



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ

Електротехнически факултет

**Катедра: „Електроснабдяване, електрообзавеждане и
електрически транспорт“**

маг. инж. Божидар Георгиев Гълъбов

**Управление на вътрешни осветителни уредби с отчитане на
биологичното и емоционалното въздействие на светлината
върху човека**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

**на дисертация за придобиване на образователна и научна степен
"ДОКТОР"**

Област: 5. „Технически науки“

**Професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника и
автоматика“**

Научна специалност: „Светлинна техника и източници на светлина“

**Научен ръководител:
проф. д-р инж. Захари Александров Иванов**

СОФИЯ, 2020 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от разширения катедрен съвет на катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електрически транспорт“ към Електротехнически факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 09.07.2020 г..

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 16.11.2020 г. от 13.00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет – София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5-2-86 / 20.07.2020 г. на Ректора на ТУ-София в състав:

1. Доц. д-р инж. Светлана Георгиева Цветкова – председател
2. Доц. д-р инж. Ива Чавдарова Петринска – научен секретар
3. Проф. д-р инж. Христо Николов Василев
4. Доц. д-р инж. Красимир Любенов Велинов
5. Доц. д-р инж. Пламен Ценков Цанков

Рецензенти:

1. Проф. д-р инж. Христо Николов Василев
2. Доц. д-р инж. Ива Чавдарова Петринска

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет на ТУ-София, блок № 12, кабинет № 12427.

Дисертантът е задочен докторант към катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електрически транспорт“ на Електротехнически факултет на ТУ-София. Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Божидар Гълъбов

Заглавие: Управление на вътрешни осветителни уредби с отчитане на биологичното и емоционалното въздействие на светлината върху човека

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

В резултат на утвърдените норми за осветление, повечето офиси и работни места в индустриализирания свят се радват на условия достатъчни за визуалните задачи и съобразени с условията за предотвратяване на зрителен дискомфорт. Коренно различно стои въпросът с изследването на невизуалното действие на светлината върху човешкия организъм. Изследванията и трудовете в тази област започват преди няколко десетилетия, вследствие на което учените все още не са единни в техните тези, публикации и препоръки, а нормирането на такъв тип осветление е още в начална фаза. Днес е известно, че светлината, и в частност нейната синя съставка, влияе силно на процесите в човешкия организъм. Учените наблюдават директно въздействие на светлината върху настроението и поведението, когнитивните качества на мозъка и съня, тонуса и чувството за будност спрямо нейния интензитет и продължителност на светлинната експозиция. Тъй като на пазара осветителите за така нареченото Human Centric Lighting са вече широко разпространени, възниква въпроса как и по какви критерии може да бъде осъществено управлението за такъв тип ОУ.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на докторската работа е да се създадат алгоритми за управление на вътрешни осветителни уредби с отчитане на биологичното(меланопично) и емоционалното въздействие на светлината върху човека. Управлението на осветителните уредби в помещения без прозорци или в помещения със спуснати щори е сравнително лесна задача, затова акцент в настоящата работа е управление на цветната температура на осветлението с отчитане на интензивността на дневната светлина. За да се постигне целта на дисертационната работа, като се приложат текущите научни тези и норми по темата, трябва да бъдат изпълнени следните задачи:

1. Да се систематизира биологично(меланопично) въздействие на светлината върху човешкия организъм и да се определят значимите фактори за постигане на поставената цел;
2. Да се създадат критерии за избор на осветител и модел за управление на осветителната уредба;
3. Да се създаде експериментален проект и опитна постановка по предложените критерии;
4. Да се създаде математичен модел и да се изследва експериментално спектралният състав на излъчването на избрания осветител. Да се създаде софтуер за обработка на данните;
5. Да се създадат модели за управление на динамични осветителни уредби с отчитане на невизуалните ефекти на светлината върху човешкия организъм;
6. Да се създадат математични модели на LED осветителя по каталожни данни;
7. Да се реализира управление на осветителна уредба по предложения модел, както за експерименталното помещение, така и за широк диапазон помещения;
8. Верификация на разработените алгоритми за управление на осветителната уредба с отчитане на биологичното(меланопично) и емоционалното въздействие на светлината върху човек

Научна новост

1. Систематизирани са всички известни фактори, които имат значение за силата на въздействие на светлината върху човешкия организъм чрез рецепторите в зрителния орган отговорни за циркадната система.
2. Създадени са критерии за избор на осветител и модел за управление на осветителната уредба.
3. Направен е анализ на резултатите от експериментите. Изведени са законите за изменение на светлинния поток и корелираната цветна температура при управление на осветителя. Създаден е пълен математически модел на осветителя от експерименталните данни

4. Предложен е модел за управление на осветителна уредба в административни сгради по препоръките на DIN SPEC 67 700;
5. Дадени са препоръки за преизчисляване на границите за корелираната цветна температура на работните графици в зависимост от реалните условия;
6. Предложен е алгоритъм за преизчисляване на границите за корелираната цветна температура на работните графици в зависимост от средната възраст на служителите;
7. Създадени са математически модели на спектралното излъчване на LED осветител по каталожни данни при линейна и нелинейна настройка на бялата светлина.
8. Създаден е алгоритъм за управление на цветната температура на осветителни уредби по критериите на Human Centric Lighting за индивидуални офиси;
9. Предложена е методика за привеждане на управлението на осветителни уредби в средни и големи помещения към тази за индивидуален офис.

Практическа приложимост

1. Създадена е експериментална постановка, която е така подбрана и реализирана, че да може точно и насочено да бъдат изследвани характеристиките на осветителя, системата за управление и алгоритмите за управление;
2. Предлагам критерии за стандартизиране на различните офиси в административните сгради, така че управлението на осветлението да се свежда до един алгоритъм. Създавам алгоритми за управление и на офиси с два и повече реда осветители.
3. В среда Dialux Evo са изследвани възможностите на предложения алгоритъм за управление.

Апробация

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на заседание на разширен катедрен съвет на катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електрически транспорт“, Електротехнически факултет при Технически университет – София, проведено на 09.07.2020г, протокол № 237

Етапи от дисертационния труд са докладвани и обсъждани на:

1. IV Научна конференция ЕФ ТУ София, 2012, Созопол, България
2. 10th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), 2019, Sozopol, Bulgaria
3. 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), 2019, Varna, Bulgaria.

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 7 статии: Интернационално достъпни доклади - 3 броя; Доклади от научни сесии и конференции в страната - 4 броя. ~ четири статии са самостоятелни, а останалите три са в съавторство.

Структура и обем на дисертационния труд

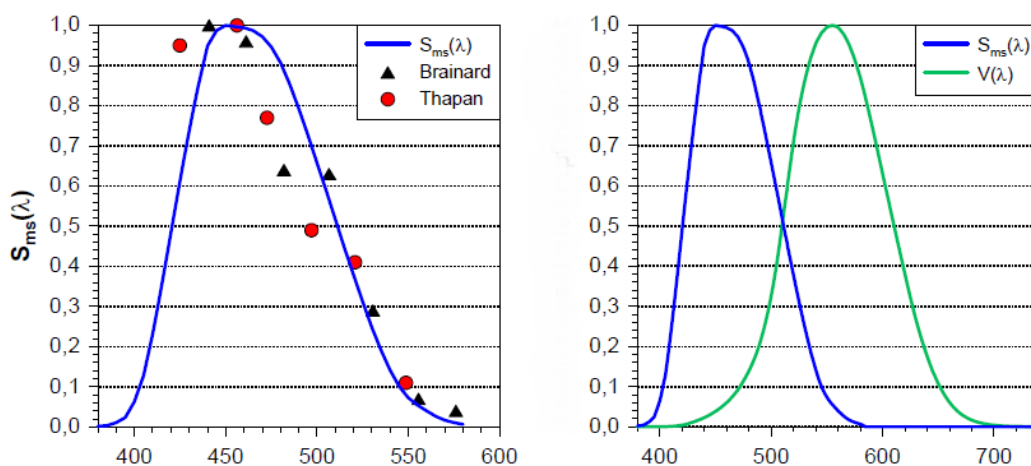
Дисертационният труд е в обем от **173** страници, като включва увод, **7** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **150** литературни източници, като **146** са на латиница и **3** на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо **136** фигури и **38** таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Биологично въздействие на светлината върху човешкия организъм

Обща информация

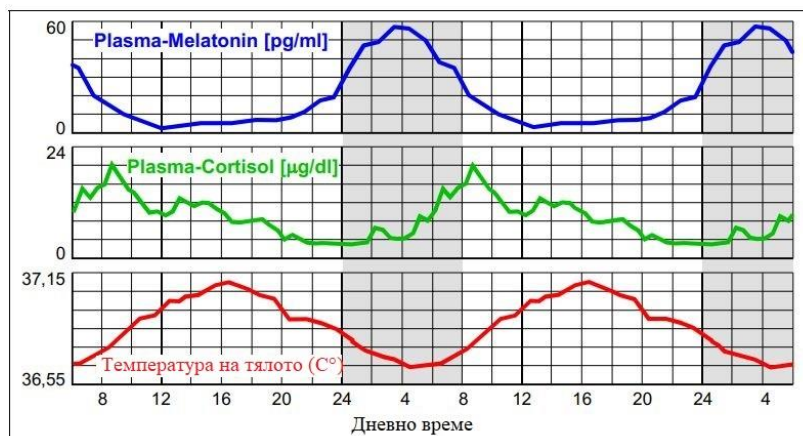
Откритието (2001г.) на рецептори в зрительния орган, които не служат за пряко визуално възприятие, а за „регулирането“ на циркадната система на човека е преломен момент в изследването на невизуалните ефекти на светлината върху човешкия организъм. Откритието на Lucas и Brainard е ключово звено в цялостния модел за разбиране на ефектите на светлината върху хората (визуални и невизуални). То свързва до този момент направени наблюдения и предоставя тяхното практическо доказателство. Учените установяват, че тези рецептори реагират на светлина с наситена синя съставка в областта на 470nm.



Фиг. 1. Спектрално изместване на чувствителността на системата за биологично регулиране ($S_{ms}(\lambda)$) спрямо чувствителността на системата за зрительно възприятие $V(\lambda)$

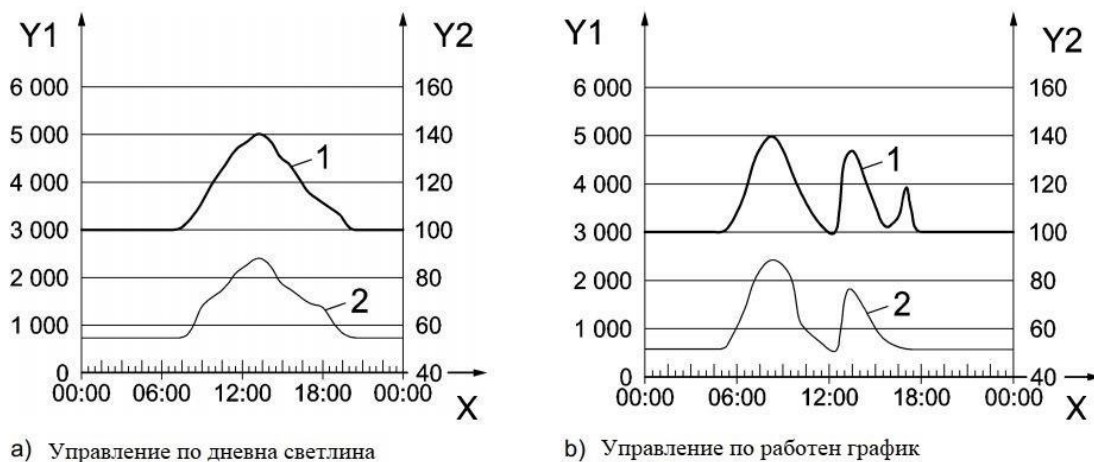
Функциите на човешкия организъм силно зависят от циркадните ритми, които имат 24 часов период и се контролират от специално звено в мозъка наречено Nucleus Suprachiasmaticus (SCN). SCN е нервен център, който служи на човешкия организъм като „вътрешен часовник“ и определя 24-часовия ритъм на организма. Това става чрез регулиране на нивото на два определящи състоянието на организма хормона – кортизол и мелатонин. Нивото на тези два хормона не само определя температурата на тялото, но и активните и пасивни фази на организма през деня и нощта. Съответно светлината с активираща съставка на спектралния състав има значение както за настроението и безопасността при работа в затворени помещения, така и върху производителността. Логично възниква въпросът как може да бъде проектирана такава осветителна уредба, която максимално да използва гореописаните ефекти от светлината и каква е нормативната база по темата. Още в края на деветдесетте години, CIE започва критично да се занимава с въпроса какво е качествено осветление и дали нормите трябва да бъдат променени в посока по-висока ергономичност и индивидуалност спрямо наблюдателя. Публикацията CIE 158 подробно разглежда резултатите от научните проучвания, особено в областта на невизуалните светлинни ефекти върху човека. Нормата DIN SPEC 5031-100 на немския институт за нормиране има за цел да определи и въведе методи и подходи за спектралната оценка на оптичното лъчение с невизуален ефект. Като невизуални ефекти нормата цитира следните въздействия на светлината върху човешкия организъм: *Потискане отделянето на мелатонин, ефекти върху терморегулацията на*

организма, ефекти върху бдителността, промяна на фазите на циркадната система, промяна на мозъчната активност.



Фиг. 2. Преработен модел на циркадния ритъм на нивото на кортизол и мелатонин (ТУ Илменау) [57], според оригиналния модел на Hofstra [58]

Нормата DIN SPEC 67 700 надгражда върху резултатите и вече разгледаните проблеми в нормата DIN SPEC 5031-100. Тя е създадена за да бъде запълнена липсата на конкретни препоръки за проектиране на осветителни уредби с отчитане на „биологичното“ въздействие на светлината върху човека. Целта е всяка осветителна уредба да бъде така проектирана, че максимално да подпомага циркадната система и следователно да влияе благоприятно върху производителността и концентрацията на работниците, като същевременно подобрява регенерацията във фазите на почивка.



Фиг. 3. Пример за биодинамично управление на осветлението в зависимост от дневния часови график според DIN SPEC 67 700 **Легенда:** X-дневно време, Y1-най-близка цветна температура в K, Y2-осветеност в %, 1-крива на най-близка цветна температура, 2-крива на осветеност в %

Важно е да отбележим, че и двете разгледани норми все още не са въведени като задължителни в строителните изисквания на европейския съюз и имат препоръчителен характер. Някои учени в свои публикации са на мнение, че досегашната база на изследване на Human Centric Lighting и резултатите от научните трудове, все още не са достатъчни за международно въвеждане на нормите и широкото практическо приложение на технологията, а неправилното проектиране и употреба на такъв тип уредби може да има дори и негативен ефект.

Изводи

След разглеждане на възможното невизуално действие на светлината върху човешки организъм, са приети шест основни тези стоящи в основата за по-нататъшното изграждане на ОУ тип Human Centric Lighting:

1. Дневната доза естествена светлина при модерен, западен начин на работа в офис и административни сгради е прекалено ниска и не отговаря на оптималните нива, нужни на човека.
2. Здравословната светлина е най-ефективна и задължително свързана със здравословна тъмнина (период на сън и почивка).
3. Изкуственото осветление с биологично действие има положителен ефект върху настроението и психиката на работниците.
4. Изкуственото осветление с биологично действие може да подобри продължителността и качеството на съня и в резултат на това да повиши концентрацията на работниците през деня.
5. Изкуственото осветление с биологично действие подпомага и синхронизира циркадния биологичен ритъм на работниците, което допринася за здравето и доброто настроение на работното място.
6. Изкуственото осветление с биологично действие подпомага активирането на организма и повишава когнитивните функции на мозъка за решаване на ежедневните работни задачи, в резултат на което такова осветление цялостно повишава работоспособността. Такъв тип осветление значително намалява умственото усилие и увеличава ефективността при решаване на умствени задачи.

ГЛАВА 2. Определяне на критериите за избор на осветител и модел за управление на осветителната уредба

Съществуват множество фактори, които могат силно или слабо да влияят на силата на невизуалното въздействие на светлината. Долупосочената графика (Фиг. 4) обобщава тези фактори. Основно могат да бъдат назовани три основни групи фактори за влияние на светлината върху човешкия организъм: *светлинни фактори*, *фактори зависещи от околната среда* и *индивидуални фактори* (такива зависещи от самия наблюдател). Пълното въздействие на светлината върху невизуалните рецептори може да се опише от взаимодействието и сумата на всички долупосочени фактори взети заедно. Очевидно е, че при създаването на модел за управление на осветителната уредба не всички фактори могат да бъдат взети под внимание, и че не може да се създаде конкретен алгоритъм, който да отчита едновременно всички фактори взети заедно (основно заради факта, че събирането на входни данни за всеки един отделен фактор би превърнало задачата в непосилна, а настройката на осветителната уредба трябва да протича за всеки наблюдател поотделно). Ето защо под внимание за моят модел за управление ще бъдат взети само тези фактори, които според учените имат най-силно влияние

Светлинни фактори определящи влиянието върху циркадната система

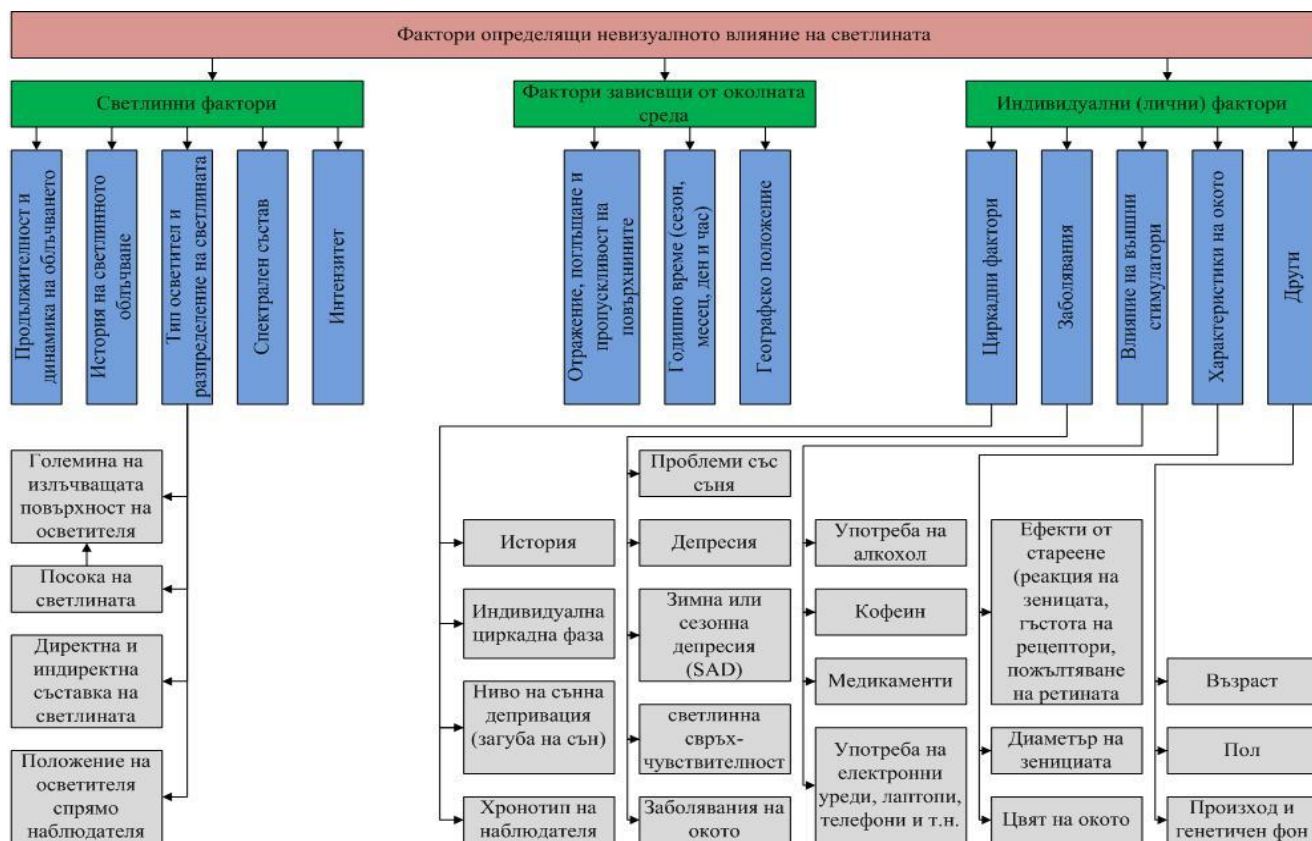
Грубо могат да бъдат определени пет основни светлинни фактора за влиянието на светлината върху човешкия организъм: *спектрален състав на светлината*, *интензитет на светлината* (измерен приблизително върху зрителния орган), *фаза на деня*, *продължителност на облъчването* и *история на светлинното облъчване*.

Фактори зависещи от околната среда

Количеството дневна светлина, което попада върху работната повърхност или достига до работните помещения е от изключителна важност за създаването на алгоритмите на управление на Human Centric Lighting осветителна уредба. Според положението на работните места в

помещенията трябва да се различават и създадат минимум два различни алгоритъма за управление – един за работни места в директна близост до прозорците на офиса и един за „вътрешни“ работни места. Количеството дневна светлина в помещенията намалява значително с отдалечаване от прозорците. Нормата DIN 5034 (в Германия) и нейните еквиваленти на европейско

ниво, поставят конкретни изисквания за дневна светлина на работното място: $D = \frac{E_p}{E_a} \cdot 100\%$, където D – константа за всяка точка от помещението (Daylight Factor), E_p – осветеност от дневната светлина в случайна точка на измерване в помещението, E_a - средна хоризонтална осветеност на открито (при облачно време). Коефициентът D за офис сгради и средна отдалеченост от прозорците според нормите трябва да е минимум 0,9%, а в най-неизгодните точки на помещението 0,75%

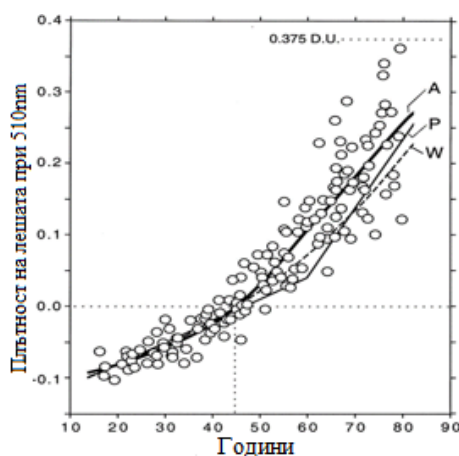


Фиг. 4. Фактори определящи степента на влияние на светлината върху циркадната система на човека (адаптация на графиката на Krüger 2017)

Индивидуални фактори – възраст и пол на наблюдателя

Връзката между възрастта на наблюдателя и неговото светлинно възприятие може да бъде описана от две основни групи взаимодействия – директно влияние върху основното зрително възприятие, дължащо се на промяната на основните зрителни характеристики (зрително поле, прагова яркостна разлика, вероятност на различаване, прагов контраст, яркостен контраст, разделителна способност и др. и второстепенно (биологично) влияние върху наблюдателя, отразяващо се в промяна на настроението, тонуса и невизуалните функции на зрителния орган и мозъка. Първата група зависимости и нейните следствия са обект на дългогодишни научни изследвания, които започват още в началото на втората половина на миналия век и поставят основите на модерното нормиране на нивата на осветеност. Втората група следствия от стареенето на зрителния орган – биологични или невизуални (Non-Image-Forming - NIF), започват да бъдат изследвани интензивно през 90-те години на миналия век. Работата в тази насока продължава и до днес, като този аспект получава все по-голямо значение и започва бавно да навлиза в нормирането и препоръките за проектиране на осветителни уредби. От особено значение е отслабването на чувствителността на зрителния орган към късовълновия участък на синята светлина (около 470nm) с напредване възрастта на наблюдателя. Отслабването на способността за възприятие на лъчение

с дължина на вълната около 470nm се обяснява също така и със стареенето на нервните пътища, водещи към мозъка и предаващи сигналите от зрителния орган към централните отговорни за отделянето на хормони. Методите за анализиране на промените на незрителното възприятие могат също да бъдат разделени на две групи – аналитично-статистически (изследвания на различни възрастови групи от доброволци и анализиране на попълнени от тях анкети преди и след експеримента) и обективно-експериментални (конкретни наблюдения на телесни и мозъчни показатели по време на експеримента, които биват изследвани обективно по медицински път). Поради факта, че изследванията на невизуалните ефекти на светлината могат да бъдат субективни, тези ефекти все по-често допълнително се анализират и чрез конкретни и обективни медицински изследвания. Намалването на чувствителността към синята съставка на светлината с напредване на възрастта също може да бъде обяснено с увеличаването на нивата на липофусцин в зрителния орган вследствие неговото стареене. Натрупването на липофусцин, графично показано на Фиг. 5, води до „пожълтяване“ външните слоеве на ретината и отслабване на приемствеността на лъчение с невизуални ефекти (синя част от спектъра). Тази редукция може да достигне с нарастване на възрастта до 43,5%.



Фиг. 5. Повишение концентрацията на липофусцин в зрителния орган с напредване на възрастта

Наличие на нискочестотни трептения

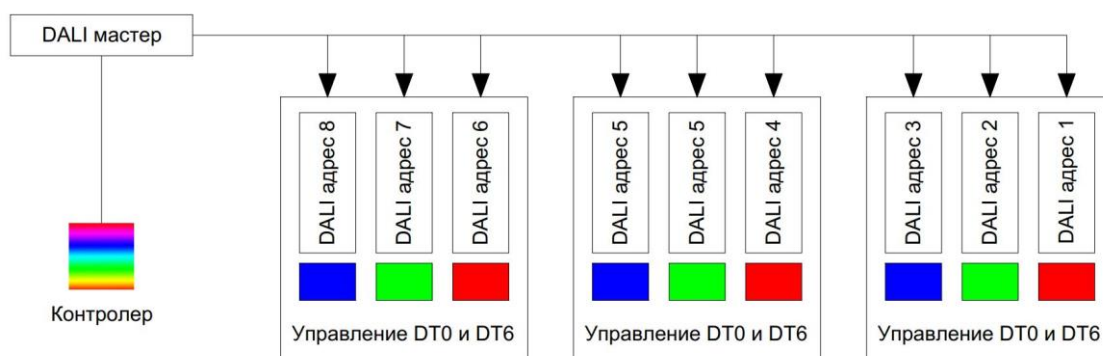
Наличието на пулсации на светлинния поток около 100 Hz може да влоши значително видимостта в помещенията, да се отрази негативно на работоспособността и да увеличи риска от злополуки на работното място (стробоскопичен ефект). При използването на некачествени електронни пускови апаратури подобни ефекти могат да бъдат наблюдавани и при LED осветителите. При изграждане на опитната постановка, електронният баласт трябва да бъде така подбран, че пулсациите на светлинния поток и възможните следствени негативни ефекти да бъдат изключени.

Централно и локално управление на осветителната уредба

През 2001 Leaman и Bordass забелязват значителни предпочитания към персонализиране на управлението на осветлението. Изследванията на използваните управления върху наблюдатели в административни сгради се задълбочава от Boyse (2006), който еднозначно показва, че възможността за личен контрол на осветлението на работното място силно влияе на чувството за комфорт и се оценява като значително подобрение на осветителната уредба от участниците в експеримента. Boyse (2006) прави експерименти състоящи се в решаването на различни типове умствени задачи при различни типове контрол на осветление – цялостен контрол на отворени офисни помещения без зачитане на отделните работни места и личен контрол на осветлението на работното място. Резултатите показват, че личният контрол на осветление на конкретно работно място води до по-голяма издръжливост на натоварване и по-бавно настъпване на умствена умора.

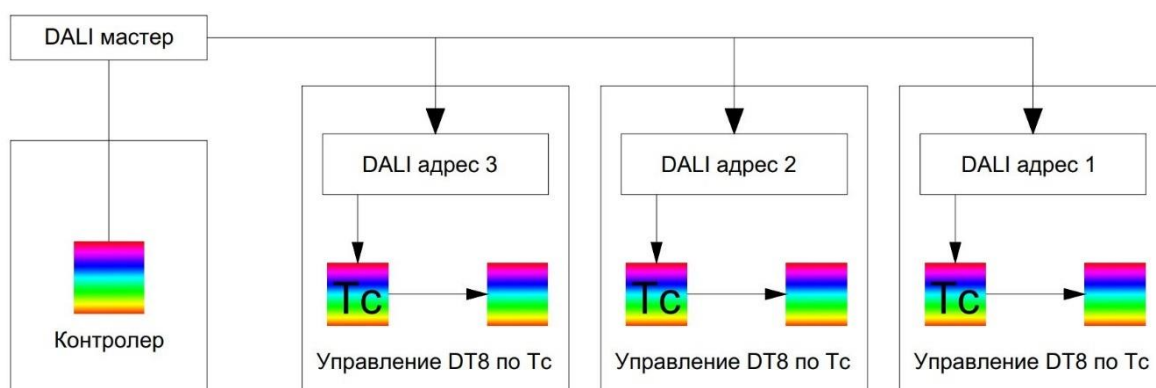
Технически обзор и избор на възможна техническа реализация

Реализацията на прецизно многостъпално димиране на светлинния поток спрямо външни променливи и точната промяна на цветната температура спрямо зададени алгоритми или външни променливи може да бъде реализирано единствено по цифров път (аналогови управления от типа 1-10V не могат да изпълнят нужните функции и няма да бъдат разглеждани). Производителите на осветителни тела и електронни управления предлагат за тази цел различни цифрови решения и протоколи за комуникация. Най-разпространеното цифрово решение за управление на осветителни тела е системата DALI (Digital Addressable Lighting Interface). DALI протокола е разработен специално за управление на осветителни тела от водещите производители и се регулира от отворената норма IEC 62386. Този тип цифрово управление позволява единично адресиране на осветителните тела и позволява необходимата гъвкавост за реализиране на експерименталната осветителна уредба. Най-простият и доскоро практикуван начин за управление на цветната температура е чрез ЕПРА от типа DALI DT0 (луминесцентни лампи) и DALI DT6 (LED лампи) по стандарта IEC 62386 (виж. Фиг. 6).



Фиг. 6. Управление на цветната температура на осветител чрез протокол DALI DT0 и DT6

Този тип управление има сериозни недостатъци. Един от основните недостатъци е, че системата не може да задава определена цветна температура. При осветители с променлива цветна температура според стандарта DT8 по IEC 62386 всеки осветител има само един адрес, но два до шест отделни канала за цвят. Системата позволява абсолютно или относително управление на цветната температура. Тъй като осветителите получават само един адрес, то информацията от DT8 Master Device се подава последователно по DALI протокола към DT8 приемника (ЕПРА), който обработва самостоятелно информацията и подава нужните команди към всеки отделен цветен канал.



Фиг. 7. Управление на цветната температура на осветител чрез протокол DALI DT8 по системата Tc.

Обобщение и избор на осветител

Вземайки предвид всички горепосочени влияещи променливи можем да обобщим, че създаването на осветителна уредба с максимално невизуално действие върху човека би изисквала не само съобразяването на горепосочените фактори, но и интензивно изследване и измерване на светлотехнически данни при точно определена среда и за определен тип работа. Такъв един подход за практическа реализация не само би довел до влагането на огромни ресурси и значително оскъпяване на уредбата, но прави универсалното проектиране на такъв тип уредби почти невъзможно. Ето защо по мнение на автора при създаването на модела за проектиране не може и не бива да се търси едновременния оптимум на всички фактори взети заедно, а по-скоро на тези от тях с най-голямо значение и възможност за практическа реализация. В Таблица 1 са показани различните фактори и дали те ще бъдат взети предвид за по-нататъшните изследвания и модела за управление на осветителната уредба. Таблица 1.

Таблица 1 – Фактори участващи в модела за управление на ОУ

Фактор	Участва в модела за управление	Забележки
Продължителност и динамика на облъчването	Да	Управление по развитите модели за управление (виж т. 4)
История на светлинното облъчване	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Големина на излъчващата повърхност на осветителя	Да	Избор на осветител с максимално голям светеща повърхност или силно индиректно излъчване
Посока на излъчване на осветителя	Да	Избор на осветител със силно индиректно излъчване. Приема се че наблюдателят не мени местоположението си в по-голямата част от времето на облъчване (работа на компютър в административни сгради)
Положение на светлинния източник спрямо наблюдателя	Да	Избор на осветител със силно индиректно излъчване или монтаж, така че светлинния източник да е в полето между 45° - 90° (т.2.1.4)
Фактори на отражение на повърхностите	Да	Използване на стандартни фактори на отражение без отчитане на индивидуална декорация на офиса. За изчисленията са дефинирани три основни групи на обобщение коефициенти на отражение – силно отразяващи повърхности ($\rho > 0,75$), средно отразяващи повърхности ($0,35 < \rho < 0,75$), и слабо отразяващи повърхности ($\rho < 0,35$).
Годишно време, сезон, месец, час	Да	Измервания при различни метеорологични условия, часове и сезони.
Географско положение	Да	Моделът е създаден за съответното тествано географско положение. Корекция за другите три географски положения е възможна.
Индивидуална циркадна фаза на наблюдателя	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Сънна депривация (загуба на съня)	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Здравни и психични заболявания на наблюдателя	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Светлинна свръхчувствителност на наблюдателя	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Проблеми със зрителния анализатор на наблюдателя	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Употреба на алкохол	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Употреба на кофеин	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на

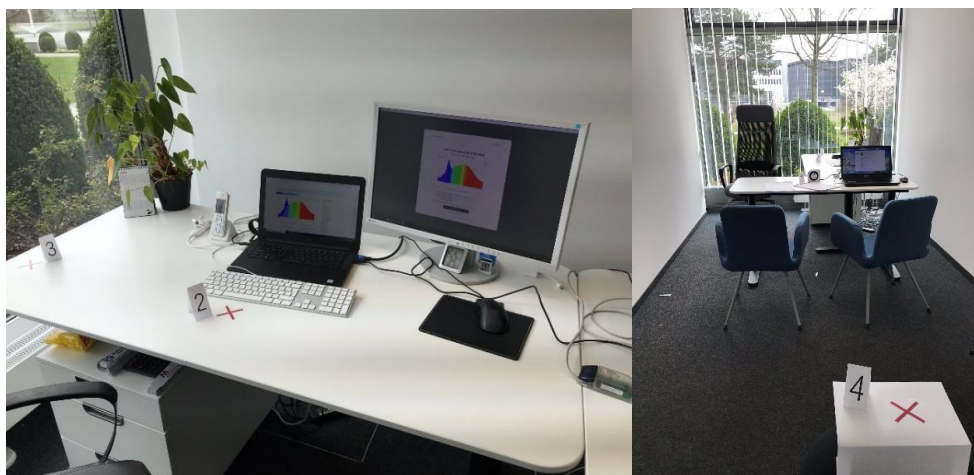
		универсалност на модела
Употреба на други медикаменти	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Непосредствено облъчване от други електронни уреди (монитори и др.)	Да	Провеждане на корекционни измервания с включен монитор.
Индивидуални характеристики на зрителния анализатор	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела
Възраст на наблюдателя	Да	Виж точка 4.1.3
Пол на наблюдателя	Не	Недостатъчна научна база за диференциране на влиянието на светлината спрямо пола.
Произход и генетичен фон на наблюдателя	Не	Практически трудно осъществимо и загуба на универсалност на модела

Вземайки предвид горепосочените критерии за изследванията и експеримента избирам осветител Siteco Scriptus® Тип MZ313D0TWB, Tunable White, с директно и индиректно излъчване.

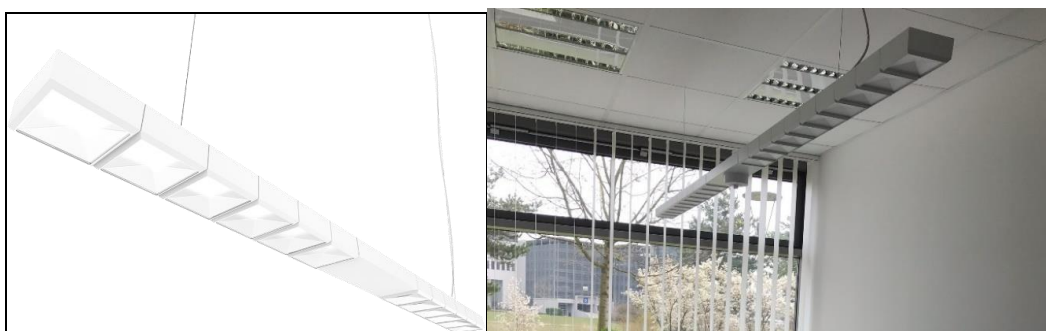
ГЛАВА 3. Полеви експеримент, изследване на избрания осветител и сравнение на данните

Опитна постановка

Експерименталната инсталация е реализирана в административна сграда, намираща се в град Мюнхен, Република Германия (Фиг. 8). Стъклените площи на офиса са с източно изложение и стигат до пода (тип френски). Размерите на помещението са 5,34м на 2,49м (Фиг. 9). Измерванията протичат в четири различни точки, които са избрани така, че да могат да бъдат отчетени фотометричните промени както върху работната повърхност и в дълбочина на офиса, където влиянието на естествената светлина е по-слабо. Избраният осветител Siteco Scriptus (виж Фиг. 10) има дължина 2646мм и широчина 114мм. Корпусът е изработен от алуминий (със защитно заземление SK I), като степента на защита е IP 20. Осветителят е базиран изцяло на LED технологията, като пусковото устройство (по едно устройство за директната и индиректната съставка – общо 2бр.) е от поколението DALI T8, позволявайки многостепенно плавно димиране и промяна както на светлинния поток, така и на цветната температура.



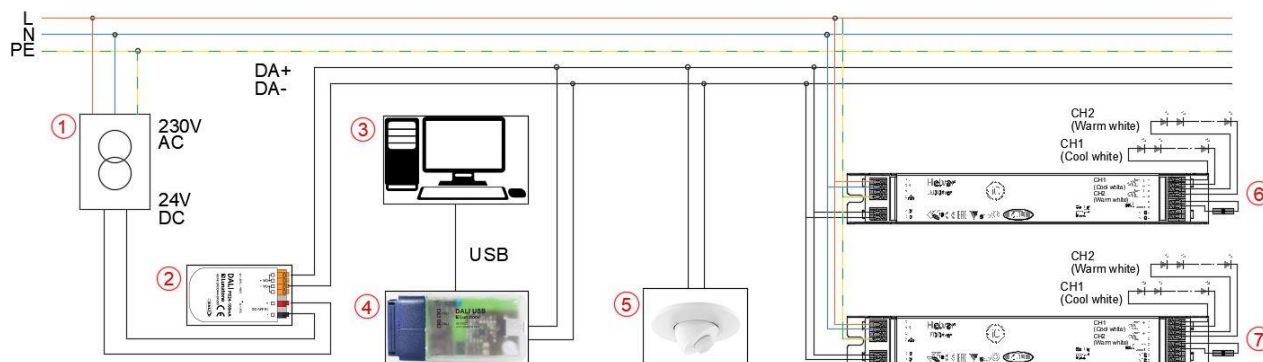
Фиг. 8. Опитна постановка в офис (административна сграда) с отбелязани точки за измерване



На Фиг. 11 е показана схемата на свързване на експерименталната осветителна уредба.

Уред за измерване

Контролните измервания са извършени с лесно преносимия и практичен мобилен спектрометър на фирмата X-rite от тип Studio (виж Фиг. 12). За сравнение точността на измерване са направени контролни (сравнителни) измервания и сравнени с резултатите от измерванията чрез нает професионален уред (спектрофотометър) тип Spectral на фирмата Jeti GmbH. Разликите в измерванията са в диапазона $\pm 3\%$, което удовлетворява изискванията за точност



Фиг. 11. Схема на свързване на експерименталната осветителна уредба



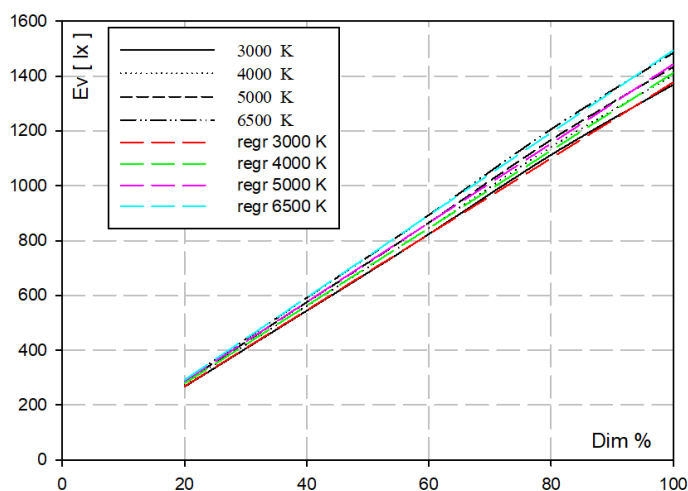
Фиг. 12. Спектрофотометър i1Studio на фирма X-rite за измерване на цветната температура на осветлението.

Софтуер за отчитане, визуализиране и обработка на резултатите

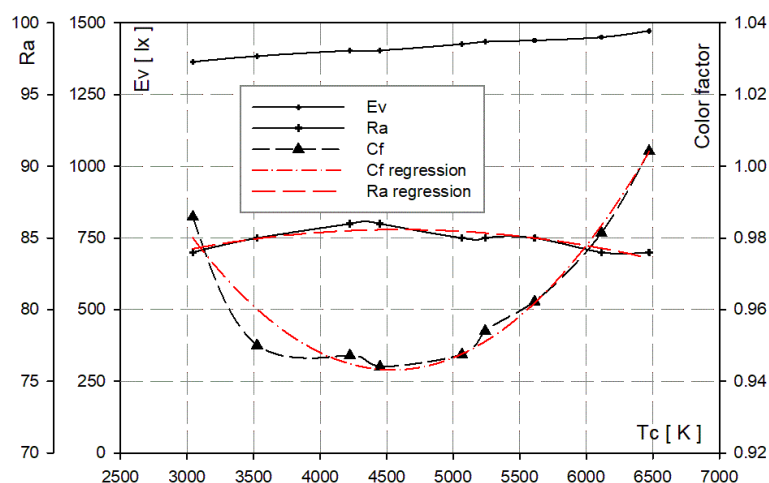
В рамките на полевия експеримент са използвани три типа софтуер – софтуер за събиране на данните (fluxometer), софтуер за точно управление на HCL осветителя (DALI Cockpit) и софтуер за обработка на получените данните (Osram ColorCalculator).

Резултати от измерванията

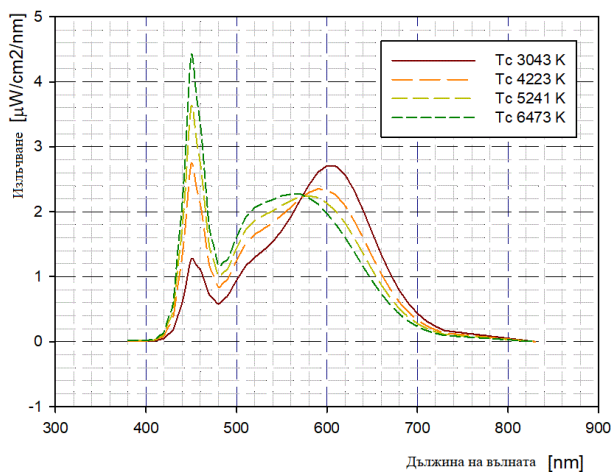
Както самите измервания така и резултатите от тях са направени и представени първо за директната съставляваща на осветителя, второ за индиректната и трето за смесеното осветление от директна и индиректна съставляваща. На следващите фигури са представени резултатите от смесеното осветление. Измерванията са проведени в абсолютно отсъствие на естествена светлина (Еест. $\approx 0\text{lx}$). Съотношението на двете съставляващи е подбрано според препоръките в литературата (в съотношение директна/индиректна от 40/60).



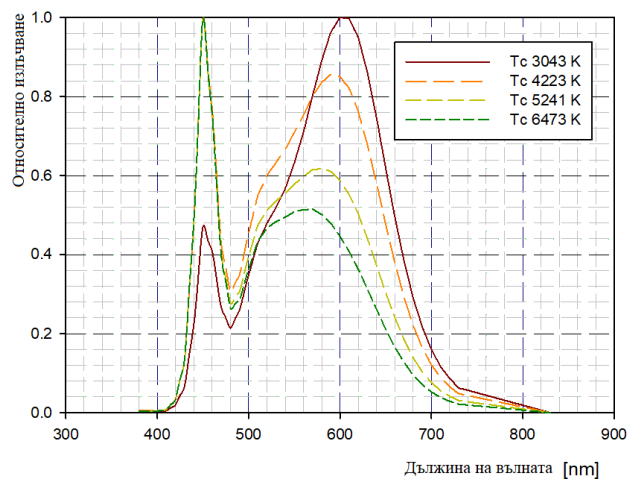
Фиг. 59 - Измерени стойности в т.1 на осветеността при димиране (смесено осветление)



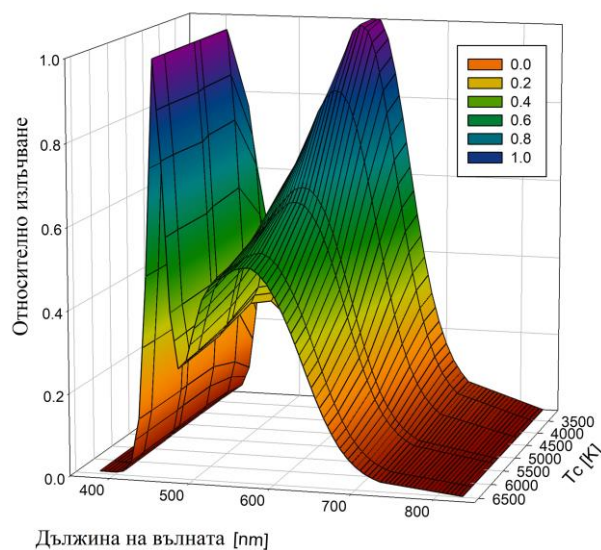
Фиг. 62 - Изменение на осветеността, коефициента на цветопрдаване и грешката между зададената и получената цветна температура, спрямо измерената цветна температура (100% димиране, смесено осветление)



Фиг. 63 - Спектрална плътност на излъчването за някои цветни температури (100% димиране, смесено осветление)



Фиг. 65 - Относителна спектрална плътност на излъчването (100% димиране, при индиректно осветление)

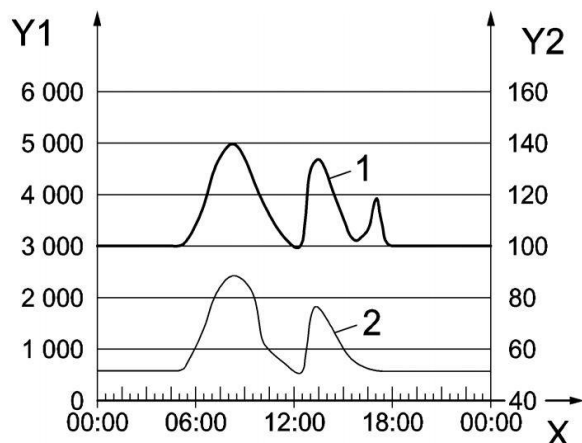


Фиг. 66 - Относителна спектрална плътност на излъчването (100% димиране, при смесено осветление)

ГЛАВА 4. Модели за управление на динамични осветителни уредби с отчитане на невизуалните ефекти на светлината върху човешкия организъм. Модели на LED осветители.

Модел на управление по работен график в административни сгради

Използваният изходен (базов) график за управление на осветителна уредба Human Centric Lighting е предложеният от нормата DIN SPEC 67 700 график за управление на ОУ от такъв тип в административни сгради.



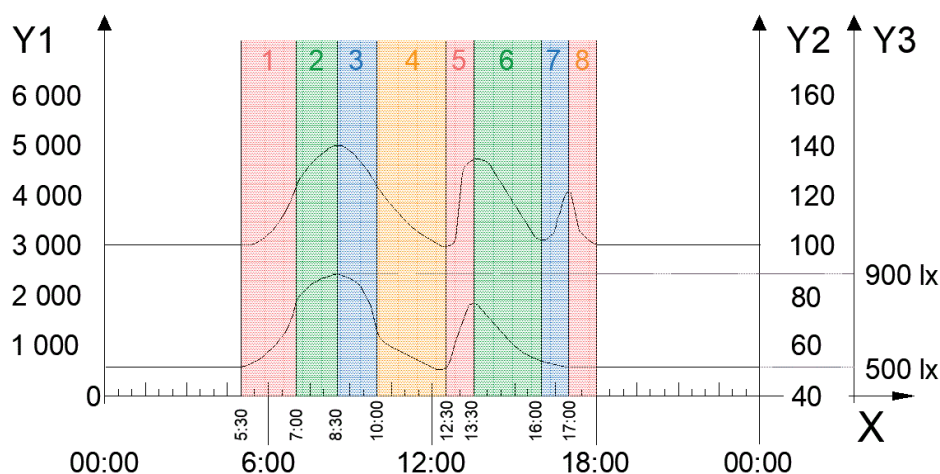
Фиг. 70 - Управление на биодинамично осветление (HCL) по работен график според нормата DIN SPEC 67 700. (X – дневно време, Y1 – най-близка Тцв в К, Y2 – относителна осветеност в %, 1 – крива на Тцв, 2 – крива на относителната осветеност.)

Преизчисляване на границите за корелираната цветна температура на работните графици в зависимост от реалните условия

След измерванията в реални условия можем да обобщим следните резултати:

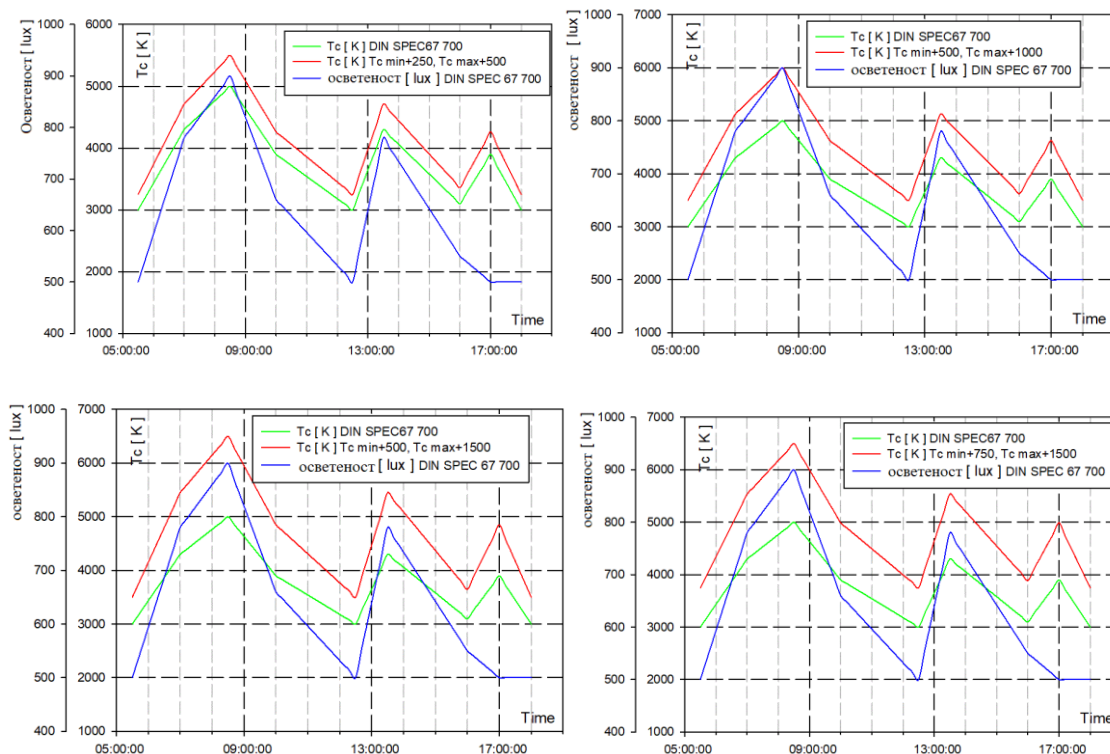
1. Зададените 3000K от графиката на фиг. 70 между часовете 5:00 и 6:00 и след 17:00 часа могат да бъдат постигнати само в студените месеци, когато в рамките на тези часове съставката от естествената светлина изцяло отсъства.
2. В летните месеци зададената графика и ниските цветни температури са непостижими, тъй като съставката на естествена светлина с много висока цветна температура е голяма и не може да бъде компенсирана от HCL осветителя (повечето достъпни HCL осветители имат долна граница на цветната температура от 3000 K).
3. Препоръчаната графика е с недостатъчна точност и без преработка не може да послужи за програмирането на HCL управление.
4. Графиката не отразява напълно текстовите препоръки на нормата DIN SPEC 67 700, които задават граници между 3500 K и 12 000 K.

Поради горепосочените причини предлагам коригирана графика за HCL управление, която отчита реалните условия, както за зимните, така и за летните месеци и по-добре обединява различните препоръки на нормата DIN SPEC 67 700. Графиката бива разделена на интервали от по 10мин, в които цветната температура расте или спада. Тъй като осветеността следва изцяло цветната температура, то ще разглеждаме само една величина – Тцв. На фиг. 72 графиката е разделена от отделни интервали, за които се търси приблизително линеен закон – увеличаване или спадане на цветната температура.



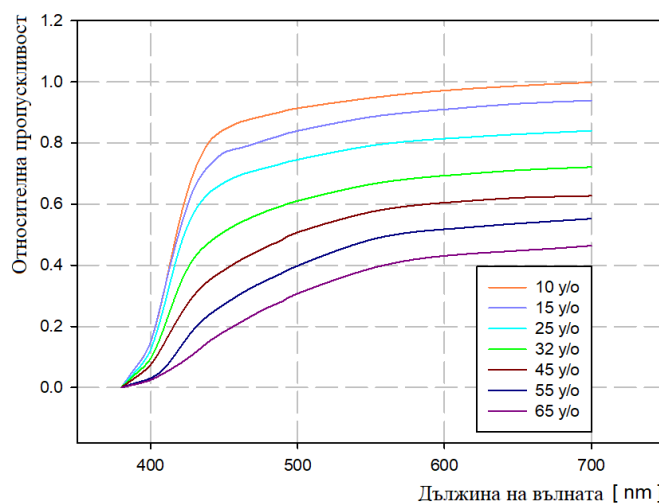
Фиг.72 - Интервали на относително линейна промяна на целевата цветната температура в офис помещения

За да могат да бъдат изпълнени условията за най-ниски долни граници на цветната температура и през летните месеци, то графиката трябва да бъде „повдигната“, така че долната граница да е в изпълним диапазон. Разгледани са четири варианта за трансформиране на кривата според долната и горната граница на цветните температури – а) – долна граница +250 K, горна граница +500K, б) долна граница +500K, горна граница +1000K, в) долна граница +500K, горна граница +1500K, г) долна граница +750K, горна граница +1500K (виж фиг. 73). Като оптимален вариант от гледна точка осветител и постижимост избирам вариант “б”.



Фиг. 73 - Графици за управление на цветната температура с коригирани граници: а) – долна граница +250 K, горна граница +500K, б) долна граница +500K, горна граница +1000K, с) долна граница +500K, горна граница +1500K, д) долна граница +750K, горна граница +1500K

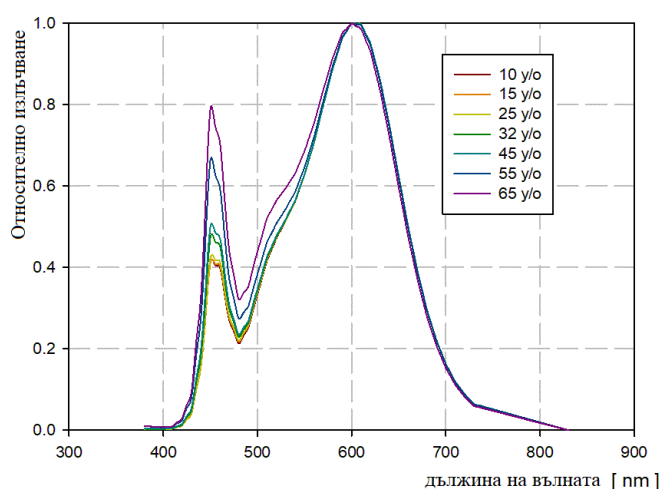
Преизчисляване на границите за корелираната цветна температура на работните графици в зависимост от средната възраст на служителите



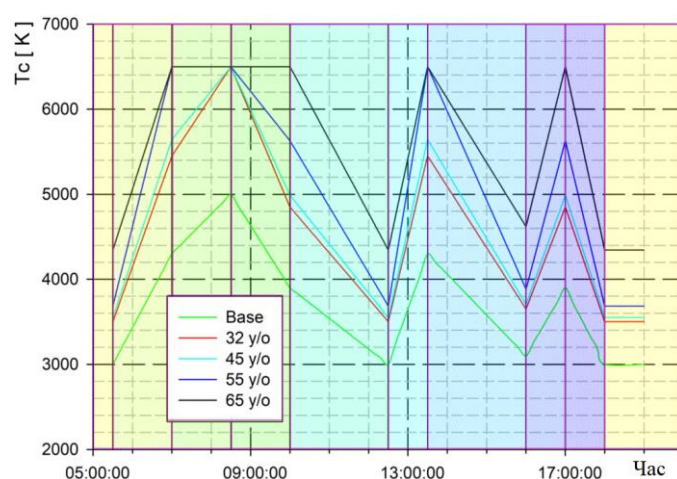
Фиг. 75 - Относителни възрастови загуби на осветеност на ретината

С нарастването на средната възраст на работещите е необходимо при проектирането и експлоатацията на осветителните уредби да се има предвид влошаването на цветовото възприятие с увеличаване на възрастта. С напредването на възрастта дебелината на очните лещи се увеличава, като същевременно пожълтяват, което води до намаляване на светлината, попадаща върху ретината, особено в синия спектър. За компенсиране на този ефект предлагам следния алгоритъм за преизчисляване на границите на цветната температура, предложени в предишната точка. Основа на алгоритъма са редица офталмологични изследвания, както класическите така и съвременните. Алгоритъма за изчисление съдържа следните етапи:

1. Преформатиране на данните от фиг. 75, литература в относителни единици спрямо стандартен наблюдател:
2. Преизчисляване на цветната температура
3. Създаване на графика отчитаща промените при възприятие на светлината в ретината при наблюдател различния от стандартния наблюдател (32г.).



Фиг. 81 - Относителни спектрални плътности на излъчването за различни по възраст наблюдатели за 3500 К базова цветна температура



Фиг. 83 - График за изменение на цветната температура T_c според възрастовите групи.

Математичен модел на спектралното разпределение на LED осветител

В настоящата работа се предлагат математични модели за описание на спектралното излъчване на произволни LED осветители тип *tunable white*. Тези осветители съдържат поне два типа светодиоди – излъчващи в топлия и студения диапазон на бялата светлина. Чрез регулиране на излъчването на двата типа светодиоди се получава резултантно излъчване с корелирана цветна температура между минималната топла и максималната студена корелирана цветна температура на съставните светодиоди. Предложеният математически модел е итеративен, който има следната структура:

1. Данни за спектралната плътност на мощността на светлинния източник.
2. Модел на спектралната плътност на излъчването и избор на началните стойности на параметрите.
3. Алгоритъм за изчисляване на спектъра на моделирания осветител в целия диапазон на регулиране и критерии за оценка на грешката.
4. Дефиниране на посоката и стъпката на изменение на контролируемите параметри при грешка по-голяма от допустимата.

Избран е модел на спектралната плътност на излъчването на осветител базиран на Гаусови разпределения. Математическото описание на модела за конкретна корелирана цветна температура е сума от четири функции на Гаус (Формула 1).

$$\text{Формула 1 - } S(\lambda) = k_1 e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_1}{\sigma_1}\right)^2} + k_2 e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_2}{\sigma_2}\right)^2} + k_3 e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_3}{\sigma_3}\right)^2} + k_4 e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_4}{\sigma_4}\right)^2}$$

където:

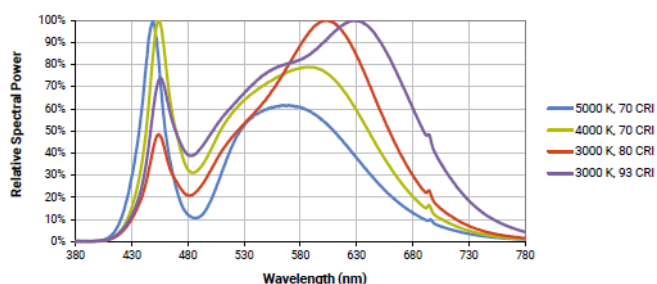
$S(\lambda)$ – спектралната плътност на излъчване на светлинния източник в о.е.

λ – дължина на навълната [nm]

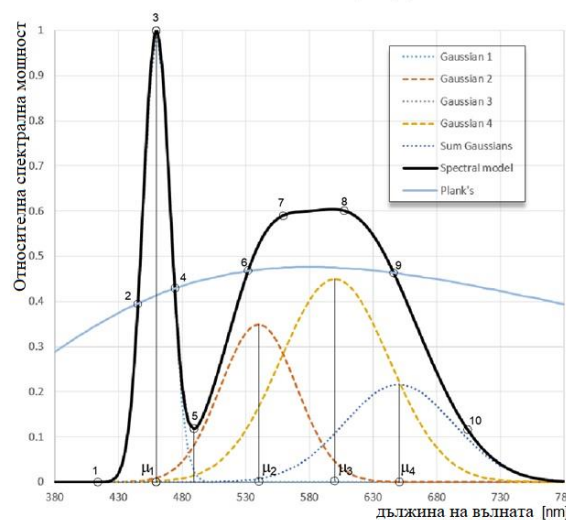
k_n – тегловни коефициенти, $n = 1 \div 4$

μ_n – център на разпределението [nm], $n = 1 \div 4$

σ_n – средно квадратично отклонение [nm], $n = 1 \div 4$



Фиг. 86 - Относителна спектрална плътност на мощността Cree® XLamp® CXA1304 LED



Фиг. 87 - Спектралната плътност на мощността Cree® XLamp® CXA1304 LED

Първото ниво е създаване на спектрален модел на осветителя за конкретни корелирани цветни температури. Изчисляват се коефициентите k_n , μ_n и σ_n ($n=1-4$). Изчислява се спектралната плътност на разпределението $S(\lambda)$. За това разпределение се изчисляват корелираната цветна температура и коефициентът на цветопрераждане и ако те не съвпадат със стойностите на моделираното разпределение се започва итерационна процедура за промяна на стойностите на коефициентите, докато се постигнат желаните стойности на контролираните параметри.

Включването на индекса на цвето предаването е необходим, тъй като при която и да е от LED технологиите, промяната на цветната температура води до неговото изменение. Освен това, както се вижда на фиг. 86, спектралните криви за една и съща цветна температура, но при различни CRI (Ra), значително се различават. При линейна настройка на бялата светлина е необходимо да се моделира спектралното разпределение само за две конкретни корелирани цветни температури – за крайната ниска и крайната висока. При нелинейна настройка – необходими са създаване на модели за повече цветни температури. Броят на моделите за конкретна цветна температура определя общата точност на модела в целия диапазон на регулиране.

След като са създадени модели на спектралното разпределение при двете гранични стойности на корелираните цветни температури следва създаване на модели на спектралното разпределение (най-малко 10) чрез сумиране показано във Формула 2. Всички коефициенти вече са определени, с изключение на тегловният коефициент G, който се променя от 0 до 1. С това завършва второто ниво на алгоритъма.

Формула 2 -
$$S(\lambda) = G \left[k_{11} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_{11}}{\sigma_{11}}\right)^2} + k_{21} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_{21}}{\sigma_{21}}\right)^2} + k_{31} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_{31}}{\sigma_{31}}\right)^2} + k_{41} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_{41}}{\sigma_{41}}\right)^2} \right] + (1 - G) \left[k_{12} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_{12}}{\sigma_{12}}\right)^2} + k_{22} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_{22}}{\sigma_{22}}\right)^2} + k_{32} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_{32}}{\sigma_{32}}\right)^2} + k_{42} e^{-\left(\frac{\lambda - \mu_{42}}{\sigma_{42}}\right)^2} \right]$$

В третото ниво на алгоритъма се определя стойността на тегловният коефициент G по Формула 3. Коефициентите a, b, c и d се определят от анализа на междинните разпределения в ниво две.

Формула 3 - $G = a + bT + cT^2 + dT^3$

където T - корелирана цветна температура

Работата на алгоритъма за създаване на модел на спектралното излъчване на осветител tunable white е показана за осветител Siteco Scriptus® Тип 5MZ313D0TWB. За този осветител разполагаме със спектралното разпределение на излъчването за две корелирани цветни температури – 6370K и 3044K. В първо ниво на алгоритъма са определени коефициентите на гаусовите разпределения. В Таблица 2 са показани коефициентите за 6370K, а в Таблица 3 за 3044K.

Таблица 2 - Коефициенти за гаусово разпределение (Siteco Scriptus) при 6370K

	Gaussian 1	Gaussian 2	Gaussian 3	Gaussian 4
μ_n [nm]	450	515	580	635
σ_n [nm]	25	90	100	100
k_n	0.675	0.235	0.272	0.1

Таблица 3 - Коефициенти за гаусово разпределение (Siteco Scriptus) при 3044K

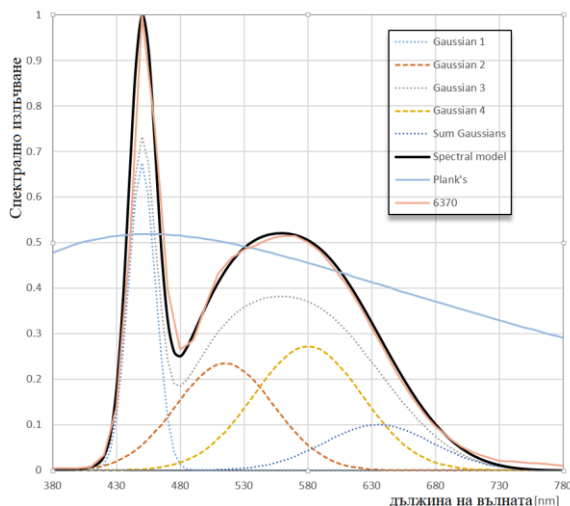
	Gaussian 1	Gaussian 2	Gaussian 3	Gaussian 4
μ_n [nm]	450	531	610	660
σ_n [nm]	25	90	90	150
k_n	0.145	0.14	0.272	0.05

Модела и реалното разпределение на спектралното излъчване на осветителя Siteco Scriptus® при корелирана цветна температура 6370 K е показан на фиг. 89, а за 3044 K – на фиг. 90. Получените спектрални разпределения на излъчването за 11 стойности на тегловният коефициент G (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 и 1) са показани на фиг. 91. Изчислените стойности на корелираната цветна температура за стойностите на тегловния коефициент G (0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 и 1) са показани на фиг. 92. Въз основа на тези резултати са изчислени коефициентите във Формула 4.

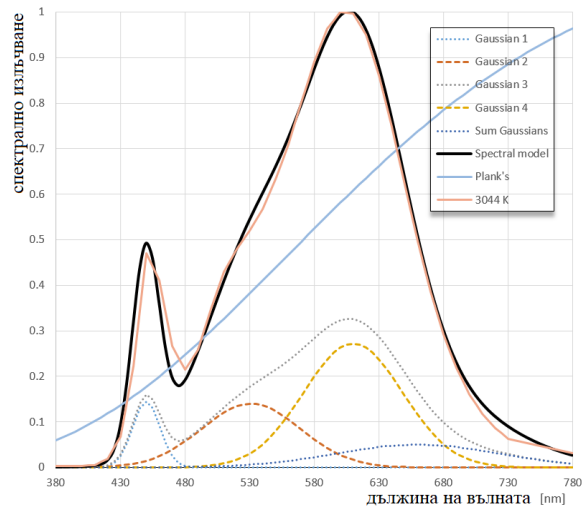
Формула 4 - $G = -5.0197 + 0.0284238T - 4.75668E - 7T^2 + 2.79273E - 11T^3$

където T - корелирана цветна температура

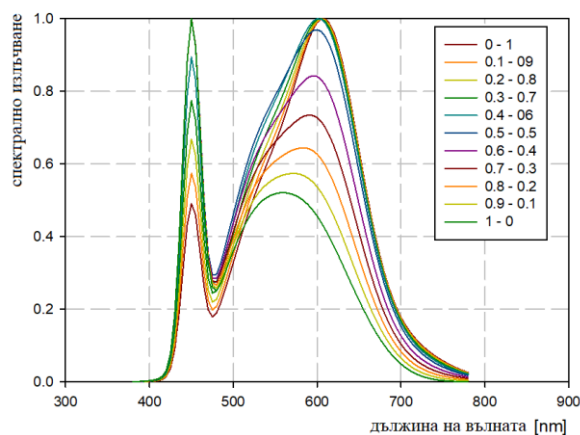
По Формула 4 за корелирана цветна температура 5239 K - $G=0.831834$. Полученият модел на спектралното разпределение за тази температура е показан на фиг. 93. На същата фигура с пунктирна линия е показано реалното разпределение. На фиг. 93 се вижда, че предложеният алгоритъм за създаване на модел на спектралното излъчване на tunable white осветител притежава висока точност и предлага редица решения за създаване на адекватен модел при недостатъчни данни от производителя.



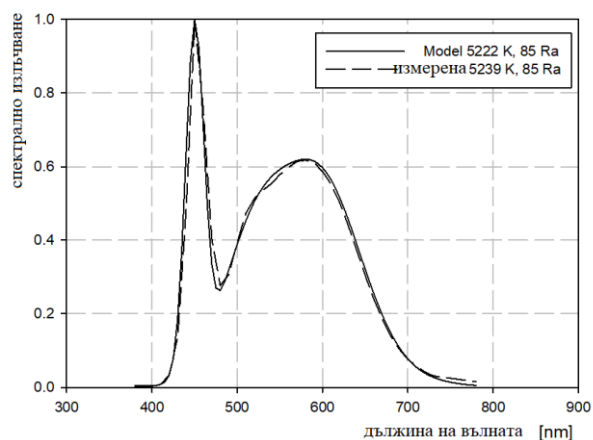
Фиг. 89 - Модел и реално разпределение на спектралното излъчване на осветител Sitecto Scriptus® при корелирана цветна температура 6370 K.



Фиг. 90 - Модел и реално разпределение на спектралното излъчване на осветител Sitecto Scriptus® при корелирана цветна температура 3044 K.



Фиг. 91 - Модели на спектралното излъчване на осветител Sitecto Scriptus® за различни стойности на тегловния коефициент G



Фиг. 93 - Модел на спектралното разпределение за 5239 K

ГЛАВА 5. Реализация на управление на осветителна уредба по предложения модел

Алгоритми за управление на осветителната уредба

Модела за управление на осветителната уредба има два графика – изменението на осветеността и изменението на цветната температура в зависимост от часа на денонощието. Изпълнението на графика за осветеност може да се осъществи с димируем осветител и обратна връзка с датчик за осветеност, а управлението може да се реши с който и да е мастер-контролер за управление на осветлението, който има функция за поддържане на осветеността в зададена стойност или изменението и по линеен закон между някаква минимална и някаква максимална

стойност в рамките на конкретна светлинна сцена. Изпълнението графика за получаване на светлинен поток с конкретна корелирана цветна температура е значително по-сложна задача, поради следните причини:

1. На пазара няма хардуерни елементи за осъществяването му – датчици за цветна температура, които да предават данни по някой от общоприетите протоколи.
2. Мастер контролерите, които могат да управляват осветители с променлива цветна температура (например с DALI TD8), в рамките на светлинната сцена поддържат само една конкретна цветна температура.
3. Датчик за следене на цветната температура ще е много по-скъп и много по-податлив на смущаващи фактори спрямо датчика за осветеност.

Тъй като, за сега, не е възможен пряк алгоритъм за управление на осветителната уредба в помещения със смесено осветление по цветна температура, предлагам косвен метод на управление, който е изложен по-долу. За създаване на алгоритъма има следните изисквания, елементи и допускания:

Хардуерни изисквания към осветителната система:

1. Tunable white LED осветител, който може да се управлява по два независими канала – за осветеност и за цветна температура;
2. датчик за осветеност предаващ данни по някой от протоколите. Датчиците може да са повече от един, в зависимост от типа на помещението.
3. контролер, който по данните от датчика (датчиците) управлява осветителя (осветителите) към съответния датчик, така че да се изпълняват заложените стойности на осветеността в конкретната светлинна сцена.

Софтуерни симулации (например в Dialux Evo) и/или експериментални изследвания, с които се определят следните параметри:

1. стойностите на осветеността в контролните точки и повърхнини за всички светлинни сцени без слънчева светлина;
2. процента димиране на осветителя (осветителите) за всяка светлинна сцена, при който се получава зададената в светлинната сцена средна осветеност на помещението;
3. в зависимост от мястото и начина на монтиране на датчика (датчиците) за осветеност – какво е съотношението на стойностите, които изпраща датчика по шината за данни спрямо средната осветеност на помещението.
4. модел на спектралното излъчване на осветителя за всички възможни корелирани цветни температури за този осветител.

Основните допускания са:

1. за дела на осветеността от слънчевата светлина в контролираната от датчика повърхност се съди от показанията на датчика за осветеност. Например – ако показанията на датчика без слънчева светлина за конкретната сцена трябва да отговаря на 60% димиране, а той подава данни, че димирането е 36%, то това значи, че 60% от осветеността се дължи на осветителя и 40% - дневна светлина.
2. дневната светлина е с цветна температура 6500K, т.е. използвам стандартен осветител D65.
3. правим контролни изчисления и при цветна температура на дневната светлина от 5000K, т.е. при използване на стандартен осветител D50.

Създаването на алгоритъма за управление по цветна температура може да се раздели в три основни стъпки:

1. Създаване на модел на комбиниран осветител(Siteco + D65), който осветява контролната повърхност под датчика за осветеност при различни съотношения на светлинния поток от дневната светлина (представена от стандартния CIE осветител D65, който представлява

статистически усреднена дневна светлина с корелирана цветна температура приблизително 6500K) и осветител със всички възможни цветни температури, който конкретният осветител може да осигури. Комбинираният осветител (Siteco + D65) има спектрално разпределение на излъчването изчислено по Формула 5, а при приет стандартен осветител D50 по Формула 6.

Формула 5 - $Sres_{i,j} = D_k Smodel_{i,j} + (1 - D_k) SD65_i$,

Формула 6 - $Sres_{i,j} = D_k Smodel_{i,j} + (1 - D_k) SD50$,

където:

$Sres_{i,j}$ – резултантното спектрално разпределение на излъчването

$Smodel_{i,j}$ – моделираното спектрално разпределение на излъчването

$SD65_i, SD50$ – спектралното разпределение на излъчването D65 и D50

$i = 1 \div 80$; $i = 1 - 380nm$; $i = 80 - 780nm$

$j = 1 \div 11$; $j = 1 - 3042K$; $j = 11 - 6368K$

$D_k = 0 \div 1$ със стъпка 0.1; $D_k = 0$ – само дневна светлина

Очевидно е, че от особена важност за получения спектър е стойността на коефициента D която определя съотношението между светлинния поток от двата източника – осветител и естествена светлина. За всяко резултантно спектрално разпределение е изчислена корелираната цветна температура. За да получим регресионните зависимости, резултатите за модел с D65 са представени в 2D формат на фиг. 97., а тези с D50 на фиг. 98. За всяко едно съотношение дневна светлина / осветител Siteco Scriptus® е изчислено регресионно уравнение от трета степен, представено с Формула 7 (важаща както при D65, така и при D50).

Формула 7 $Tres_k = y0_k + a_k Tsource_k + b_k T^2 source_k + c_k T^3 source_k$

където:

$Tres_k$ – резултантната корелирана цветна температура на излъчването

$Tsource_k$ – корелираната цветна температура на излъчването от осветителя

$k = 1 \div 11$ при $k=1 \rightarrow D=0$; $k=2 \rightarrow D=0.1$ и т.н.

След намиране зависимостите за коефициентите $Y0$, a , b и c спрямо D , можем да запишем универсално уравнение за резултатната цветна температура:

Формула 8 -

$Tres = (Y0r_1 + ar_1D + br_1D^2 + cr_1D^3) + (Y0r_2 + ar_2D + br_2D^2 + cr_2D^3)Tsource + (Y0r_3 + ar_3D + br_3D^2 + cr_3D^3)T^2 source + (Y0r_4 + ar_4D + br_4D^2 + cr_4D^3)T^3 source$

където:

$Tres$ – резултантната корелирана цветна температура на излъчването

$Tsource$ – корелираната цветна температура на излъчването от осветителя

D - съотношение D65/Siteco (при модел с D65 източник на естествена светлина)

или D50/Siteco (при модел с D50 източник на естествена светлина)

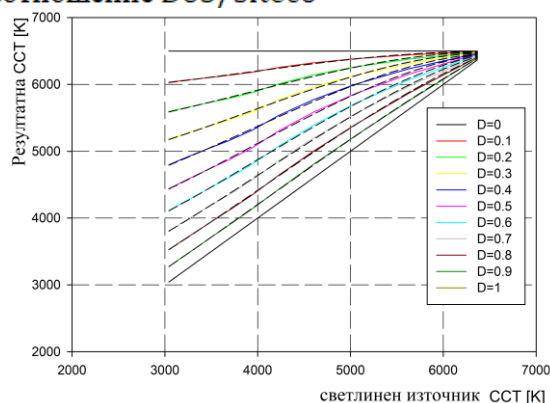
След заместване на известните коефициенти от формула 34 и проверка е установена максимална грешка от 0,82%, което показва, че създаденият модел е с много добра точност.

2. Намиране на възможните граници на управление (за определение ситуации, желаната цветна температура не винаги може да бъде постигната) и създаване на формула за изчисление на целевия спектър. Графично зоната в която може да се управлява осветлението е показана на фиг. 107. Графичното решение е показано на фиг. 108.

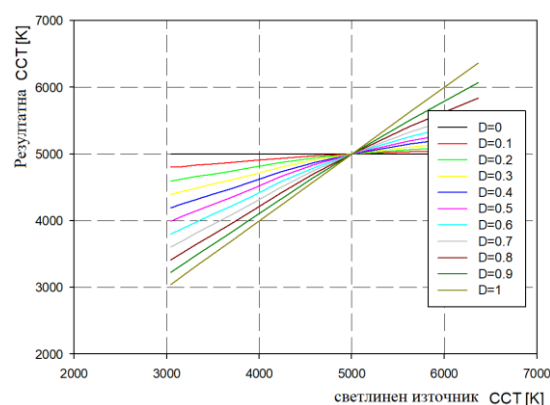
Формула 9 -

$Tsource = (Y0r_1 + ar_1D + br_1D^2 + cr_1D^3) + (Y0r_2 + ar_2D + br_2D^2 + cr_2D^3)Tres + (Y0r_3 + ar_3D + br_3D^2 + cr_3D^3)T^2 res + (Y0r_4 + ar_4D + br_4D^2 + cr_4D^3)T^3 res$

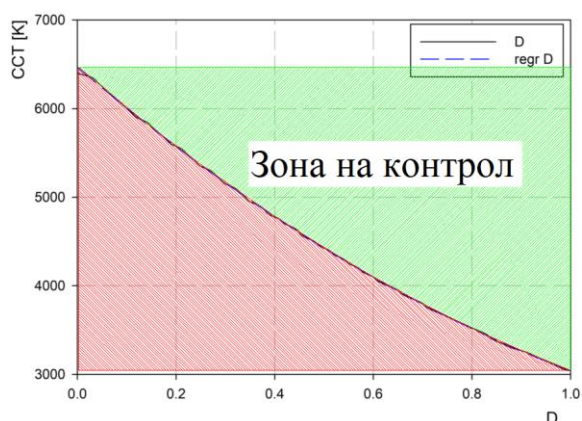
T_{res} – желана резултантната корелирана цветна температура на излъчването
 T_{source} – корелираната цветна температура на излъчването от осветителя
 D - съотношение D65/Siteco



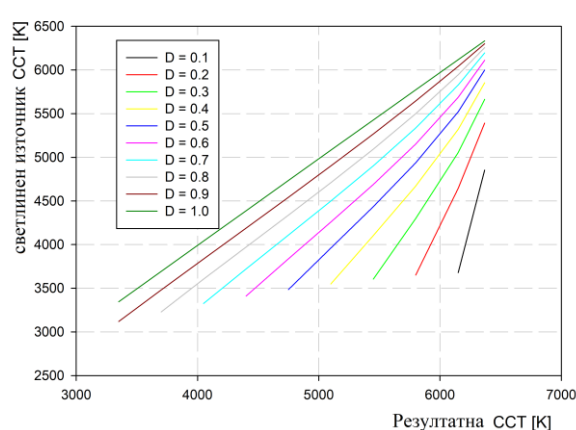
Фиг. 97 - Корелирана цветна температура при комбинираното действие на дневна светлина D65 и осветител Siteco Scriptus® за различни стойности на коефициента D (в 2D формат)



Фиг. 98 - Корелирана цветна температура при комбинираното действие на дневна светлина D50 и осветител Siteco Scriptus® за различни стойности на коефициента D (в 2D формат)



Фиг. 107 - Зона за управление на осветлението



Фиг. 108 - Зададена корелирана цветна температура на осветителя Siteco Scriptus® за постигане на желана цветна температура при комбинираното действие на дневна светлина и осветителя за различни стойности на коефициента D

- Третата, последна стъпка е да зададем цветна температура на осветителя, такава че излъчването му да отговаря на изчислената цветна температура. По този начин се отстранява систематичната грешка на конкретният осветител. По Формула 10 се изчислява цветната температура, която да се изпрати по DALI DT8 към осветителя:

Формула 10 –

$$T_{DALI} = (1.46159 - 0.000253796T + 3.60199e-008T^2 - 1.28357e-012T^3) \cdot T$$

T – желана резултантната корелирана цветна температура на излъчването

T_{DALI} – стойност, която се изпраща по шина данни

По описаните процедури е създаден симулационен софтуер, с помощта на който в реални условия да се оцени работоспособността на предлагания метод за управление на осветлението в административни сгради. Работата и блок схемата на създадения софтуер са описани на фиг. 110.

Стандартизиране на типове офиси

Tun 1 – работни помещения с един основен осветител или с един ред осветители успоредни на източника на дневна светлина. Такъв тип офиси са индивидуалните и груповите с един ред осветители.

Tun 2 – работни помещения с повече от един ред осветители успоредни на източника на дневна светлина. Към този тип разглеждам груповите офиси и площта на отворените офиси, в която преобладава дневната светлина.

Tun 3 – работни помещения без източник на дневна светлина. Към този тип ще разглеждам затворените помещения, помещения със спуснати щори и частите от отворените офиси, в които осветеността от дневната светлина по всяко време на денонощието е значително по-малка от необходимата, според работния график.

Една от основните задачи е да създам алгоритми за управление на осветлението за офиси тип 1 и 2. За офиси тип 3 не предлагам специализирани алгоритми за управление, тъй като считам, че задачата за управление на осветлението е лесно решима с намиращите се на пазара контролери, с които може да се управляват осветителите по осветеност и по корелирана цветна температура, спрямо предварително определен график. В настоящата работа разглеждам варианти едно и две с висящи осветители осигуряващи директно и индиректно осветление. Основен елемент в разработения алгоритъм за управление на осветлението е наличието на светлинен датчик в системата.

Общите препоръки за монтаж на светлинните сензори.

1. Оптималната височина за монтаж е 2.5м до 3м. При по-голяма височина се намалява чувствителността на сензора;
2. Конуса за наблюдение да попада изцяло в работната зона. Да не попада върху повърхности на прозорците;
3. Да се избягва излагане на пряка светлина от осветителите.
4. В конуса за наблюдение да няма източник на топлина;
5. Да се избягват променящи се повърхнини (напр. вентилатори).

Алгоритми за управление на осветлението с осветители разположени в повече от един ред (Симулации в среда Dialux Evo)

За управление на осветлението в помещения с осветители разположени в повече от един ред успореден на прозорците, разглеждам две принципни решения – с един фото сензор за цялото помещение и със сензори монтирани във всеки ред от осветителите. Предложените решения за управление са симулирани за помещение за срещи с 40 m² в бизнес сграда в гр. Мюнхен с югоизточно разположение. Симулациите са направени със софтуерния продукт Dialux Evo на фирмата DIAL. Алгоритмите за управление на осветлението в зависимост от броя на сензорите е различен и затова ще ги разгледам поотделно.

Алгоритъм за управление на осветлението с осветители разположени в два реда и един фото-датчик.

В този случай, алгоритъма за управление е идентичен с описания по-горе **Error! Reference source not found.**, като за определяне на коефициента D (отношението на дневната осветеност към осветеността от осветителите) се съди по отношението на осветеностите в контролна площ определена от конуса за наблюдение върху работната повърхност на помещението.

Алгоритъм за управление на осветлението с осветители разположени в два реда и фото датчици за всеки ред.

В основата си и тук в алгоритъма на управление са заложили следните идеи:

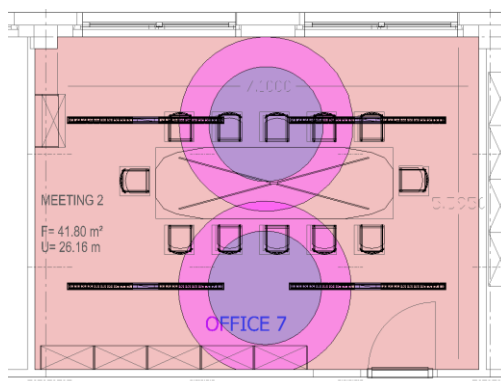
- всеки сензор е свързан към системата за управление на осветеността на контролираната от него повърхност, така че тя да е постоянна в рамките на светлинната сцена;
- по моментното димиране на осветителите се съди за съотношението между осветеността от дневната светлина и от осветителите.

Разликите при управление с един фото датчик са следните:

- върху осветеността на контролираната от всеки датчик повърхност влияе и светлинния поток на осветителите от другия ред, които се управляват независимо, според показанията на другия фото датчик;
- за управление на цветността трябва да се избере един от датчиците, за да се избегнат незатихващи колебания в процеса на управление.

При разработване на алгоритъма съм приел следните ограничения:

- към всички осветители се подава едно и също задание за цветната им температура;
- за оценка на средна осветеност на помещението ще съдя по данните от двата датчика / в симулациите – от осветеността на площта под датчиците, определена от конуса за наблюдение/. Връзката между средната осветеност на помещението и показанията на датчиците трябва да се установи за всяко конкретно помещение чрез симулации и измерване.
- при симулациите за определяне на параметрите на управлението ще използвам модела „облачно небе“.

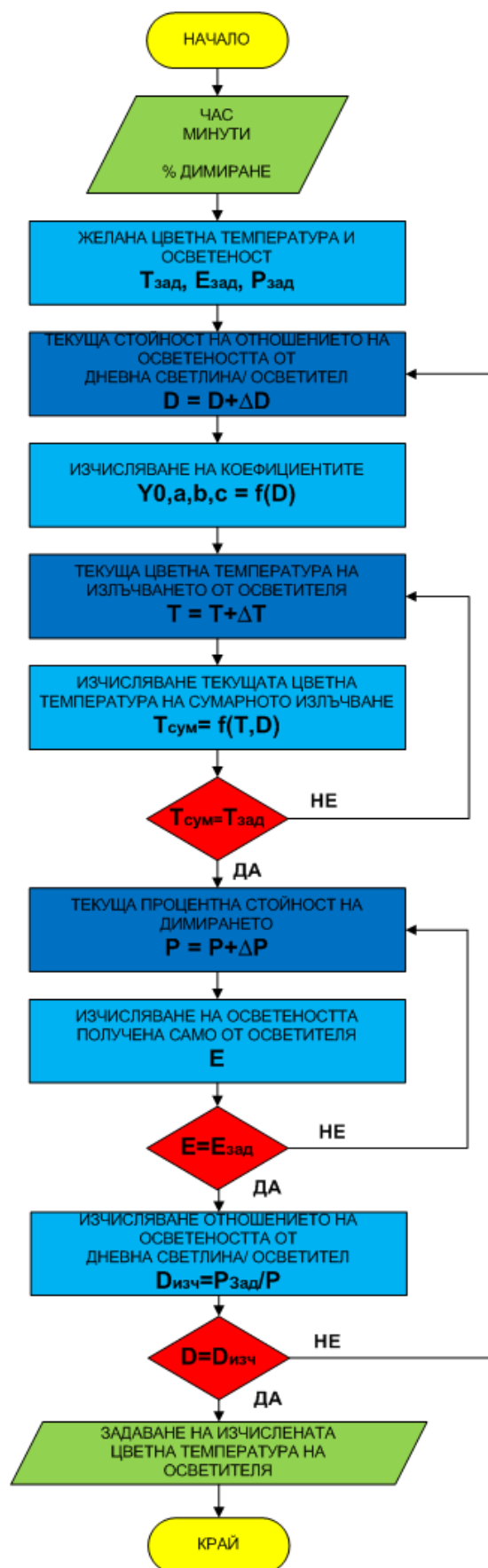


Фиг. 125 - Контролни повърхности под фото датчиците

И тук, както в случая с един датчик, трябва да определим стойността на коефициента D , който показва съотношението между изкуствената и дневна светлина. За целта трябва да се направят следните стъпки:

1. Да се определят връзките между осветеността на контролните повърхности под датчиците (показанията на датчиците) при димиране по отделно на всеки ред от осветителите.
2. Да се определи връзката между средната осветеност на помещението и процента на димиране на осветителите.
3. Да се определи еквивалентен коефициент D , с чиято стойност да се определи цветната температура на осветителите.

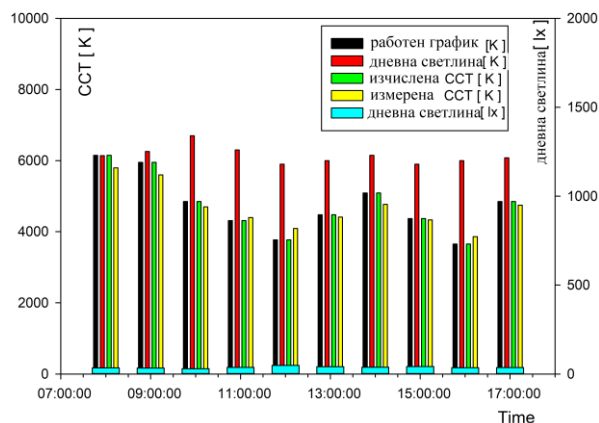
Следователно, входната стойност на процента димиране в алгоритъма ще влезе средната стойност на процента димиране в двата реда. Този процес на управление на осветлението е симулиран в Dialux evo. В заключение може да се направи извода, че управлението на осветлението с два фото датчика дава по-равномерно разпределение на осветеността и е за предпочитане, въпреки по-трудния за реализиране алгоритъм за управление.



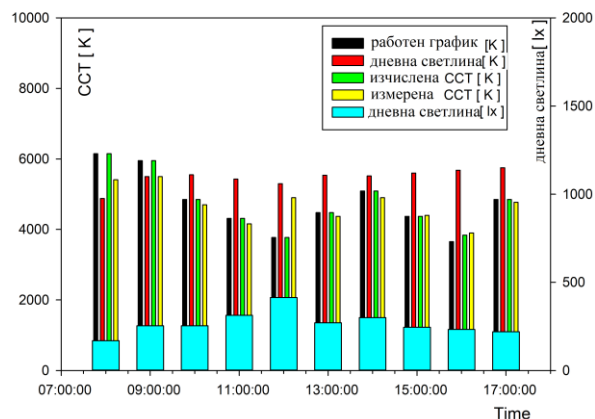
Фиг. 110 - Функционална логика на създадения софтуер за изчисление на заданието (задаване цветна температура към DALI контролера)

ГЛАВА 6. Верификация на разработените алгоритми, заключение и препоръки за бъдещи изследвания

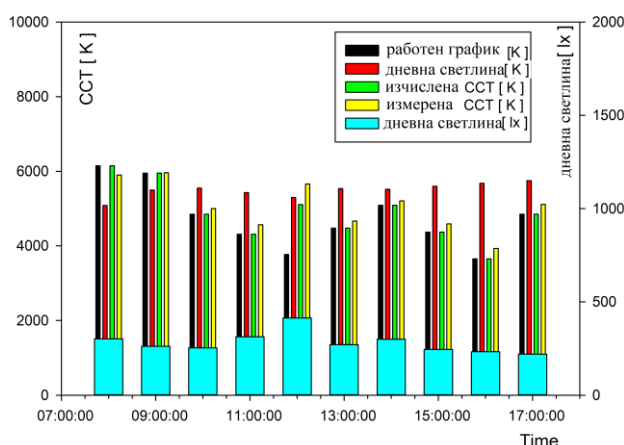
Работоспособността и коректната работа на разработените алгоритми за управление на осветителната уредба е изпитана с помощта на опитната постановка, описана в глава 3. На фигури 130 до 136 измерванията са показани графично.



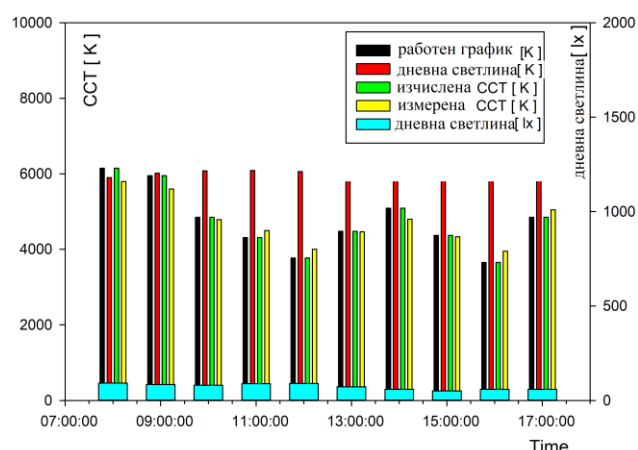
Фиг. 130 - Сравнение на изчислените и измерените цветни температури, при различни метеорологични условия (измервания 1-10, D65).



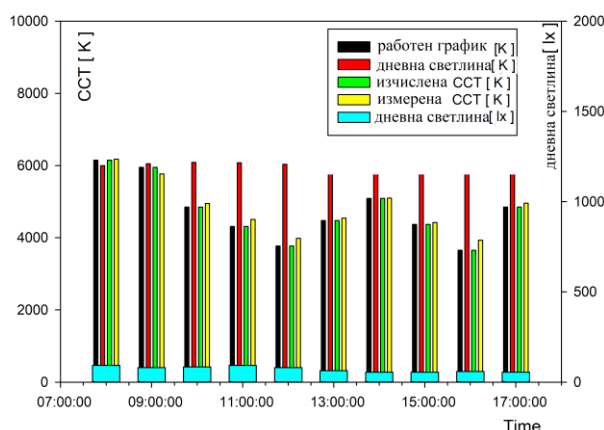
Фиг. 131 - Сравнение на изчислените и измерените цветни температури, при различни метеорологични условия (измервания 11-20, D65).



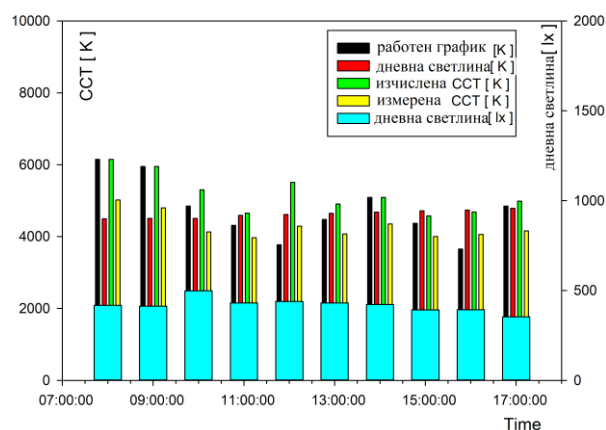
Фиг. 132 - Сравнение на изчислените и измерените цветни температури, при различни метеорологични условия (измервания 21-30, D50).



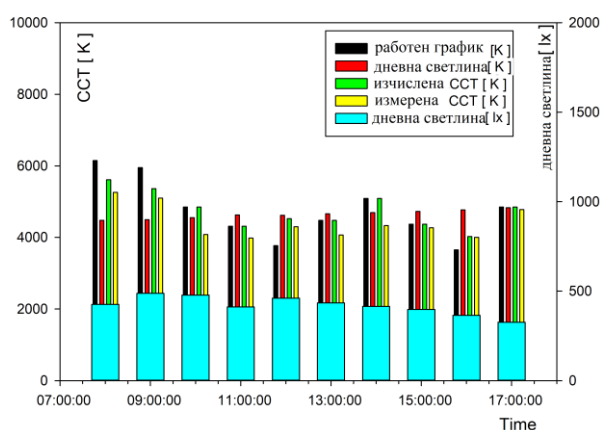
Фиг. 133 - Сравнение на изчислените и измерените цветни температури, при различни метеорологични условия (измервания 31-40, D65).



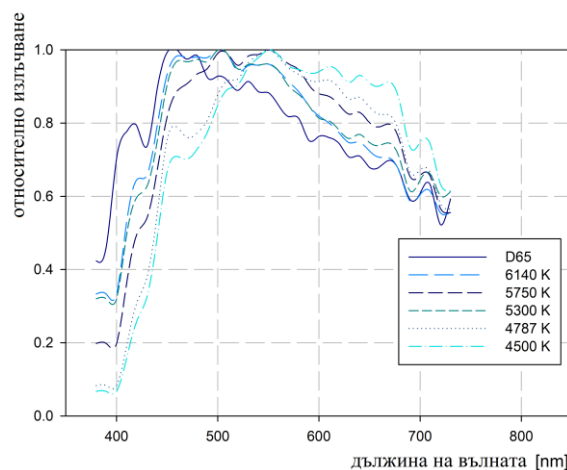
Фиг. 134 - Сравнение на изчислените и измерените цветни температури, при различни метеорологични условия (измервания 41-50, D50).



Фиг. 135 - Сравнение на изчислените и измерените цветни температури, при различни метеорологични условия (измервания 51-60, D65).



Фиг. 136 - Сравнение на изчислените и измерените цветни температури, при различни метеорологични условия (измервания 61-70, D50).



Фиг. 137 - Сравнение на спектъра на стандартния осветител D65 с спектъра на дневната светлина при различни метеорологични условия.

От направеното изследване на алгоритъма за управление на експерименталната осветителна установка могат да се направят следните изводи:

1. При ниски нива на дневната осветеност (облачно време), реализираната цветна температура на смесеното осветление следва изключително точно (в рамките на няколко процента) заложените стойности в светлинните сцени.
2. При по-висока дневна осветеност, но при висока дневна цветна температура, заложената цветна температура може да не се постигне, защото системата излиза от зоната за управляемост (дела на светлинния поток от контролирания осветител е много малък).
3. При слънчево време и висока дневна осветеност на помещението, грешката на системата е най-голяма (20 – 30%), поради излизането от зоната на управляемост и поради приетия модел със стандартен осветител D65 (на фиг. 135 се виждат разликите в спектрите на стандартния осветител и реалните спектри). В този случай за намаляване на грешката може да се използва алгоритъма със стандартния осветител D50. На фиг. 136 се вижда, че системата с алгоритъм D50 дава значително по-добри резултати спрямо системата с алгоритъм D65.
4. Най-добро управление, т.е. най-точно следване на заложения график по цветна температура може да се осъществи с комбиниране на двата алгоритъма за управление.

Заклучение и препоръки за бъдещи изследвания.

Изградената осветителна уредба и предложените алгоритми за управлението удовлетворяват поставените условия за действаща Human Centric Lighting осветителна уредба. Резултатите удовлетворяват поставената задача за създаване и проектиране на биодинамична светлинна уредба (Human Centric Lighting) в практиката, без валидиране на резултатите с анкети, тъй като ефектите на HCL уредбите са доказани в редица полеви експерименти и анкетни запитвания [61] [138].

Въпреки това остават някои въпроси, които ще изискват значително време и ресурси за изясняване, като например:

- Точното съотношение на директната и индиректна съставка на излъчването при осветители с такива възможности;
- При осветители разположени в повече от един ред – дали цветната температура на излъчването от осветителите от различните редове (спрямо прозорците) да е една и съща, а ако не – по какви критерии и в какви граници да се различава?
- Както се вижда от направените изследвания, за да се повиши точността на управление е необходимо да се увеличи дела на изкуственото осветление. Това означава повишаване на нормите за средната осветеност, например с 200 – 250 lx, което повишава стойността на осветителната уредба.

Смятам, че разработените в дисертационния труд алгоритми за управление на осветлението могат да се приложат и за технологии в осветителната техника, които са още в етап на разработка. Така например с използване на OLED технологията могат да бъдат създадени съвсем друг тип осветителни тела или светещи площи, които да осигурят значително по-силен фактор на невизуално действие. Чрез специални фолиа (за създаване на излъчване в синята част на спектъра) OLED технологията може да бъде развита и без проблем използвана за Human Centric Lighting уредби [147].

Биодинамичните (Human Centric Lighting) осветителни уредби трябва да бъдат разглеждани и от етична гледна точка. Аспекти като манипулация на работното място и светлинен допинг са нови понятия в научната дискусия и все още трябва да бъдат осмислени и преработени в съответни правила и норми.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Научно-приложни:

1. Систематизирани са всички известни фактори, които имат значение за силата на въздействие на светлината върху човешкия организъм чрез рецепторите в зрителния орган отговорни за циркадната система.
2. Създадени са критерии за избор на осветител и модел за управление на осветителната уредба.
3. Направен е анализ на резултатите от експериментите. Изведени са законите за изменение на светлинния поток и корелираната цветна температура при управление на осветителя. Създаден е пълен математически модел на осветителя от експерименталните данни
4. Предложен е модел за управление на осветителна уредба в административни сгради по препоръките на DIN SPEC 67 700;
5. Дадени са препоръки за преизчисляване на границите за корелираната цветна температура на работните графици в зависимост от реалните условия;
6. Предложен е алгоритъм за преизчисляване на границите за корелираната цветна температура на работните графици в зависимост от средната възраст на служителите;
7. Създадени са математически модели на спектралното излъчване на LED осветител по каталожни данни при линейна и нелинейна настройка на бялата светлина.
8. Създаден е алгоритъм за управление на цветната температура на осветителни уредби по критериите на Human Centric Lighting за индивидуални офиси;

9. Предложена е методика за привеждане на управлението на осветителни уредби в средни и големи помещения към тази за индивидуален офис.

Приложни:

1. Създадена е експериментална постановка, която е така подбрана и реализирана, че да може точно и насочено да бъдат изследвани характеристиките на осветителя, системата за управление и алгоритмите за управление;
2. Предлагам критерии за стандартизиране на различните офиси в административните сгради, така че управлението на осветлението да се свежда до един алгоритъм. Създавам алгоритми за управление и на офиси с два и повече реда осветители.
3. В среда Dialux evo са изследвани възможностите на предложения алгоритъм за управление

СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Захари Иванов, **Божидар Гълъбов**, „Биодинамична осветителна уредба в дом за възрастни хора“, IV Научна конференция ЕФ ТУ София, Созопол 28 септември – 1 октомври, стр. 218-228, 2012
2. Захари Иванов, **Божидар Гълъбов**, „Въздействие на светлината върху човешкия организъм“, IV Научна конференция ЕФ ТУ София, Созопол 28 септември – 1 октомври, стр. 279-289, 2012
3. **Божидар Гълъбов**, „Нормиране на биодинамично осветление. Актуални работни групи, норми и препоръки за проектиране на биодинамични осветителни уредби във Федерална Република Германия“, Proceedings of the Technical University of Sofia, 69 (1), p.59-69. 2018
4. **Божидар Гълъбов**, „Влияние на възрастта и пола върху зрителните характеристики на човека при Human Centric Lighting“, Proceedings of the Technical University of Sofia, 69 (1), p.69-79. 2018
5. **Bozhidar Galabov**, Experimental study of LED luminaire for Human Centric Lighting, 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), DOI: 10.1109/BulEF48056.2019.9030773
6. **Bozhidar Galabov**, Spectral luminance modeling of a LED luminaire made by the tunable white technology, 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), DOI: 10.1109/BulEF48056.2019.9030707
7. **Bozhidar Galabov**, Zahari Ivanov, Adapted lighting control model for Human Centric Lighting, 2019 11th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), DOI: 10.1109/BulEF48056.2019.9030786

CONTROL OF INDOOR LIGHTING SYSTEMS WITH BIOLOGICAL AND EMOTIONAL EFFECTS ON HUMANS

ABSTRACT

The research in the field of Human Centric Lighting technologies is progressing very fast. It is an indisputable fact that natural and artificial light in administrative buildings affects individuals, both directly - by directly affecting the ability of the visual organ to perceive the environment, and indirectly - by stimulating receptors and brain centers responsible for the release of a particular type of hormones. However, there is still no absolute consensus on what exactly the ideal non-visual lighting is and what design recommendations and norms should be created for the application of this type of indoor lighting systems in practice. There is also a lack of specific control solutions for designing this specific lighting systems. This work aims to offer concrete practical control solutions for Human Centric Lighting systems. In order to reach this goal, the following problems must be considered and solved:

1. To systematize the theory and biological, non-image-forming (melanopic) impact of light on the human body and to determine the significant factors for melanopic body reaction;
2. To create criteria for selection of a luminaire and a model for control of the lighting system;
3. To create an experimental lighting indoor project according to the proposed criteria;
4. To create a mathematical model and to study experimentally the spectral composition of the radiation of the selected luminaire. To create data processing software;
5. To create models for control of Human Centric Lighting systems taking into account the non-visual effects of light on the human body;
6. To create mathematical models of the LED luminaire according to catalog data;
7. To implement control of the lighting system according to the proposed model, both for the experimental room and for a wide range of rooms;
8. Verification of the developed algorithms for control of the lighting system taking into account the biological (melanopic) and emotional impact of light on humans;

In order to solve the above problems, this paper first examines and systematizes the theoretical foundations of the non-visual impact of light on human body. After categorizing the most important factors and determining the work schedules on which the lighting system will be managed, an experimental setup with a suitable luminaire is built. Experiments and measurements are carried out in a real office environment and a number of software and algorithmic solutions for the control of the lighting system are created. These new mathematical control models are universal and can be used for all types of Human Centric Lighting luminaires. Simulations are made and applied for different types of rooms and lighting variations. For verification, the created models and the mathematical algorithms and results are compared with the field measurements. The results of these comparisons show high accuracy of the created control models, which allows the wide use of the proposed control system for Human Centric Lighting in practice. However Human Centric Lighting systems must also be considered from an ethical point of view. Aspects such as workplace manipulation and light doping are new concepts in the scientific discussion and still need to be considered into relevant rules and regulations.