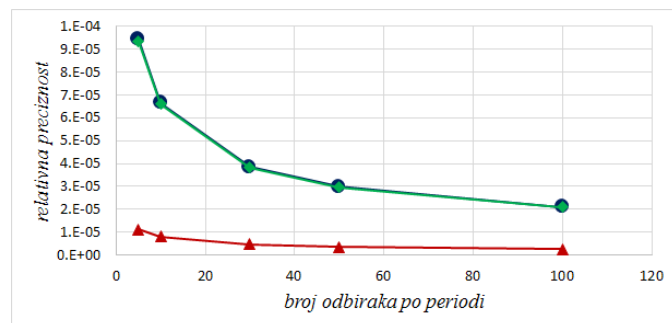
za napon (crvena karakteristika) i struju (zeleni karakteristika). Prilikom određivanja modula impedanse (plava karakteristika) kao količnika napona i struje dolazi do potiranja polaznih sistematskih greška. Ovo je vrlo korisna osobina jer se mogu sprovesti merenja sa vrlo velikim uglom integraljenja koja za posledicu ima značajnu sistematsku grešku od nekoliko procenata, a da se to ne odrazi na performanse određivanja modula impedanse.

Na Sl. 3. je data zavisnost određenog faznog stava napona (crveni krugovi), struje (zeleni trouglovi) i impedanse (plavi rombovi) od ugla integraljenja. Za zadatu vrednost faznog stava napona (crvena isprekidana linija) i struje (zeleni isprekidana linija), izmereni fazni stav napona i struje sadrži sistematsku grešku koja zavisi od ugla integraljenja. Ta greška je aditivnog tipa i jednaka je za napon i struju. Prilikom određivanja faznog stava impedanse (razlika faznog stava napona i faznog stava struje) dolazi do potiranja polaznih aditivnih sistematskih grešaka faznog stava napona i struje.



Sl. 3. Zavisnost rezultata određivanja faznog stava napona (crveni krugovi), struje (zeleni trouglovi) i faznog stava impedanse (plavi rombovi) od vrednosti ugla integraljenja.

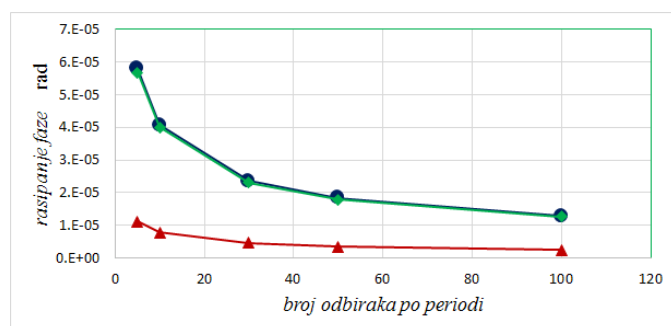
Nakon eliminacije uticaja sistematskih grešaka pri određivanju modula i faznog stava impedanse, u rezultatu merenja preostaju slučajne greške. Na Sl. 4. je prikazana zavisnost relativno iskazanog rasipanja (količnik standardne devijacije i srednje vrednosti rezultata merenja) prilikom određivanja amplitude naizmjenične komponente napona (crveni trouglovi) i struje (zeleni rombovi), kao i modula impedanse (plavi krugovi).



Sl. 4. Zavisnost relativno iskazane preciznosti (rasipanje) amplitude napona (crveno), struje (zeleno) i modula impedanse (plavo) od broja odbiraka po periodu.

Korišćeni voltmetar ima značajno manju grešku (desetak puta) nego ampermetar, pa je greška merenja struje dominantna prilikom određivanja modula impedanse. Ako se broj odbiraka po periodi poveća sa 5 na 100 (20 puta), dobije se nesrazmerno manje poboljšanje u preciznosti određivanja modula impedanse (svega 4.5 puta).

Na Sl. 5 je prikazana zavisnost rasipanja faznog stava napona (crveni trouglovi), struje (zeleni rombovi) i impedanse (plavi krugovi) od broja odbiraka po periodi. Važe slični zaključci u pogledu zavisnosti navedenih parametara od broja odbiraka po periodi.



Sl. 5. Zavisnost preciznosti (rasipanja) rezultata određivanja faznog stava napona (crveni trouglovi), struje (zeleni rombovi) i impedanse (plavi krugovi) od broja odbiraka po periodi.

III. MERNA NESIGURNOST

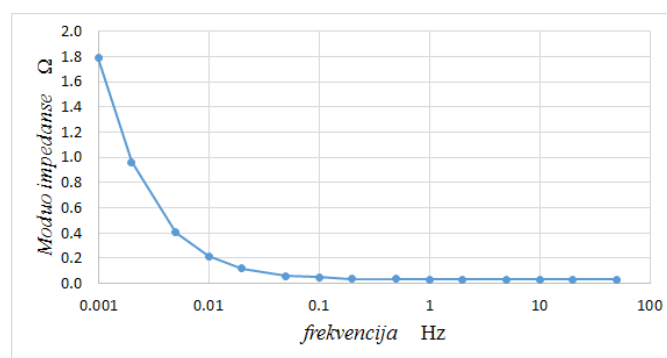
Dokument [5] predstavlja preporuke za iskazivanje merne nesigurnosti polazeći od matematičkog modela merenja. Matematički model merenja je izraz koji predstavlja zavisnost izlazne veličine od uticajnih veličina. U konkretnom slučaju, izlazne veličine (čiju mernu nesigurnost želimo da odredimo) su moduo i fazni stav impedanse. Neke od uticajnih veličina su: greške ugrađene u odbirke napona i struje, greška postupka određivanja amplitude i faznog stava napona prostoperiodične veličine na osnovu odbiraka i trajanje intervala integraljenja. Pristupom opisanim u [5] se vrši analiza propagacije mernih nesigurnosti ulaznih veličina na izlaznu veličinu.

Pored velikog broja uticajnih veličina, poseban problem u konkretnom slučaju je nepoznavanje načina funkcionisanja Python-ove funkcije *curve_fit*, koja je preuzeta iz biblioteke *scipy* [7]. Ova funkcija je korišćena za fitovanje prostoperiodične funkcije kroz dobijeni skup odbiraka, radi određivanja amplitude i faznog stava napona i struje.

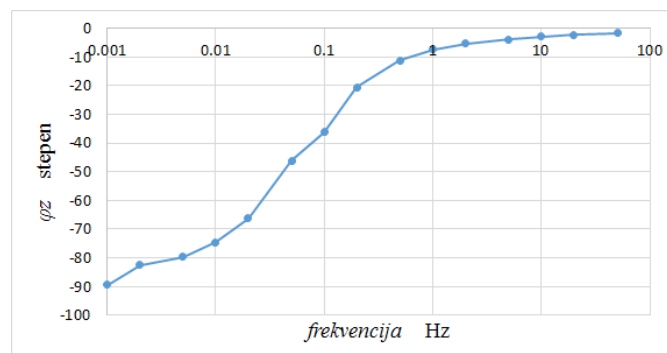
Drugi način za određivanje merne nesigurnosti, opisan u [6], je zasnovan je na simulacionom postupku, odnosno na primeni Monte Karlo metode. Kod ovog postupka se uticajne veličine posmatraju kao slučajne promenljive i vrši se analiza propagacije funkcije gustine uticajnih veličina na funkciju gustine izlazne veličine. Veliki broj puta (preko 10^5) se simulira postupak merenja uz uvažavanje funkcije gustine svake od uticajnih veličina. Za dobijene vrednosti izlazne veličine se određuje funkcija gustine, srednja vrednost i standardna devijacija. Srednja vrednost se saopštava kao

najbolja procena izlazne veličine, dok vrednost standardne devijacije predstavlja standardnu mernu nesigurnost.

Na Sl. 6 i Sl. 7. su prikazani rezultati određivanja modula i faznog stava impedanse superkondenzatora za frekvencije počev od 1 mHz do 50 Hz. Za sva merenja je definisano najkraće vreme integraljenja (0.4 ms), uzimano je sedam odbiraka po periodi u tri susedne periode napona i struje. Odbirci napona i struje su kao argument prosleđivani funkciji *curve_fit*, a kao izlaz su dobijene najbolje procene amplitude i faznog stava naizmenične komponente pretpostavljenog prostoperiodičnog oblika. Moduo impedanse se određuje kao količnik amplituda prostoperiodične komponente napona i struje. Fazni stav impedanse se određuje oduzimanjem faznog stava napona i struje.



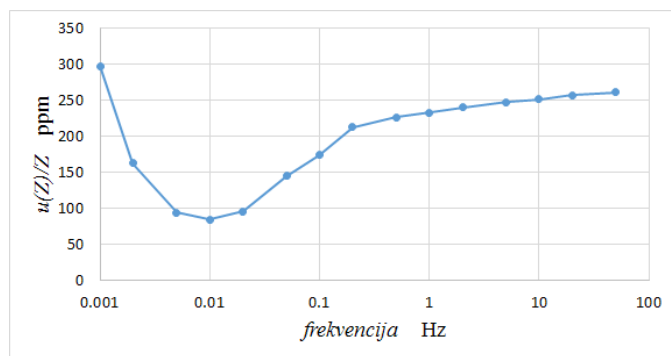
Sl. 6. Zavisnost modula impedanse superkondenzatora od frekvencije.



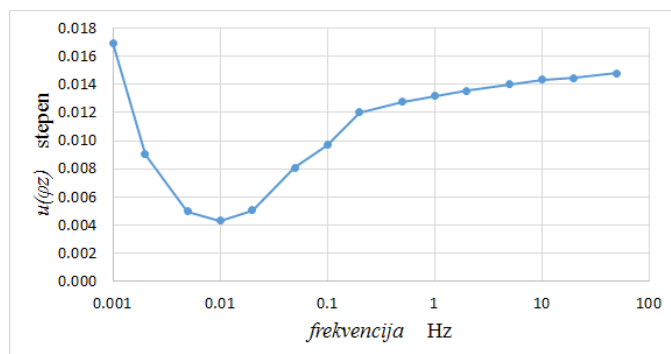
Sl. 7. Zavisnost faznog stava superkondenzatora od frekvencije.

Korišćenjem Monte Karlo postupka je određena standardna merna nesigurnost (standardna devijacija) modula i faznog stava impedanse superkondenzatora. U simulaciji su modelovane: greška AD konvertora na naponskom i strujnom kanalu za svaki odbirak [4], vreme integraljenja zadato parametrom NPLC, broj tačaka po periodi i broj perioda. U nedostatku dodatnih informacija, sve greške su modelovane uniformnom raspodelom. Zavisnost relativno iskazane standardne merne nesigurnosti modula impedanse superkondenzatora od frekvencije je prikazana na Sl. 8.

Standardna merna nesigurnost faznog stava impedanse superkondenzatora je prikazana u apsolutnom obliku na Sl. 9.



Sl. 8. Zavisnost relativno iskazane standardne merne nesigurnosti modula impedanse superkondenzatora od frekvencije.



Sl. 9. Zavisnost apsolutno iskazane standardne merne nesigurnosti faznog stava impedanse superkondenzatora od frekvencije.

Relativno iskazana standardna merna nesigurnost modula impedanse superkondenzatora je manja od 300 ppm, dok je apsolutno iskazana standardna merna nesigurnost faznog stava impedanse superkondenzatora manja od 18 m° , odnosno 0.6 mrad .

IV. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana simulaciona analiza metode pogodna za snimanje modula i faznog stava impedanse dvokrajnog elementa na niskim učestanostima. Kao ampermetar i voltmetar su korišćeni standardni multimetri sa integrišućim AD konvertorom. Simulacioni postupak je korišćen iz dva razloga: a) da se oceni doprinosi uticajnih veličina i b) da se odredi merna nesigurnost. Pokazano je da:

- prilikom određivanja modula impedanse (deljenjem procenjene vrednosti amplitude prostoperiodične komponente napona i struje) dolazi do potiranja multiplikativne sistematske greške,
- prilikom određivanja faznog stava impedanse (razlika procenjenog faznog stava napona i struje), dolazi do potiranja aditivne sistematske greške,
- povećanje broja odbiraka po periodu ne doprinosi srazmerno poboljšanju metroloških performansi rezultata merenja,

- pod pretpostavkom uniformnih raspodela greške AD konvertora na naponskom i strujnom kanalu, primenom Monte Karlo metode je određena merna merna nesigurnost rezultata merenja.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u sklopu internog projekta Centra za metrologiju pod nazivom "Razvoj naučno-stručnih metoda u oblasti SMART koncepata u industriji, naučne i industrijske metrologije, neuronauka i biomedicinskih merenja primenom napredne metodologije i digitalne tehnologije".

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta MPNTR 200156 : "Inovativna naučna i umetnička ispitivanja iz domena delatnosti FTN-a".

LITERATURA

- [1] Oliver Heaviside, The Electrician, p. 212, 23 July 1886, reprinted as Electrical Papers, Volume II, p 64, AMS Bookstore, ISBN 0-8218-3465-7
- [2] Kennelly, Arthur. Impedance (AIEE, 1893)
- [3] <https://us.flukecal.com/products/data-acquisition-and-test-equipment/bench-multimeters/8845a8846a-65-digit-precision-multime>
- [4] <https://www.python.org/>
- [5] https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6
- [6] https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_101_2008_E.pdf/325dcaad-c15a-407c-1105-8b7f322d651c
- [7] <https://scipy.org/>

ABSTRACT

The paper presents a simulation analysis of a method that is applicable for the metrology characterization of two-end elements at low frequencies. The program written in the Python programming language simulates the operation of two multimeters of the FLUKE 8846A, one of which is configured as an ammeter and the other as a voltmeter. Voltage and current samples are processed in a program, which determines the value of the amplitude of the alternating component and the phase position of voltage and current based on the samples, and then calculates the modulus and phase position of the impedance based on these values. The program takes into account the declared errors of both instruments and provides an opportunity to assess the measurement uncertainty of the measurement results.

Simulation analysis of methods suitable for metrology characterization of impedance at low frequencies

Milan Šaš, Dragan Pejić, Nemanja Gazivoda, Đorđe Novaković, Bojan Vujičić