

Modernizacija laboratorijskih vežbi iz prenosa toplote za studente elektroenergetike

Marko Novković, Zoran Radaković

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

radakovic@etf.bg.ac.rs / Bulevar kralja Aleksandra 73

Sažetak— U radu se prikazuje komplet laboratorijskih vežbi iz prenosa toplote koji služi za upoznavanje studenata sa ovom važnom oblašću fizike čije je poznavanje potrebno u širokoj praktičnoj primeni u elektro-energetici. Prikaz je dat kao kratak istorijski pregled ovih vežbi, koji je pratio razvoj dostupne tehnologije. Poslednji razvojni korak je izrada softverske podrške, koja omogućava efikasniji (sadržajni i brži) proces obrazovanja. Softver je razvijen u programskom jeziku C# i Windows Presentation Foundation (WPF). Za svaku od vežbi, kojima je ilustrovan neki od principa prenosa toplote provođenjem, strujanjem i zračenjem, data je matematička osnova na kojoj se baziraju vežbe. Pored navedenog, opisan je i sadržaj koji studenti mogu da upoznaju u vezi sa metodama za merenje temperature.

Ključne riječi – edukacija, prenos toplote, provođenje, strujanje, zračenje, merenje temperature (Education, Heat transfer, Conduction, Convection, Radiation, Temperature measurements)

I. UVOD

Proces obrazovanja je pun izazova. Jedan od ključnih faktora je trenutni razvoj tehnologije. Ovde se manje misli na dostupnost informacije – na samo znanje nema velikog uticaja da li je informacija napisana u knjizi kucanoj pisačom mašinom ili je dostupna na internetu. Dakle, više se misli na tehnologije dostupne za potrebne inženjerske proračune, poput „šiber tehnike“ ili analognih računara, koje su bile standard u ne tako dalekoj prošlosti, posle Drugog svetskog rata. Dakle, osnovna fizika je po pravilu „konstanta“, ali se menjaju tehnologije i alati za rešavanje matematičkih iskaza tih zakonitosti fizike. Iz navedenog sledi da je kroz obrazovni proces neophodno pružiti i znanje fizike i primenu alata u skladu sa aktualnom tehnologijom. Manjkavost jedne ili druge komponente ne dovodi do rezultata koji sa očekuje od univerzitetskog obrazovanja koje treba da dobije jedan razvojni inženjer. Obrazovanje koje bi se oslanjalo na standarde i čiji bi fokus bio na uvežbavanju primene programskih alata ne deluje kao dobar pristup. Nesporno je da je sticanje bilo kakve veštine korisno, ali treba imati u vidu da odlaskom u kompanije mlad inženjer po pravilu prolazi kroz proces upoznavanja i uvežbavanja alata koji se koriste u kompaniji – bilo da su to opšti komercijalni softveri ili softverski alati razvijani u kompaniji (tipično za veće kompanije i za specifične tehničke proračune).

Tema ovog rada je prenos toplote. On je izabran kao jako važna komponenta, ali ipak ne i prioritarna, za jednog

elektroinženjera energetske usmerenja. To čak pruža dodatni izazov i zahtev pred obrazovanje tokom studija, jer je fond časova koji se ovome mogu posvetiti ograničen i pod stalnim lupom.

Jedan od motiva za sprovođenje poslednje etape u razvoju ovih vežbi je modernizacija, kroz primenu softvera za unos i obradu rezultata merenja. Na taj način se studentima skraćuje nepotrebno trošenje vremena. Sa druge strane, važno je održati i kontrolu znanja studenata, odnosno nivo znanja koji treba da poseduju u fazi dolaska na laboratorijske vežbe i po njihovom završetku. Dodatni aspekt je i dodeljivanje bodova za ove predispitne obaveze – potrebno je ostvariti korektno ocenjivanje studenata, uz optimizaciju vremena saradnika angažovanih na laboratorijskim vežbama.

II. SADRŽAJ LABORATORIJSKIH VEŽBI

Kao sa baznim i sveprisutnim sadržajem u toplotnoj tehnici studenti se prvo upoznaju sa merenjem temperature.

Iz prenosa toplote provođenjem posmatraju se dva primera, koja odgovaraju sledećim praktičnim tehničkim problemima: a) određivanje gubitaka kroz kanal pravougaonog poprečnog preseka kroz koji se transportuje voda temperature 90 °C, dok je temperatura spoljašnjeg omotača kanala 10 °C, b) određivanje promene temperature zagrevanog bazisa cilindra u vremenu, koji je po omotaču idealno toplotno izolovan, na jednom bazisu se hladi strujanjem vazduha, a drugi bazis mu se zagreva konstantnom snagom gubitaka. Oba slučaja se razmatraju preko modela toplotnih pojava. U prošlosti, za rešavanje prvog problema se koristila elektroprovodna hartija i električni model (detalji se mogu naći na [1]). U trenutnoj, savremenoj, postavci vežbe, koriste se rezultati FEM softvera. Za rešavanje drugog problema se koristi Beuken-ov model [2] – preko električnog analognog kola se predstavlja i u potpunosti simulira toplotni sistem. U jednom periodu problem je rešavan i primenom računarskih simulacija, prvo u simulacionom paketu TUTSIM [1], a zatim i Simulnk. Sve vreme primena Beuken-ovog modela se održavala kao aktivna laboratorijska vežba, a tako je i sada, jer se smatrala kao pogodna sa edukativne strane, pošto oblast prenosa toplote približava studentu preko električnih kola, koja spadaju u domen osnovne struke za koju se školuju studenti, sa dominantnim fondom nastave. Zadatak koji studenti rešavaju primenom računarskih simulacija je nešto kompleksniji, i u novoj akreditaciji se planira za držanje na predmetu na četvrtog

godini studija, dok se držanje vežbi koje se opisuju u ovom radu planira na drugoj godini studija.

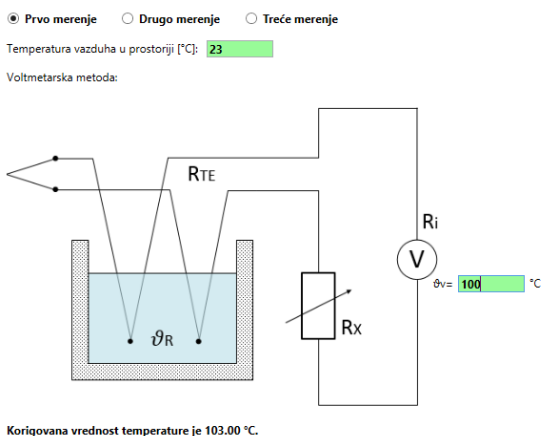
Iz prenosa toplote strujanjem se sprovode eksperimenti iz kojih se može odrediti srednja vrednost koeficijenta prenosa toplote strujanjem sa čvrstog tela na vazduh. Za ravnu tanku ploču se koristi indirektna metoda, po kojoj se ukupna snaga prenosa toplote strujanjem određuje iz energetskog bilansa, kao razlika snage koja se uzima iz mreže, i snage kojom se toplota u okolinu prenosi zračenjem. Za grejač oblika paralelopipida se koristi direktna metoda, po kojoj se ukupna snaga prenosa toplote strujanjem određuje na osnovu merenja brzine strujanja vazduha i porasta temperature vazduha koje nastaje usled prelaska toplote sa površi grejača.

Iz prenosa toplote zračenjem studenti određuju prostornu raspodelu ukupne (u čitavom spektru) snage zračenja. Raspodela se iskazuje kao promena jačine zračenja. Mere se površinske gustine snage zračenja koje padaju na mernu tačku, u koju je postavljen senzor mernog uređaja. Iz izraza koji povezuju jačinu zračenja (posmatrajući izvor kao tačkast) i površinsku gustinu snage koja pada na mernu tačku, izračunavaju se vrednosti jačine zračenja za različite uglove u jednoj ravni, odnosno prostorna raspodela snage zračenja.

III. MERENJE TEMPERATURE

Studenti sprovode 3 merenja temperature. Pre svakog merenja se aktivira odgovarajući *radio button*.

Za metodu voltmetra, instrument (voltmetar koji meri termoelektromotornu silu termopara i ima skalu koja je direktno baždarena po temperaturi) za merenje temperature na lokaciji toplog spoja termopara pokazuje temperaturu pod pretpostavkom da je temperatura ambijenta (hladnih krajeva termopara) jednaka 20 °C. U slučaju da je temperatura ambijenta (ϑ_a) različita od 20 °C, temperaturu izmerenu instrumentom treba sabrati sa razlikom temperatura ambijenta - 20 °C. Ovakav postupak ne dovodi do velike greške u slučaju da se temperatura ambijenta ne razlikuje mnogo od 20 °C. Na Sl. 1 je prikazana automatska korekcija koju vrši program na bazi vrednosti koju studenti izmere na voltmetru, kao i izmerene temperature ambijenta.



Slika 1. Električna šema voltmetarske metode

Za kompenzacionu metodu, meri se vrednost elektromotorne sile termopara (ε_x). Iz polinoma termopara, u ovom slučaju

$$\varepsilon_a(\vartheta_a) = \sum_{i=0}^8 c_i \vartheta_a^i [\mu V] \quad (1)$$

gde je

TABELA I Koeficijenti za jednačinu (1)

c_0	0
c_1	5.40313308631
c_2	$1.25934289740 \times 10^{-2}$
c_3	$-2.32477968689 \times 10^{-5}$
c_4	$3.22028823036 \times 10^{-8}$
c_5	$-3.31465996389 \times 10^{-11}$
c_6	$2.55744251786 \times 10^{-14}$
c_7	$-1.25068871393 \times 10^{-17}$
c_8	$2.71443176145 \times 10^{-21}$

odredi se vrednost koja odgovara temperaturi ϑ_a [°C], $\varepsilon_a(\vartheta_a)$. Iz zbira $\varepsilon^* = \varepsilon_x + \varepsilon_a$ se, primenom inverznog polinoma termopara

$$\vartheta_a(\varepsilon_a) = \sum_{i=0}^9 k_i \varepsilon_a^i [^{\circ}C] \quad (2)$$

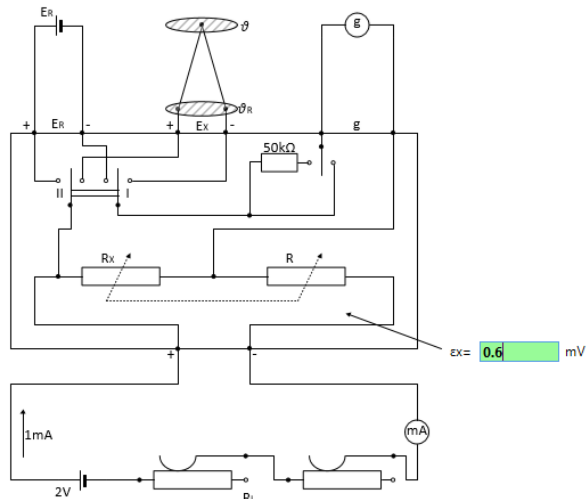
gde je

TABELA II Koeficijenti za jednačinu (2)

k_0	0
k_1	$1.84949460 \times 10^{-1}$
k_2	$-8.00504062 \times 10^{-5}$
k_3	$1.02237430 \times 10^{-7}$
k_4	$-1.52248592 \times 10^{-10}$
k_5	$1.88821343 \times 10^{-13}$
k_6	$-1.59085941 \times 10^{-16}$
k_7	$8.23027880 \times 10^{-20}$
k_8	$-2.34181944 \times 10^{-23}$
k_9	$2.79786260 \times 10^{-27}$

dobija vrednost temperature na toplom spoju termopara. Oba polinoma su ugrađena u program, koji automatski sprovodi navedeni postupak proračuna iz vrednosti ε_x koju unesu studenti (vrednost ϑ_a se unosi kod metode voltmetra) – Sl. 2.

Kompenzaciona metoda:



Ukupna EMS je 0.73 mV, pa je dobijena temperatura 111.42 °C.

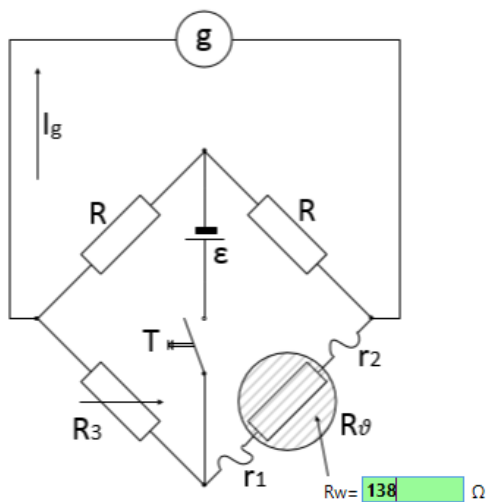
Slika 2. Električna šema kompenzacione metode

Preostale dve metode se baziraju na primeni termootpornika. Prva od metoda se zasniva na merenju otpornosti *Wheatstone*-ovim mostom. Studenti uravnotežavaju most i izmerenu vrednost otpornosti termootpornika upisuju u program, koji, koristeći formulu zavisnosti temperature od otpora, koja je standardizovana i za korišćene PT100 otpornike glasi

$$\vartheta = \frac{-R_0 A + \sqrt{R_0^2 A^2 - 4 R_0 B (R_0 - R_t)}}{2 R_0 B} \quad (3)$$

($A=3.9083 \times 10^{-3}$, $B=-5.775 \times 10^{-7}$, R_0 i R_t su otpornosti termootpornika na 0°C - u slučaju u vežbi $R_0 = 100 \Omega$ i merenoj temperaturi) izračunava temperaturu na mestu postavljanja termootpornika (Sl. 3).

Wheatstone-ov most:

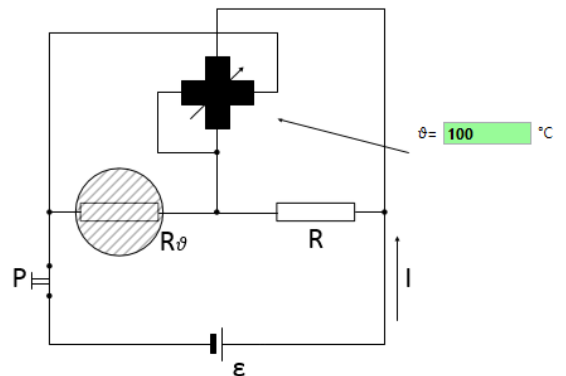


Izmerena vrednost temperature je 98.67 °C.

Slika 3. Električna šema metode sa *Wheatstone*-ovim mostom

Konačno, temperatura se pomoću termootpornika meri i logometarskim instrumentom, čija je skala direktno izbaždarena po temperaturi. Za logometarski instrument studenti upisuju vrednost temperature pročitane na logometru (Sl. 4).

Logometar:



Slika 4. Električna šema logometarske metode

Po pritisku na dugme Upiši u tabelu, sve vrednosti koje su u poljima na Sl. 1 – 4, za merenje (1 – 3) koja su trenutno selektovana *radio button*-om, se upisuju u red u tabeli koji odgovara broju merenja 1, 2 ili 3. Gde god postoje oba merenja koja se porede (dva merenja termoparom ili dva merenja termootpornikom), program odmah izračunava i u tabelu upisuje vrednost međusobnog odstupanja merenja (Sl. 5).

Upiši u tabelu

Termoparovi								Termootpornici			
Metoda voltmetra		Kompenzaciona metoda						Logometar	Wheatstone-ov most		
ϑ_v	ϑ_x	ϑ_{VK}	ε_x	ε_e	ε_t	ϑ_t	$\vartheta_t - \vartheta_{VK}$	ϑ_l	R_{WV}	ϑ_{WV}	$\vartheta_{WV} - \vartheta_l$
°C	°C	°C	mV	mV	mV	°C	K	°C	Ω	°C	K
100.00	23.00	103.00	0.60	0.13	0.73	111.42	8.42	100.00	138.00	98.67	-1.33
150.00	23.00	153.00	0.90	0.13	1.03	150.16	-2.84	150.00	155.00	143.78	-6.22
200.00	23.00	203.00	1.30	0.13	1.43	196.80	-4.20	200.00	175.00	167.67	-2.33

Slika 5. Tabela sa rezultatima proračuna

Pored opisanih klasičnih merenja, u ovoj vežbi studenti mogu da se upoznaju, na nivou demonstracije, sa merenjem temperature beskontaktnim putem, kao i primenom mikroprocesorske tehnike. U prošlosti, od beskontaktnih metoda merenja temperature se koristio monohromatski optički pirometar [3], a sada studenti imaju prilike da se upoznaju sa tačkastim laserskim meračem temperature i termovizijskom kamerom. Od savremene mikroprocesorske tehnike, studenti mogu da vide kako se signal temperature dovodi na programabilni logički kontroler (PLC) i na signalni procesor kojim se vrši kontrola temperature elektrootporne grejne staklokeramičke ploče. Konačno, demonstrira se i realizacija temperaturnog senzora čiji se signal do mesta prikaza informacije prenosi bežičnim putem. Ovi savremeni sadržaji su opisani u uputstvu za laboratorijsku vežbu [4].

IV. PROVOĐENJE

Deo vežbe sa FEM proračunom je demonstracionog karaktera. Za deo vežbe sa Beuken-ovim modelom studenti unapred dobijaju parametre valjka („karakteristike valjka“) koji se zagreva i treba da izračunaju koeficijente svođenja vrednosti iz toplotnog sistema u električni i obrnuto. U razvijenoj programskoj podršci postoje maske u koje studenti unose vrednosti koje izračunavaju. Po unosu broja program proverava tačnost i zelenom bojom markira polje ukoliko je broj tačan (Sl. 6). Pre sprovođenja vežbe (osciloskopsko snimanje naponskog odziva na Hevisajdovu step funkciju struje) je potrebno podesiti vrednost „Otpornost kojom se simulira odvođenje toplote strujanjem [Ω]“ – vrednost u poslednjem redu sa zelenom markacijom vrednosti. Sa osciloskopskog snimka se očitava stacionarna vrednost (Amplituda napona [V]) i vreme posle koga napon dostigne 63 % stacionarne vrednosti (Vremenska konstanta [ms]). Na osnovu koeficijenata svođenja napon / porast temperature i vreme u električnom sistemu / vreme u toplotnom sistemu, program vrši preračunavanja i daje vrednost Stacionarnog porasta temperature i Ekvivalentne vremenske konstante toplotnog procesa, kao konačan rezultat vežbe (Sl. 7).

Karakteristike valjka:

Dužina valjka [m]: **1**
 Specifična toplotna provodnost [W/(mK)]: **1**
 Specifični zapreminski toplotni kapacitet [Ws/(m³K)]: **200000**

Proračunaj

Toplotna otpornost dela valjka [K/W]: **9.09**
 Toplotni kapacitet dela valjka je [J/K]: **1.12**

Koeficijenti proporcionalnosti:

-koeficijent proporcionalnosti za otpornost je [(K/W)/Ω]: **4.55e-5**
 -koeficijent proporcionalnosti za kapacitivnost je [(J/K)/F]: **1.37e11**
 -koeficijent proporcionalnosti za struju je [W/A]: **7.85e5**
 -koeficijent proporcionalnosti za napon je [K/V]: **35.7**
 -koeficijent proporcionalnosti za vreme je: **6.22e6**

Otpornost kojom se simulira odvođenje toplote strujanjem [Ω]: **140e3**

Slika 6. Unos parametara valjka i provera tačnosti vrednost koeficijenata koje su studenti proračunali

Amplituda napona [V] **3**
 Vremenska konstanta [ms] **1.2**

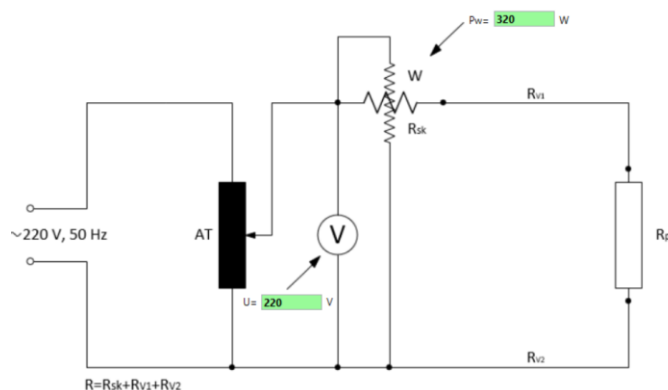
Stacionarni porast temperature je **107.14 K**.
 Ekvivalentna vremenska konstanta toplotnog procesa je **2.07 h**.

Slika 7. Obrada rezultata merenja

V. STRUJANJE

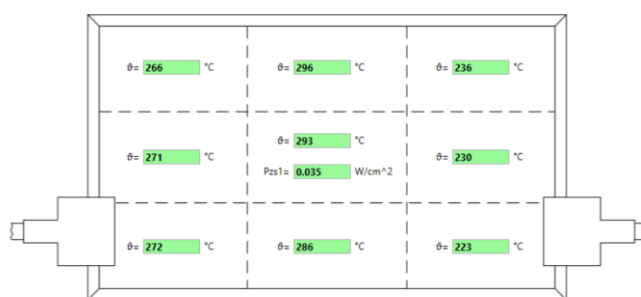
Indirektna metoda: Električni deo merenja, merenje snage koja se uzima iz mreže i napona napajanja, prikazan je na Sl. 8. U program je uneta vrednost otpora $R=0.62 \Omega$, iz čega program izračunava snagu koja se predaje samom grejaču (P_g). Sl. 9 prikazuje vrednosti merenja koja se vrše na jednoj strani grejača (temperatura u 9 tačaka i površinska gustina - $\mathcal{G}_1, \mathcal{G}_2, \dots, \mathcal{G}_9$ (\mathcal{G}_5 predstavlja temperaturu u središnjoj tački grejača) i

snaga zračenja oko središnje tačke P_{zs}). Sl. 10 pokazuje analogna merenja na drugoj strani grejača, kao i vrednost temperature ambijenta, potrebnu za izračunavanja.



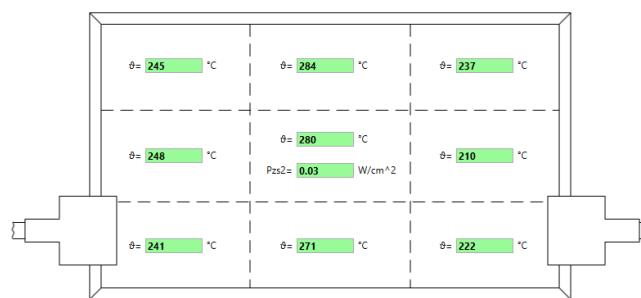
Slika 8. Električna šema laboratorijske vežbe

Strana grejača broj 1:



Slika 9. Prikaz strane broj 1 pločastog grejača

Strana grejača broj 2:



Temperatura vazduha u prostoriji [°C]: **23**

Slika 10. Prikaz strane broj 2 pločastog grejača

Sl. 11 prikazuje izračunate vrednosti. Emisivnost se izračunava preko

$$\varepsilon = \frac{P_{zs}}{5.67 \cdot 10^{-8} (\mathcal{G}_5 + 273.16)^4} \quad (4)$$

a snaga odvođenja toplote zračenjem sabiranjem snaga sa svake od strana grejača

$$P_z = \frac{S}{9} \sum_{i=1}^9 \varepsilon 5.67 \cdot 10^{-8} (\mathcal{G}_i + 273.16)^4 \quad (5)$$

gde je S površina jedne strane grejača. Koefficient prelaska toplote strujanjem sa tanke ploče na vazduh iznosi

$$\alpha = \frac{P_g - P_{z1} - P_{z2}}{S(\vartheta_{sr} - \vartheta_a)} \quad (6)$$

gde je ϑ_{sr} srednja vrednost izmerenih temperatura u 18 tačaka grejača (po 9 na svakoj od strana).

Proračunaj

Korisna električna snaga je 318.69 W.

Emisivnost strane 1 je 0.06008.

Emisivnost strane 2 je 0.05652.

Srednja vrednost emisivnosti je 0.05830.

Snaga odvođenja toplote zračenjem je 25.64 W

Snaga odvođenja toplote strujanjem je 293.05 W

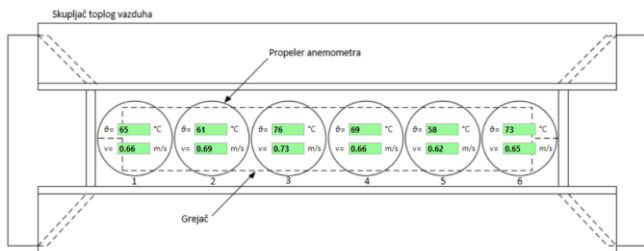
Koefficient prelaska toplotesa tanke ploče (grejača) na vazduh je 12.91 W/(m²K).

Slika 11. Rezultati proračuna

Direktna metoda: Na Sl. 12 su prikazana merenja brzine strujanja vazduha i temperatura vazduha u šest tačaka na otvoru iznad grejača, kroz koji odlazi zagrejan vazduh. Iz ovih vrednosti, kao i izmerene temperature ambijenta ϑ_a se izračunava snaga prenosa toplote strujanjem

$$P_{str} = \frac{S_{otv}}{6} \sum_{i=1}^6 \rho c_p v_i (\vartheta_i - \vartheta_a) \quad (7)$$

gde je S_{otv} površina otvora kroz koji odlazi zagrejan vazduh, a ρ i c_p temperaturno zavisni parametri vazduha – gustina i specifični maseni toplotni kapacitet. ρ se određuje prema vrednosti temperature, merene u svakoj od tačaka, a c_p prema srednjoj vrednosti temperature izmerene u svakoj od tačaka i ϑ_a .



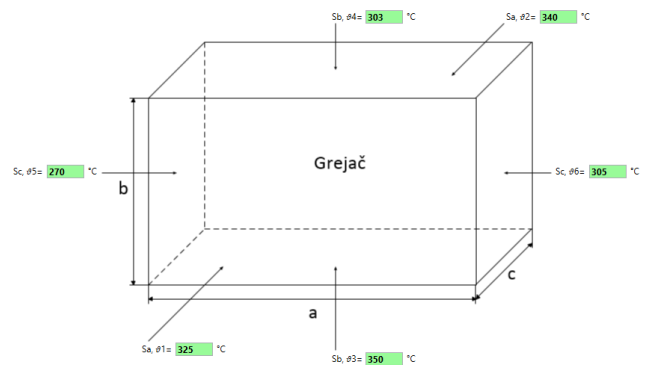
Slika 12. Prikaz kutije u koju je smešten grejač

Na Sl. 13 su prikazana merenja na sredini svake od 6 površi grejača. Srednja vrednost temperature grejača se izračunava uz uvažavanje veličine svake od 6 strana paralelopipeda:

$$\vartheta_{g, sr} = \frac{(\vartheta_1 + \vartheta_2)S_a + (\vartheta_3 + \vartheta_4)S_b + (\vartheta_5 + \vartheta_6)S_c}{2(S_a + S_b + S_c)} \quad (8)$$

Koefficient prelaska toplote strujanjem sa paralelopipednog grejača na vazduh iznosi

$$\alpha = \frac{P_{str}}{2(S_a + S_b + S_c)(\vartheta_{g, sr} - \vartheta_a)} \quad (9)$$



Temperatura vazduha u prostoriji [°C]: 22

Slika 13. Skica grejača sa naznačenim tačkama u kojima se meri temperatura

Na Sl. 14 su prikazane izračunate vrednosti.

Proračunaj

Snaga odvođenja toplote strujanjem je 1386.71 W.

Srednja temperatura grejača je 326.55 °C.

Koefficienta prelaska toplote prirodnim strujanjem sa čvrstog tela na vazduh je 17.80 W/(m²K).

Nova vežba

Snimi vežbu

Slika 14. Rezultati proračuna

VI. ZRAČENJE

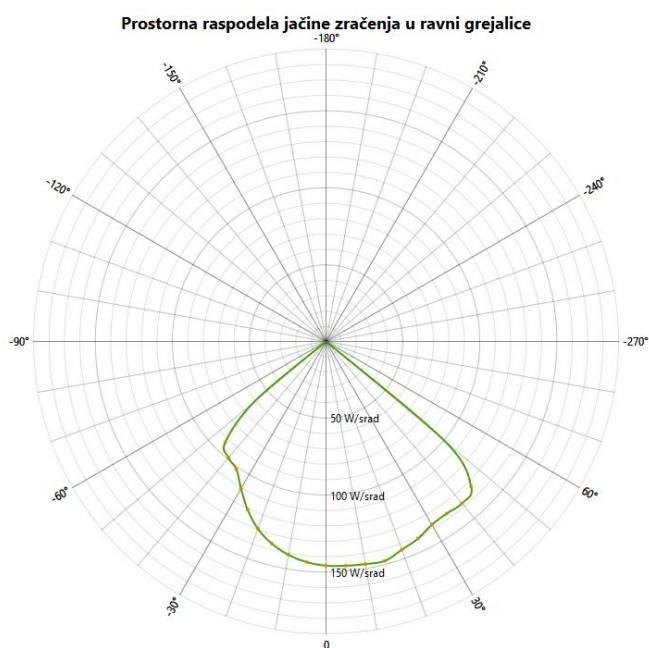
Na Sl. 15 je prikazana tabela sa vrednostima koje unose studenti (markirano zeleno). Tabela sadrži sve uglove za koje se određuju vrednosti jačine zračenja u ravni koja sadrži grejalicu. Prema uputstvu za vežbu, merenja se vrše za tri različite visine, za svaki od uglova i za svaku visinu se izračunavaju jačine zračenja,

$$J_\varphi = \frac{q_{s\varphi} h^2}{\cos^3 \varphi} \quad (10)$$

a konačna vrednost jačine zračenja za svaki od uglova se određuje kao srednja vrednost tri vrednosti, za taj ugao u tri različite visine za koje su izvršena merenja. Rezultati proračuna su takođe prikazani na Sl. 15. Na Sl. 16 je prikazan polarni dijagram – raspodela jačine zračenja u ravni grejalice.

$\varphi(^{\circ})$	$\tan\varphi$	$h_1=0,4\text{ m}$			$h_2=0,45\text{ m}$			$h_3=0,5\text{ m}$			$J_{\varphi} = \frac{\sum_{i=1}^3 J_{\varphi i}}{3} \text{ [W/srad]}$
		$l_1 \text{ [m]}$	$q_{s\varphi 1} \text{ [W/cm}^2\text{]}$	$J_{\varphi 1} \text{ [W/srad]}$	$l_2 \text{ [m]}$	$q_{s\varphi 2} \text{ [W/cm}^2\text{]}$	$J_{\varphi 2} \text{ [W/srad]}$	$l_3 \text{ [m]}$	$q_{s\varphi 3} \text{ [W/cm}^2\text{]}$	$J_{\varphi 3} \text{ [W/srad]}$	
-45	-1,000	-0,4000	0.015	67.8823	-0,4500	0.018	103.0962	-0,5000	0.015	106.0660	92.3481
-40	-0,839	-0,3356	0.021	74.7442	-0,3776	0.023	103.6074	-0,4195	0.02	111.2265	96.5260
-35	-0,700	-0,2801	0.029	84.4159	-0,3151	0.03	110.5230	-0,3501	0.024	109.1585	101.3658
-30	-0,577	-0,2309	0.039	96.0711	-0,2598	0.037	115.3546	-0,2887	0.031	119.3191	110.2482
-25	-0,466	-0,1865	0.053	113.9118	-0,2098	0.044	119.6880	-0,2332	0.038	127.6135	120.4044
-20	-0,364	-0,1456	0.065	125.3360	-0,1638	0.052	126.9027	-0,1820	0.045	135.5798	129.2729
-15	-0,268	-0,1072	0.078	138.4788	-0,1206	0.058	130.3232	-0,1340	0.05	138.7007	135.8342
-10	-0,176	-0,0705	0.086	144.0668	-0,0793	0.063	133.5707	-0,0882	0.055	143.9621	140.5332
-5	-0,087	-0,0350	0.091	147.2749	-0,0394	0.067	137.2357	-0,0437	0.058	146.6680	143.7262
0	0,000	0,0000	0.093	148.8000	0,0000	0.068	137.7000	0,0000	0.06	150.0000	145.5000
5	0,087	0,0350	0.091	147.2749	0,0394	0.068	139.2840	0,0437	0.06	151.7255	146.0948
10	0,176	0,0705	0.087	145.7420	0,0793	0.066	139.9312	0,0882	0.059	154.4321	146.7018
15	0,268	0,1072	0.08	142.0295	0,1206	0.062	139.3110	0,1340	0.058	160.8928	147.4111
20	0,364	0,1456	0.07	134.9772	0,1638	0.056	136.6645	0,1820	0.053	159.6829	143.7749
25	0,466	0,1865	0.06	128.9568	0,2098	0.049	133.2889	0,2332	0.048	161.1959	141.1472
30	0,577	0,2309	0.05	123.1681	0,2598	0.042	130.9430	0,2887	0.041	157.8091	137.3067
35	0,700	0,2801	0.04	116.4358	0,3151	0.035	128.9435	0,3501	0.036	163.7378	136.3724
40	0,839	0,3356	0.032	113.8959	0,3776	0.029	130.6355	0,4195	0.03	166.8397	137.1237
45	1,000	0,4000	0.025	113.1371	0,4500	0.024	137.4616	0,5000	0.024	183.8478	144.8155

Slika 15. Deo korisničkog interfejsa za unos podatka (markirano zeleno) i prikaz rezultata proračuna



Slika 16. Prostorna raspodela jačine zračenja u ravni grejalice

VII. ZAKLJUČAK

U radu se prikazuje razvijena programska podrška kojom su osavremenjene laboratorijske vežbe iz prenosa toplote za studente energetskog odseka elektrotehničkog fakulteta. Softver je razvijen u programskom jeziku C# i Windows Presentation Foundation (WPF). Cilj poduhvata je bio da se skрати vreme potrebno za izradu vežbi i usvajanje predviđenih programskih sadržaja. Jedan od očekivanih pozitivnih efekata

je da se studenti suoče sa prednostima primene aktuelnih dostupnih programskih alata za razvoj sličnih aplikacija.

LITERATURA

- [1] Radaković, Z., Jovanović, M. : Zbirka zadataka iz Elektrotermije sa priručnikom za laboratorijske vežbe, Elektrotehnički fakultet, 1995.
- [2] Beuken, D.L.: Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen. Dissertation Freiburg 1936.
- [3] http://term-procesi.etf.bg.ac.rs/lab_vezbe.html, Laboratorijska vežba 1, strana 18
- [4] http://term-procesi.etf.bg.ac.rs/lab_vezbe.html, Laboratorijska vežba 1, strana 19

ABSTRACT

The paper presents the set of laboratory exercises in heat transfer for the target group of the students of Electrical engineering, Power department. The presentation also contains a historical component, through brief notification how the exercises have been changed through the time, as the technologies have been changed. The last step of exercises development was introducing the software support, which makes the education process more efficient, keeping the content and saving time. The software is developed in C# and Windows Presentation Foundation (WPF). For each of the exercises, illustrating some of the principles of the heat conduction, convection and radiation, the basic equations are presented. In addition to that, the paper describes the content prepared for the students related to the temperature measurements, as the fundamental issue in heat transfer.

MODERNISATION OF LABORATORY EXERCISES IN HEAT TRANSFER FOR THE STUDENTS OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

Marko Novkovic, Zoran Radakovic