

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИ И ЦВЕТОВИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА LED ОСВЕТИТЕЛ С РЕГУЛИРУЕМА ЦВЕТНА ТЕМПЕРАТУРА

Пламен Цанков, Милко Йовчев, Пламен Данаилов  
*Технически университет - Габрово*

### STUDY OF ELECTRIC AND COLOR CHARACTERISTICS OF LED LUMINAIRE WITH ADJUSTABLE COLOR TEMPERATURE

Plamen Tsankov, Milko Yovchev, Plamen Danailov  
*Technical University of Gabrovo*

#### Abstract

*Study of electric and color characteristics of the LED luminaire with adjustable color temperature are presented. Electrical parameters current, active, reactive and apparent power, power factor and harmonic distortion of current, and also color characteristics - color temperature, color rendering index and dominant wave length of a LED luminaire are measured. The results are analysed and presented in tabular and graphical form.*

**Keywords:** LED luminaire, measuring, color temperature, total harmonic distortion of current, color rendering index.

#### ВЪВЕДЕНИЕ

Светодиодните (LED) осветители заместват конвенционалните осветители с луминесцентни, метал-халогенни и нажежаеми лампи за вътрешно приложение, поради редица свои предимства: дълъг експлоатационен срок – до 100 000 часа, висок светлинен добив – (100÷160) lm/W, сравнително добър индекс на цвето предаване –  $R_a = 80\div 90$  и възможност за димиране на светлинния поток  $\Phi$ . Обезпечаването на нормалната работа на LED източниците на светлина при захранване с номинално мрежово напрежение 230 V AC с честота  $f = 50$  Hz се извършва от специализирани драйвери. Използването на обикновени драйвери без специални филтри в тях води до несинусоидалност – един от показателите за качество на електрическата енергия, чрез генериране на висши хармоници на тока.

Общото хармонично изкривяване на тока  $THD_i$  се определя със следното уравнение:

$$THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2} / I_1 \cdot 100, \% \quad (1)$$

където  $I_1$  е токът на основния (първи) хармоник,  $I_n$  – сумата от хармоничните съставлящи на тока [1].

Регулирането на цветната температура  $T_c$  при светодиодите от технологията син LED и луминофор може да се постигне с нанасяне на луминофор от различен химичен състав и плътност на покритие над всеки LED. Цветната температура не носи информация за спектралния състав на излъчването [2,3]. Той се оценява с общия индекс на цвето предаване  $R_a$ , който се изчислява като средноаритметично от частните индекси  $R_i$ , дефинирани по уравнение (2):

$$R_i = 100 - 4.6 \Delta E_{ai}, \quad (2)$$

където  $\Delta E_{ai}$  са цветови разлики, получени при осветяване на цветни еталони с изследван и стандартен източник на светлина [4,5].

#### ИЗЛОЖЕНИЕ

В настоящата разработка се извършва изследване на електрическите и цветовите характеристики на LED осветител с ново техническо решение за регулиране на све-

тлинния поток и цветната температура. Изследва се LED плафон за вътрешно осветление с нововъведената функционалност, техническите характеристики на който са посочени в Табл. 1.

Табл. 1. Технически данни на LED плафона

Активна мощност P, [W]	Светлинен поток Ф, [lm]	Корелирана цветна температура T <sub>c</sub> , [K]	Степен на защита IP
100	5900	2700 ÷ 6500	20

Управлението на LED плафона (Фиг. 1) се извършва дистанционно. Осигурени са 9 степени (нива) на регулиране на светлинния поток и 7 степени на регулиране на цветната температура в интервала (2700÷6500) K. Предвидена е функционална възможност за последователно активиране

на три фиксирани стойности на цветната температура – 2700 K (топло-бяла), 4500 K (неутрално-бяла) и 6500 K (студено-бяла светлина).



Фиг. 1. Външен вид на изследвания LED плафон

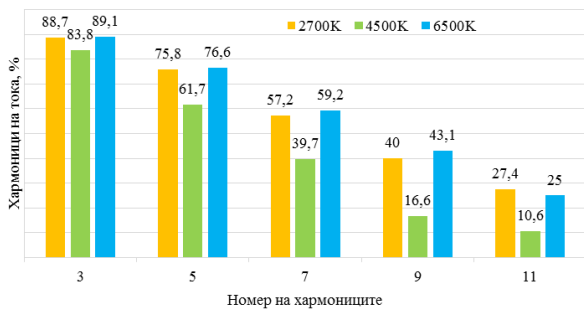
Табл. 2. Резултати от измервания на електрически параметри на LED плафон с регулиране на светлинния поток и цветната температура T<sub>c</sub>

Ниво на димиране	T <sub>c</sub> , [K]	I, [A]	P, [W]	Q, [var]	S, [VA]	cos φ	PF-cap	THDi, %	Максимално допустима стойност, %					
									I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>7</sub>	I <sub>9</sub>	I <sub>11</sub>
									2	30.PF	10	7	5	3
1 – Φ <sub>min</sub>	2700	0.04	3.6	4	10.1	0.68	0.37	154	4.4	34.4	52.2	53.4	52.1	44.6
	4500	0.05	4.9	4	13	0.78	0.37	186.6	4.1	61.8	65.4	61.3	54.7	54.6
	6500	0.04	3.8	8	9.8	0.69	0.37	155.1	4.4	52.2	55.2	50	50.7	44.7
2	2700	0.08	7.4	4.1	19.8	0.87	0.38	208	3.7	76.6	75.2	75	69.8	59
	4500	0.18	19.2	5.5	43.1	0.96	0.45	185.1	2.5	87.3	82.1	76.3	65.4	52.7
	6500	0.08	7.1	3.9	19	0.88	0.38	201.8	3.8	74.2	76.6	72	67.5	64.7
3	2700	0.15	14.9	4.8	35.5	0.95	0.44	197.8	1.4	89.4	83.7	78	68.1	63
	4500	0.24	29.1	7.2	58.4	0.96	0.49	165.1	1.3	88.9	79.4	68.5	53.9	39.8
	6500	0.14	14.5	4.6	34.7	0.95	0.42	199.8	2.1	87.2	84.2	80.4	71.8	62.5
4	2700	0.19	20	5.7	45.8	0.96	0.45	184.3	2	87.3	85.1	77.5	64.1	55.5
	4500	0.28	33.3	8.8	66.4	0.96	0.52	153.1	1.2	87.6	77.2	63	41.3	30.6
	6500	0.18	19.9	5.4	43.8	0.96	0.46	184.3	1.5	88.9	84.2	79	71.3	51.7
5	2700	0.22	24.6	6.8	53.6	0.96	0.47	176.1	1.2	88.5	82.9	72.2	61.4	48.4
	4500	0.3	38.1	10.9	70.7	0.96	0.53	143.5	0.9	87.5	72.5	56.9	39.2	22.7
	6500	0.23	24.1	6.5	51.4	0.95	0.48	178.9	1.2	90	83	73.2	59.6	47.3
6	2700	0.24	28.8	7.1	58.8	0.96	0.49	168.6	1.6	88.9	80.6	68.8	55.1	10.4
	4500	0.32	44	11.7	77.1	0.96	0.56	135.7	1	87	71.1	50.4	28.8	18.6
	6500	0.24	27.9	7	57.8	0.97	0.48	170.1	1.5	89.6	81.9	69.5	56.8	45.6
7	2700	0.26	31.2	8	62.1	0.96	0.5	161.6	0.9	88	78.5	64.9	48.7	33.4
	4500	0.35	49.3	13.7	84.3	0.96	0.59	127.1	0.7	86.8	67	46.7	24.3	15.3
	6500	0.26	30.6	7.8	62.5	0.97	0.5	162.1	1.7	89.9	80.3	64.7	55	35
8	2700	0.27	34.7	8.8	65.8	0.96	0.52	150.6	0.7	88.7	77.4	63.2	45.5	31.8
	4500	0.37	54.4	15.1	90.3	0.96	0.61	121.9	0.9	84.7	64.1	41	20.9	12.2
	6500	0.28	35	9	68.2	0.97	0.52	152	1	89.2	77	60.8	46.2	33.5
9 – Φ <sub>max</sub>	2700	0.29	37.2	10.1	70.4	0.96	0.54	146.4	0.5	88.7	75.8	57.2	40	27.4
	4500	0.38	57	16.2	91.3	0.96	0.62	115.7	0.6	83.8	61.7	39.7	16.6	10.6
	6500	0.3	37	9.4	70.6	0.95	0.53	148.1	1.2	89.1	76.6	59.2	43.1	25

С помощта на електроенергиен анализатор MPR 63 се извършва изследване на

изменението на електрическия ток I, активната P, реактивна Q и пълна S мощност, cos

$\varphi$ , фактора на мощността  $PF$  (с капацитивен характер  $PF\text{-cap}$ ), общото хармонично изкривяване на тока  $THDi$  и отделни хармонични съставлящи на тока, представени като % от основния хармоник при 9-те нива на регулиране на светлинния поток за всяка от трите фиксирани цветни температури. Ниво 1 съответства на минимален светлинен поток ( $\Phi_{min}$ ), а ниво 9 на максимален светлинен поток ( $\Phi_{max}$ ) на осветителя. Резултатите от измерванията са представени в Табл. 2. Установява се, че стойностите на хармоничните съставлящи на тока не отговарят на допустимите, посочени в стандарта, с изключение на подчертаните стойности за втори хармоник  $I_2$ . Измерванията се извършват при общо хармонично изкривяване на напрежението в мрежата  $THDu = 1\%$ .

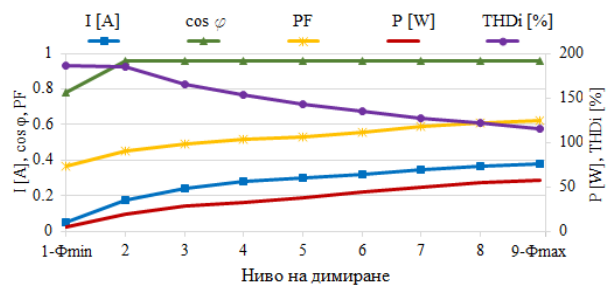


Фиг. 2. Измерени висши хармоници на тока

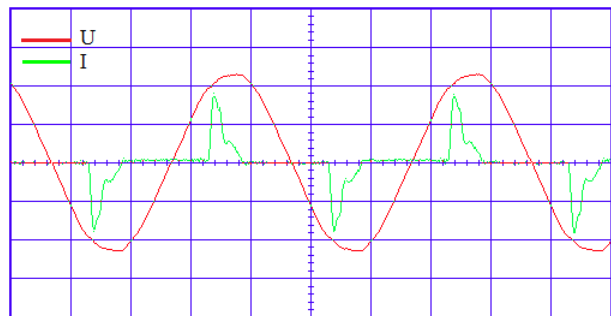
На Фиг. 3 е показано изменението на тока  $I$ ,  $\cos \varphi$ , фактора на мощност  $PF$ , активната мощност  $P$  и общото хармонично изкривяване по ток  $THDi$  при различните степени на регулиране на светлинния поток на LED осветителя при зададена цветна температура  $T_c = 4500$  K.

Резултатите от Табл. 2 и Фиг. 3 показват, че с увеличаване на светлинния поток от  $\Phi_{min}$  към  $\Phi_{max}$  (последователно от ниво 1 до ниво 9), токът, активната мощност и факторът на мощността се увеличават, докато  $THDi$  намалява почти линейно, а  $\cos \varphi$  остава приблизително постоянен за трите фиксирани цветни температури.

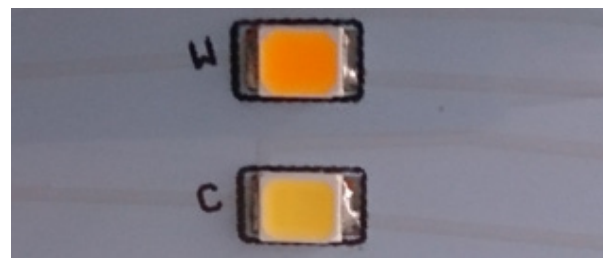
На Фиг. 4 са показани формата на напрежението  $U$  и тока  $I$  при работа на LED плафона с максимален светлинен поток (димирание при ниво 9).



Фиг. 3. Изменение на електрическите параметри  $I$ ,  $\cos \varphi$ ,  $PF$ ,  $P$  и  $THDi$  на изследвания LED плафон



Фиг. 4. Форма на напрежението и тока на LED плафона



Фиг. 5. LED източници от групи „W“ и „C“ в осветителя



Фиг. 6. Разположение на част от LED източниците от групи „W“ и „C“ върху платка в осветителя

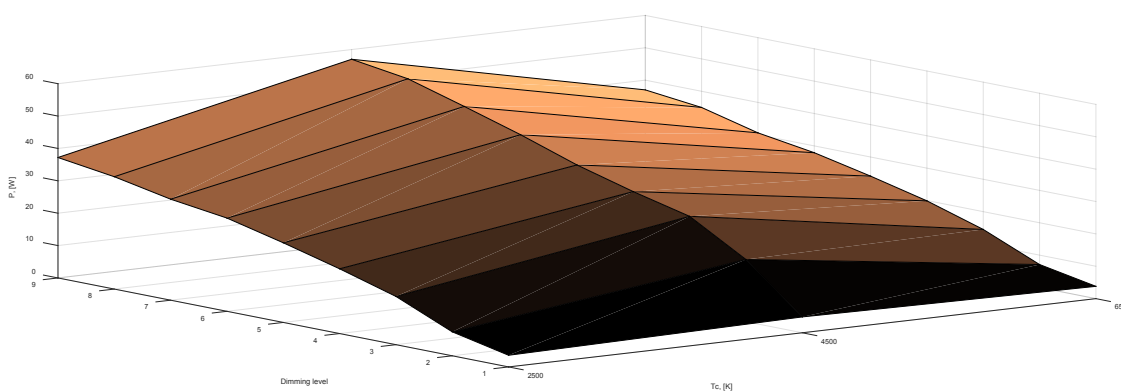
Регулирането на цветната температура на LED осветителя е в диапазона от 2700 K до 6500 K. То се осъществява посредством 200 броя LED източници, разпределени в две групи (Фиг. 5 и 6): едната група излъчва топло-бяла светлина ( $T_c = 2700$  K) и е обозначена като „W“ – Warm White, а другата група излъчва студено-бяла светлина

( $T_c = 6500$  K) и е обозначена като „C“ – Cool White.

Изменението на цветната температура в пълния диапазон – от 2700 K до 6500 K, се осъществява чрез индивидуално регулиране на интензивността на светлинния поток на двете групи LED източници. Плавното изменение на  $T_c$  е възможно единствено при по-високите нива на димиране (нива 7÷9), съответстващи на по-висок светлинен поток.

Установява се от резултатите в Табл. 2, че при зададена степен на регулиране на светлинния поток, електрическите параметри на LED осветителя се различават за

трите фиксирани цветни температури (2700 K, 4500 K и 6500 K). Максимални стойности на  $I$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $S$  и  $PF$  се отчитат при  $T_c = 4500$  K – неутрално бяла светлина. Това се обяснява с възможността отделните две групи LED източници да работят с различно ниво на димиране (различна мощност) в зависимост от желаната цветна температура в диапазона. На Фиг. 7 е показана графична визуализация на изменение на активната мощност  $P$  на LED осветителя от различните нива на димиране и различните (фиксирани три) задавани цветни температури.



**Фиг. 7.** Изменение на активната мощност  $P$  на LED осветителя от различните нива на димиране и различните  $T_c$



**а)** Измерване при  $T_c = 2700$  K



**б)** Измерване при  $T_c = 6500$  K

**Фиг. 8.** Постановка на измерване на цветови характеристики на LED плафон

В специализирано тъмно помещение в лаборатория „Осветителна техника“ при Технически университет - Габрово се извършва измерване и сравняване на цветовите характеристики на изследвания LED осветител - Фиг. 8. Измерванията се осъществяват с автоматизиран гониофотометър Rainbow Light с прикрепен към него спектрофотометър с датчик със CCD матрица [6]. Посредством измервателния уред, свър-

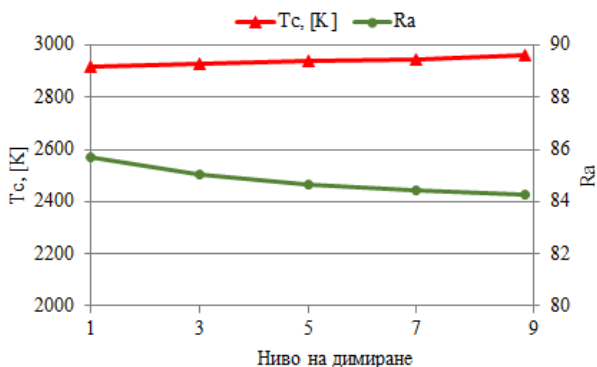
зан през USB порт към компютърна конфигурация със специализиран софтуерен продукт Candela Distribution, се извършва изчисляване на цветовите показатели: корелирана цветна температура  $T_c$ , общ индекс на цвето предаване  $R_a$  и доминантна (пикова) дължина на вълната  $\lambda_p$ . Резултатите от изменението на посочените цветови показатели за трите фиксирани режима на цветната температура (2700 K, 4500 K и 6500 K) при

различните нива на димиране на светлинния поток на LED осветителя са представени в Табл. 3.

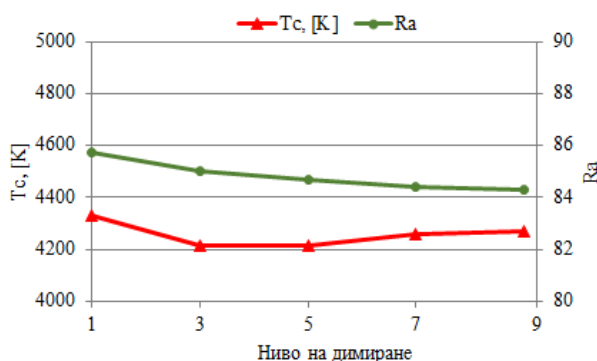
На Фиг. 9÷11 е показано в графичен вид изменението на цветната температура  $T_c$  и на общия индекс на цвето предаване  $R_a$  при регулиране на светлинния поток на изследвания LED осветител за трите фиксирани режима на цветната температура.

**Табл. 3.** Изменение на цветовите характеристики на изследвания LED плафон при различни нива на димиране

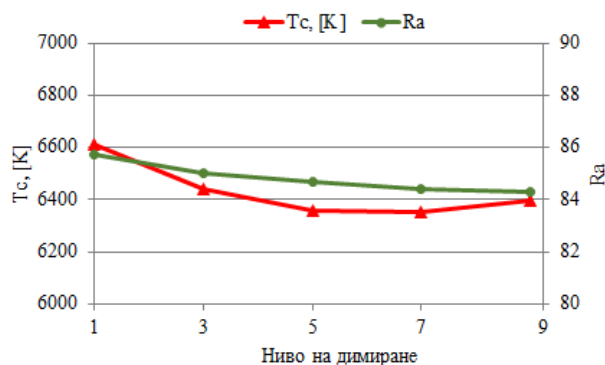
Цветови параметри		Ниво на димиране				
		1	3	5	7	9
Режим 2700К	$T_c$ , [K]	2920	2930	2940	2945	2960
	$R_a$	85.71	85.03	84.66	84.42	84.27
	$\lambda_p$ , [nm]	463.53	472.36	477.80	478.76	480.06
Режим 4500К	$T_c$ , [K]	4328	4213	4215	4260	4271
	$R_a$	89.50	87.78	87.33	87.27	87.21
	$\lambda_p$ , [nm]	481.64	482.62	482.61	482.52	482.40
Режим 6500К	$T_c$ , [K]	6611	6443	6360	6350	6398
	$R_a$	87.57	86.79	86.24	86.01	85.95
	$\lambda_p$ , [nm]	482.35	482.70	482.70	482.70	482.54



**Фиг. 9.** Изменение на  $T_c$  и  $R_a$  при димиране на LED осветителя със зададен режим 2700 K



**Фиг. 10.** Изменение на  $T_c$  и  $R_a$  при димиране на LED осветителя със зададен режим 4500 K



**Фиг. 11.** Изменение на  $T_c$  и  $R_a$  при димиране на LED осветителя със зададен режим 6500 K

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изследваното в настоящия доклад ново техническо решение за реализация на LED осветител с възможност за регулиране на цветната температура и светлинния поток чрез комбинирано управление на две групи светодиоди с  $T_c = 2700$  K и  $T_c = 6500$  K успешно осигурява бяла светлина с висок индекс на цвето предаване  $R_a = 84.3 \div 89.5$  с цветна температура, изменяща се в диапазона  $T_c = 2920 \div 6611$  K. При светене на LED осветителя с неутрално бяла светлина с  $T_c = 4500$  K, което се постига чрез еднакво ниво на димиране на двете групи светодиоди, се получава най-висок индекс на цвето предаване  $R_a = 87.2 \div 89.5$  – Табл. 3.

При нива на димиране от 9 към 1 (намаляване на светлинния поток) на LED осветителя - Фиг. 9, 10 и 11:

- индексът на цвето предаване  $R_a$  незначително се увеличава за всички разглеждани режими на работа с различна цветна температура – с  $1.5 \div 2.3$  единици;

- цветната температура за режим с  $T_c = 2700$  K намалява незначително, докато за режимите с  $T_c = 4500$  K и  $T_c = 6500$  K се увеличава – Табл. 3 и Фиг. 9÷11;

- активната електрическа мощност  $P$  намалява до 8.6% от максималната при режим  $T_c = 2700$  K и до 10.3% при режим  $T_c = 6500$  K – Табл. 2, което показва, че може да се намали консумацията на активна мощност с почти 90%, ако не е необходим целият светлинен поток на осветителя;

- увеличават се емисиите на висши хармоници на тока, което води до повишаване на общото хармонично изкривяване  $THDi$  и

намаляване на фактора на мощността  $PF$  – Табл. 2 и Фиг. 3.

Измерените нива на висшите хармоници на тока на LED осветителя надвишават граничните стойности, съгласно актуалния БДС EN 61000-3-2, за всички режими на работа – Табл. 2 и Фиг. 2.

Изследването на изменението на активната мощност  $P$  на LED осветителя за различните нива на димиране и режимите с различна цветна температура (Табл. 2 и Фиг. 7) показва, че  $P$  не е еднаква за режимите с различна  $T_c$  при едно и също ниво на димиране. Най-висока мощност има при режим с неутрално бяла светлина с  $T_c = 4500$  К – максимална стойност от 57 W, която е значително по-ниска от посочената в техническите данни на LED плафона – 100 W. За режимите на работа с  $T_c = 2700$  К и  $T_c = 6500$  К максималната мощност е по-ниска – 37 W. Тези разлики в мощността се дължат на заложените в драйвера пропорции на преразпределение на мощността между двете групи диоди с цел получаване на желаната цветна температура. Разликата в мощността при режимите на работа с различни  $T_c$  води и до различни светлинни потоци при едно и също ниво на димиране, което би могло да бъде нежелан ефект.

В заключение от направените измервания и анализи, се установява, че техническото решение за реализация на LED осветител с възможност за регулиране на цветната температура и светлинния поток чрез комбинирано управление на две групи светодиоди с  $T_c = 2700$  К и  $T_c = 6500$  К успешно постига много добри цветови характеристики – висок индекс на цвето предаване в широк диапазон на изменение на цветната температура.

По отношение на електрическите характеристики могат да се направят препоръки

за усъвършенстване режима на преразпределение на мощността от драйвера с цел постигане на еднаква мощност и светлинен поток за различните цветни температури, както и филтриране на висшите хармоници на тока.

Усложнената конструкция и специализиран драйвер на изследваното ново техническо решение за LED осветител водят и до сравнително висока за българския пазар цена от 219 лева с ДДС за осветител за вътрешно осветление с обявена мощност от 100 W.

Направените в настоящия доклад изводи и препоръки могат да послужат за усъвършенстване и оптимизиране на светлотехническата и електротехническата част на LED осветителите, използващи това техническо решение за регулиране на цветната температура и димиране на светлинния поток.

## REFERENCE

- [1] BDS EN 61000-3-2:2014 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase).
- [2] Handjieva-Florian, B., K. Velinov. Peculiarities at Color Measurement of LED Light Sources. VII Balkan conference on lighting “Balkan Light 2018”, Sofia, 04-06 June 2018, pp. 38-39. ISBN 978-954-353-347-3.
- [3] [www.en.wikipedia.org/wiki/Color\\_temperature](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Color_temperature)
- [4] Aleksandrov, N. Fundamental Colors Theory. Sofia, East-West, 2012, pp. 93-98. ISBN 978-954-619-152-110-4.
- [5] Tsankov, P., S. Platikanov. Handbook for Laboratory Exercises on Lighting and Installation Equipment. Vasil Aprilov, Gabrovo, 2013, pp. 47-57. ISBN 978-954-683-506-2.
- [6] Rainbow Light-Candela Distribution – User Guide.