



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ

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

маг. инж. Дилян Димитров Иванов

**УПРАВЛЕНИЕ НА ВЪТРЕШНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА БАЗА
ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЕНЕРГИЙНИТЕ РАЗХОДИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

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

Професионално направление: 5.2 "Електротехника, електроника и автоматика"

Научна специалност: „Светлинна техника и източници на светлина ”

Научен ръководител: доц. д-р Ива Петринска

Рецензенти:

проф. д-р Христо Николов Василев

проф. д-р Захари Александров Иванов

София 2019

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, състояло се на 29.10.2018 г. Научното жури и датата на защитата са определени от Ректора на Технически университет – София със Заповед № ОЖ-5.2-11/15.10.2018г. Защитата на дисертационния труд ще се състои на 28.02.2019 г. от 13:00 часа в залата на Библиотечния център на Технически университет – София.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Електротехнически факултет при Технически университет – София.

Научно жури:

проф. д-р Христо Николов Василев

проф. д-р Ангел Саракинов Пачаманов

проф. д-р Захари Александров Иванов

доц. д-р Орлин Любомиров Петров

доц. д-р Пламен Ценков Цанков

Автор: маг. инж. Дилян Димитров Иванов

Заглавие: УПРАВЛЕНИЕ НА ВЪТРЕШНО ОСВЕТЛЕНИЕ НА БАЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЕНЕРГИЙНИТЕ РАЗХОДИ

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София
2019

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

Актуалността на темата се определя от възможностите за повишаване на ефективността на изкуственото осветление чрез оптимизиране на енергийните разходи за него при запазване или подобряване на количествените, качествените и психологичните показатели на смесеното осветление в обществени сгради. Получаването на близки до изискваните стойности на показателите на осветителните уредби в сгради, при задоволяване на потребностите от светлина на работещите в тях (наситеност на пространството със светлина), е актуална задача, която обикновено се решава с компромиси. В този смисъл разработеният дисертационен труд е актуален, както в научен, така и в научно-приложен аспект и представлява полезно увеличаване на знанията в тази област.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Да се създаде система за управление на осветлението в сградни пространства, използваща оптимизационен подход за управление на осветлението, който едновременно да удовлетворява физиологичните и психологически нужди на хората и необходимостта от постигане на енергийна ефективност.

За постигане на поставената цел са формулирани следните задачи:

1. При зададени параметри на дадено помещение да се определят необходимите количествени и качествени показатели на дневната естествена светлина за задоволяване на нормативните изисквания за смесено осветление при минимални разходи за изкуствено осветление;
2. Чрез експериментално изследване на годишния профил на естествената осветеност в помещения на сгради (в избрани контролни точки) да се определи отношение вертикална/хоризонтална осветеност и стойностите на фактора на естествено осветление (ФЕО) при различен ъгъл на насочване на измервателните сензори;
3. Изготвяне и верифициране на симулационни модели за промяната на естествената светлина в помещения в съответствие с техния профил, светлинни отвори и географско изложение;
4. На база експериментални резултати и такива, получени от симулация данни да се дефинира оптимизационна задача за управление на изкуственото осветление при постигане на максимално удовлетворяване на показателите за осветление на работни места при минимално потребление на електрическа енергия, като по получената целева функция се избере оптимизационен метод за решаване на задачата;
5. Да се анализират получените варианти от решаване на оптимизационната задача и се предложи апаратно изпълнение на системата за управление на осветлението, което да се експериментира в практиката. Да се определи разликата между планов разход на електрическа енергия за осветление и реално консумирана енергия за период от един месец.

Научна новост

1. Разработена е автоматизирана система за измерване на хоризонтална и вертикална осветеност в характерни точки от експериментално помещение. С помощта на реализираната система за измерване на осветеност е възможно получаването на статистически значими данни за характера на изменение на дневната естествена осветеност в помещения, в зависимост от размера и географската ориентация на светлинните отвори, облачността, положението на контролната точка в помещението, сезона и времето от деня за гр. София.

2. Определена е корелационната зависимост на получените по експериментален път резултати за показателя фактор на естествено осветление и тези, получени посредством симулации. Симулационните модели са построени в най-широко използваните програми за светотехнически изчисления. Получените коефициенти на корелация на експерименталните и симулационните резултати недвусмислено показват силна корелационна зависимост при използване на програма Velux Daylight Visualizer

3. Направен е анализ на качеството на естественото осветление посредством показателя заслепяване от естествена светлина и устойчивостта на отношението вертикална/хоризонтална осветеност. С помощта на изчислителни, експериментални и симулационни резултати е установено, че поради спецификата на положението на България на земното кълбо и положението на Слънцето през различните сезони, в закрити помещения с характерна за страната архитектура, няма продължителни периоди от време, през които показателите за оценка на заслепяването имат недопустимо високи стойности.

Практическа приложимост

1. Разработен е оптимизационен подход за минимизиране на консумираната електрическа енергия за осветление посредством използване на еволюционен оптимизационен подход.

2. Разработена е система за управление на осветлението, базирана на предложението в дисертацията алгоритъм за управление на изкуственото осветление с максимално използване на дневната естествена светлина. Системата е внедрена в реално съществуващо помещение и е извършен мониторинг на работата ѝ.

3. Внедряването на системата за управление, предложена в дисертационния труд, води до значителна икономия на електроенергия, възлизаща на 48%.

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 29.10.2018г, протокол № 222/29.10.2018г

Етапи от дисертационния труд са докладвани и обсъждани на:

1. V Конференция на Електротехнически факултет „ЕФ2013“, 2-5.09.2013г., Созопол.
2. VI Конференция на Електротехнически факултет „ЕФ2014“, 15-17.09.2014г., Созопол.
3. VII Конференция на Електротехнически факултет „ЕФ 2015“, 19 – 21.09.2015, Созопол.
4. „Lux Junior 2015“, 25-28 Септември 2015, Дорнфелд, Германия
5. VIII Конференция на Електротехнически факултет „ЕФ 2016“, 12 – 15.09.2015, Варна.
6. „Lux Junior 2017“, 8-10 Септември 2017, Дорнфелд, Германия
7. XXth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, 3 – 6 June, 2018 Bourgas, Bulgaria

Публикации

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 9 статии: Доклади от научни конференции в чужбина - 2 броя; Доклади от научни сесии и конференции в страната - 7 броя. Една статия е самостоятелна, а останалите са в съавторство.

Структура и обем на дисертационния труд

Дисертационният труд е в обем **148** страници, като включва увод, **5** глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо **194** литературни източници, като **157** са на латиница и **37** на кирилица. Работата включва общо **67** фигури и **50** таблици.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ГЛАВА 1. Анализ на съществуващите алгоритми и системи за управление на осветлението в обществени сгради

Значение и наличие на естествената светлина

Наличието на естествена светлина е важен фактор за постигане на ефективно осветление, тъй като той оказва влияние, както върху човешкия фактор, така и върху количеството на консумираната за осветление електрическа енергия. Естествената светлина е уникален светлинен източник, тъй като спектърът ѝ обхваща всички дължини на вълната, променя се динамично и оказва пряко въздействие върху производителността и настроението на хората. Освен това дисконфортът, причиняван от прозорци с гледка навън е по-малък в сравнение с този причиняван от прозорци с неутрален екран или щори. Въпреки, че положителният за хората ефект на дневната светлина е доказан, нуждата от достъп до прозоречна площ е индивидуална. Интегрирането на наличната естествена светлина във времето и архитектурното пространство е критичен момент за постигането на оптимален комфорт и продуктивност и за намаляването на консумацията на енергия.

С цел удовлетворяване едновременно на човешките потребности от светлина и изискванията за енергийна ефективност е необходимо извършване на адекватна оценка на естествената светлина, проникваща в помещенията. Обикновено такава оценка се дава с величината обобщен коефициент на естествено осветление, съответстващ на условията за естествено осветление при дифузна облачност. Направени са редица проучвания за характера на промяна на външната естествена осветеност в България, както и на коефициентите на естествено осветление в помещения с различно географско положение. Освен посредством експериментални изследвания, които когато се отнасят за естествено осветление е необходимо да се извършват за продължителен период от време, често за оценка на условията на естествено осветление се използват симулационни методи. Понастоящем съществуващите симулационни програми дават възможност за използване на реалистични данни за промяната на естественото осветление при различни атмосферни условия, посредством които могат да се правят дългосрочни прогнози за наличието на дневно осветление, с помощта на тестови референтни години и климатични детайли. Необходимо е, обаче да бъдат дефинирани специфични мерки и критерии за оценка на наличността на естествена светлина, определена посредством симулации.

Енергийна ефективност и управление на осветлението в сгради

При анализ на енергийната ефективност в сгради, естествената светлина винаги се разглежда като възможност за икономия на електрическа енергия и подобряване на условията на работната среда. Множество проучвания показват, че иновативните системи за управление на осветлението, следващи промяната на естествената осветеност имат значителен потенциал за намаляване на консумацията на енергия в обществени сгради, като се възползват максимално от проникващата в помещенията посредством светлинни отвори дневна светлина. В повечето изследвания по въпроса, обаче светлинните предпочитания и визуален комфорт на потребителите не са взети под внимание, или е пренебрегнат проблемът за заслепяване. Създаването на система за управление, която едновременно удовлетворява максимално човешката потребност от светлина и намалява до минимум потреблението на електрическа енергия е сложна задача. Тя зависи от много фактори като: наличие на дневна светлина, структура на сградния интериор и индивидуални предпочитания на потребителите относно светлинната среда. За условията на България са разработени и съществуват редица алгоритми за управление на осветлението в зависимост от наличието на естествена светлина. Най-голям принос за реализиране на целта на настоящата дисертация, има концепцията в патента на Техническият университет – София, за който са допринесли всички преподаватели от катедра „Електроснабдяване, електрообзавеждане и електрически транспорт“.

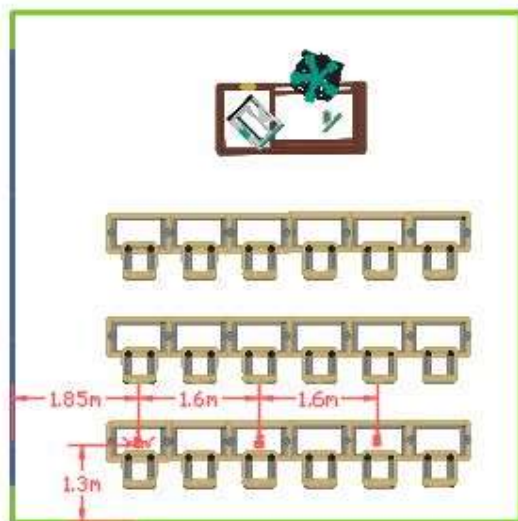
ГЛАВА 2. Разработване на автоматизирана система за измерване на естествена осветеност. Анализ на възможността за използване на експерименталните резултати за разработване на система за управление на изкуственото осветление. Статистическа обработка на получените данни

2.1. Автоматизирана система за експериментално заснемане на естествената осветеност

Посредством измерване на хоризонтална осветеност на нивото на работната повърхност и вертикалната осветеност на нивото на окото при различна посока на наблюдение и позиция на наблюдателите в лабораторни условия при дневно естествено и смесено осветление се получава триизмерна карта на помещението, която показва както визуалните, така биологичните „тъмни и светли“ петна. Това е достатъчна информация за проектиране на здравословна светлинна среда.

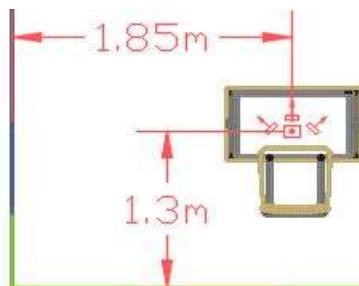
2.1.1 Описание на системата за измерване на естествена осветеност

В настоящото изследване е включено едно помещение със западно географско изложение и странично разположени прозорци за естествено осветление показано на Фигура 2. 1 Изследвано помещение



Фигура 2. 1 Изследвано помещение

В него е разположена система за измерване на хоризонтална осветеност – в три точки в дълбочина на помещението, разположени на най-задния ред работни места и измерване на вертикална осветеност за три ъгъла на наблюдение (напред и на 45 градуса наляво и надясно) на нивото на човешкото око (1.25 м) при седнал наблюдател Фигура 2. 2 Разположение на сензорите



Фигура 2. 2 Разположение на сензорите

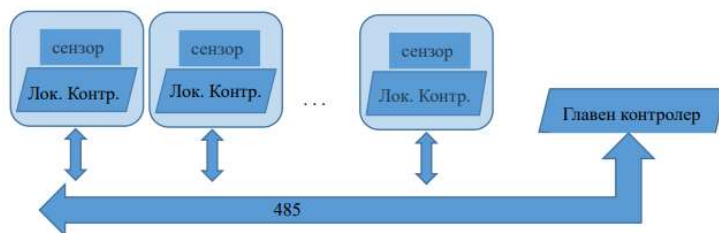
Вертикалната и хоризонтална осветеност се заснемат с калибрани сензори с косинусна корекция. Разглежданото помещение е с:

- бели стени (коефициент на отражение $\rho=0.686$);

- Коефициентите на отражение на повърхностите в помещението са измерени със специализиран ColorStriker. Изкуственото осветление е изпълнено с луминесцентни лампи Т8, монтирани по 4 в тели с двойно параболична огледална решетка. Заснемането на гореизброените стойности на дневната осветеност става на всеки 5 минути. Целта на изследването е измерване на хоризонтални и вертикални светлотни интензитети в помещения с различно географско изложение за период от десет години. С помощта на тази информация могат да бъдат определени средни стойности на показателя фактор на дневната осветеност (ФЕО), както и на отношението Еверт/Ехор като количествен и качествен индикатор за оценка на дневната осветеност.

```
graph LR; A[сенсоры] --> B[/управление/]; B --> C[Потребительский интерфейс]; B <--> D[(База данни)];
```

Особено внимание е обърнато на управлението на сензорите. Спецификата на задачата изисква да се събират данни от множество сензори, резултатите от които да се съхраняват в обща база данни.



Сензорите са свързани към локални контролери, които осъществяват комуникация с тях в рамките на една платка. Събирането на данните от главния контролер става чрез комуникация с локалните контролери и позволява избор на подходящ протокол, който да гарантира необходимата надеждност. Тази конфигурация позволява сканиране на нивата на осветеност в различни точки от помещението и различни направления във вертикалната и хоризонтална плоскости. Всеки главен контролер позволява свързването на 8 сензора, като при това гарантира запис на стойностите на осветеността, измерени през 5 минутни интервали в продължение на три години. Данните позволят точно оценяване на нивата на естествена осветеност, дори при промяна на метеорологичните условия и оптимално управление на изкуственото осветление

Захранването е реализирано по класическа трансформаторна схема, която осигурява висока надеждност. Полученото от изправителя напрежение +12V се подава на входа на понижавания

импулсен преобразувател, реализиран с U1. Така се осигурява стабилно напрежение +5V, което захранва чипа U2, поддържащ работата на акумулаторната батерия.

От стабилизирания напрежение +5V се захранва допълнителен инвертиращ импулсен преобразувател, реализиран с U4. От него се получава отрицателно напрежение -3,3V, необходимо за работата на LCD индикатора.

Напрежението на батерията не е стабилно, а се изменя в приблизителен диапазон 3,6-4,3 V. Затова напрежението на батерията се подава на входа на линеен стабилизатор, реализиран с U3, от който се получава стабилизирано напрежение +3,3V, на което работят чиповете от процесорния модул.

Процесорен модул – поддържа комуникацията със свързаните към него сензори, комуникация с компютър през USB, съхранение на данните в енергонезависима памет и поддръжка на локален потребителски интерфейс за визуализация и настройка – LCD и бутони за настройка.

Сърцето на схемата е едночиповия компютър PIC18F45K80. Избран е основно заради богатия набор от комуникационни портове, които предлага. Първият асинхронен комуникационен порт се използва за връзка със сензорните платки по интерфейс 485, осигурен чрез интерфейския чип U5. Вторият асинхронен комуникационен порт се използва за връзка с USB контролера U4, чрез който се осигурява връзка с компютър. Тя се използва за четене на резултатите, както и за настройка на режимите на главния контролер.

Показанията на сензорните платки се четат по зададен в програмата график и резултатите се запамятват в енергонезависимата памет U2. При свързване на не повече от 8 сензорни платки към един контролер, паметта позволява съхранение на всички измервания през светлата част на денонощието за три години (при условие, че се измерва през 5 минутни интервали). Връзката с паметта се осъществява посредством SPI интерфейс. Към същият интерфейс е свързан и часовник за реално време интерфейс. Към същият интерфейс е свързан и часовникът за реално време U3.

Сензори. Всички сензори са изпълнени по еднотипна схема. Различават се само софтуерно по зададените адреси, уникални за всеки сензор. Самият светлинен сензор BH1721 се управлява от локален процесор. Процесорът поддържа комуникацията с главния контролер по протокол 485.

2.2 Анализ на съществуващите критерии за оценка на количеството и качеството на постъпващата в помещения дневна естествена светлина

С цел изпълнение на задачата за обработка на получените от автоматизираната система за измерване на хоризонтална и вертикална осветеност в сградни пространства е направен литературен обзор на методите за оценка и определяне на качеството на дневната естествена светлина и приложението им за конкретните експериментални изследвания, извършени в ТУ – София. Целта на изследването е да се отговори на три основни въпроса а именно:

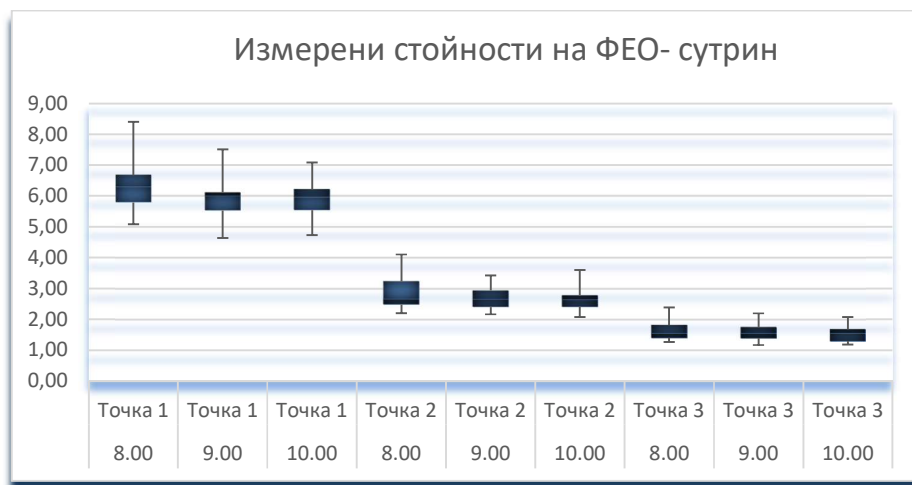
- Какви са преимуществата на дневната естествена светлина?
- Кои характеристики на естествената светлина оказват влияние върху методите за оценка на качеството ѝ?
- Какви изчислителни методи и методи за оценка на качеството на дневното естествено осветление съществуват и служат за изучаването му.

На базата на направения литературен обзор са намерени отговори на гореизброените въпроси, като основно е достиганто до извода, че най-устойчив показател за качествена оценка на дневното естествено осветление е отношението **Еверт/Ехор**, като количествен показател е избрано да бъде изследван показателя фактор на естественото осветление.

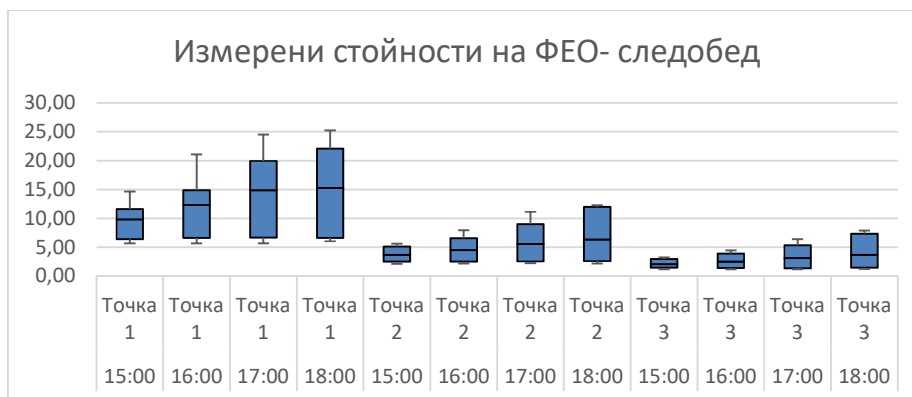
2.3. Статистическа обработка на получените данни за показателя ФЕО

Факторът на естествено осветление представлява отношение на хоризонталната осветеност в дадена точка от работната повърхност и външната естествена осветеност в същия момент. Стойността на този фактор зависи от измерените стойности на осветеността в различните точки от разглежданото помещение. С цел достоверност и представителност на получените по експериментален път резултати за осветеността в разглежданото помещение е направен описателен статистически анализ, като са определени основни величини: средна стойност, мода, медиана, стандартно отклонение. В статистиката средната стойност има две свързани значения: аритметично средно (и нейните различни геометрично средно или хармонично средно) и очакваната стойност на една случайна променлива, която още се нарича средно на популацията (генералната съвкупност).

Средната стойност често се бърка с медианата или модата. В нормалното разпределение на числата тези три стойности се сливат, но при изкривените разпределения средното се различава от средата (медианата) или от най-много срещаната стойност (модата). Стандартното отклонение е мярка на дисперсията на група от стойности. То може да се прилага при вероятностно разпределение, случайни променливи, популация или за комплекс от стойности. Представява числова величина, която също като дисперсията отразява разсейването на множеството от наблюдения около средното.



Фигура 2. 4 Измерените стойности на ФЕО- сутрин



Фигура 2. 5 Измерените стойности на ФЕО- следобед

2.4. Анализ на получените резултати

С помощта на реализираната система за измерване на осветеност са получени статистически значими данни за характера на изменение на дневната естествена осветеност в помещения, в зависимост от размера и географската ориентация на светлинните отвори, облачността, положението на контролната точка в помещението, сезона и времето от деня. Извършено е едногодишно заснемане на изменението на ФЕО в помещението. Получена е по-подробна информация за начина на проникване и промяна в годишен план на естествената светлина. Извършена е статистическа обработка на получените по експериментален път данни и направена визуализация чрез боксплот диаграми, на които се вижда характера на изменение на ФЕО по часове в годишен план за експерименталното помещение.

Глава 3 Оценка на качествените показатели на дневното естествено осветление

3.1. Фактори, оказващи влияние върху качеството на естественото осветление

Целта на доброто осветление е да отговаря както на изпълняваната зрителна задача, така и на индивидуалните биологични нужди на наблюдателите. Основни фактори, оказващи влияние върху качеството на дневното естествено осветление са: заслепяване от естествена светлина, яркостно отношение или яркостен контраст, цвето предаване, зрителни смущения, невизуално влияние на светлината.

3.2. Изследване на количествени и качествени показатели на дневното естествено осветление за България

В настоящата дисертация като критерии за количествена и качествена оценка на дневното естествено осветление са съблюдавани отношението на вертикална към хоризонтална осветеност в характерни точки от помещението и възможността за заслепяване на наблюдателите.

3.2.1. Експериментално изследване на отношението ВХ

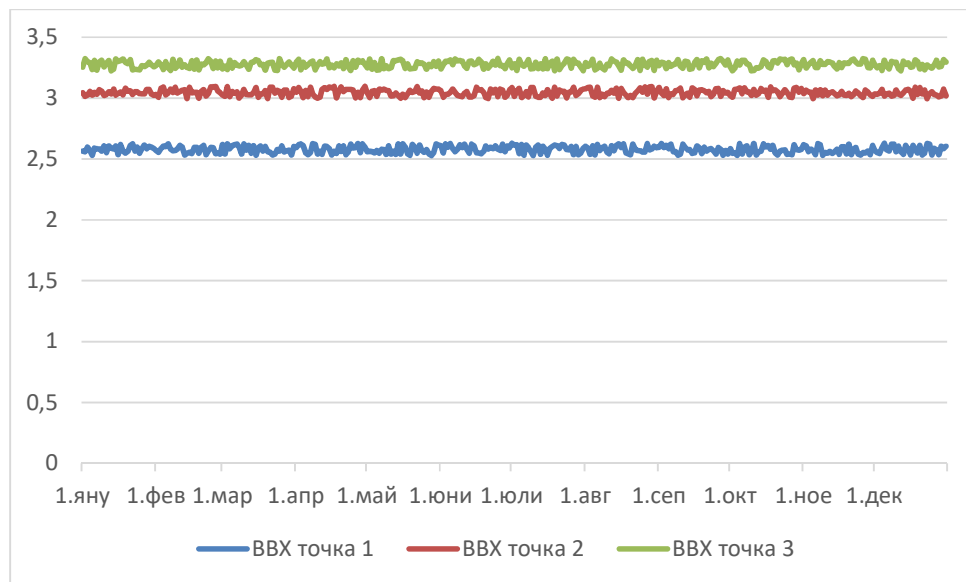
Необходимостта от индикатори за оценка на осветлението, различни от външна хоризонтална и вътрешна хоризонтална осветеност при дифузно осветление води до множество изследвания. От всички тях в настоящата дисертация е изследвано отношението на вертикалната осветеност и хоризонталната такава на дадено работно място (ВХ). В изследването са включени измервания на вертикалната осветеност на 45 градуса наляво и надясно спрямо зрителната ос на наблюдател при ляво странично естествено осветление. Направено е и измерване на вертикалната осветеност по посока на зрителната ос на наблюдател, гледащ в права посока. Показано е предимството на отношението ВХ, като показател за оценка на естественото осветление спрямо ФЕО. Критериите за оценка на двата показателя са: стабилност на показателите при различно състояние на атмосферата (има се предвид, че вариациите, които се получават в стойността на параметъра носят полезна информация, за разлика от моментните вариации на ФЕО при определянето му при дифузна облачност); използване на показателя ВХ при оценка на осветеността при интегрално – естествено и изкуствено осветление; получена информация, включително условия за заслепяване, яркостен контраст и пространствени отражения.

С цел възможност за сравнителен анализ на отношението ВХ с ФЕО, последният показател е определен за различни атмосферни условия – дифузна облачност, ясно и смесено небе. За да бъде оценката на отношенията на осветеностите по-обширна, следните величини също са определени на базата на измерените величини и оценени по отношение на тяхната стабилност.

$$BBX = (E_{vc45} + E_{vю45} + E_0) / E_x \quad (3.1)$$

където E_x е осветеността на работната повърхност, E_{vc45} е осветеността на вертикална равнина, в посока на 45 градуса от вътрешната стена на помещението, измерена в същата точка като E_x , $E_{vю45}$ е осветеността на вертикална равнина, в посока на 45 градуса от прозореца, измерена в същата точка като E_x . Резултатите за помещението са дадени на Фигура 3.1.

За тестовото помещение – учебна лаборатория са определени отношенията ВХ, като вертикалната осветеност е измервана при различни ъгли на наблюдение, както е описано по-горе. Обърнато е внимание на отношението $BBX = (E_{vc45} + E_{vю45} + E_0) / E_x$. Тази ориентация на наблюдателя е от особено значение, тъй като се очаква, че наблюдателите ще гледат напред през голяма част от времето.



Фигура 3. 1 Измерване на BBX в годишен период

За оценка на непостоянството на показателите на естественото осветление се използва формулата:

$$\text{Непостоянство} = \text{Средно BBX} / \text{среден ФЕО}. \quad (3.1)$$

Средни стойности на BBX по месеци, , средни стойности на ФЕО по месеци и неопределеността е показана в Таблица 3. 1

Таблица 3. 1 Средни стойности на BBX по месеци

	Средни стойности на BBX по месеци			Средни стойности на ФЕО по месеци			BBX/ФЕО по месеци		
	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 1	Точка 2	Точка 3
Януари	2,58	3,04	3,28	7,09	3,18	1,71	0,36	0,96	1,92
Февруари	2,58	3,05	3,27	6,66	2,94	1,7	0,39	1,04	1,92
Март	2,58	3,04	3,27	6,38	3,04	1,66	0,4	1	1,97
Април	2,59	3,06	3,28	6,25	2,74	1,71	0,41	1,12	1,91
Май	2,56	3,05	3,28	6,4	2,61	1,75	0,4	1,17	1,87
Юни	2,59	3,04	3,28	6,3	2,63	1,6	0,41	1,16	2,05
Юли	2,59	3,05	3,28	6,36	2,75	1,65	0,41	1,11	1,99
Август	2,58	3,04	3,27	6,63	2,75	1,59	0,39	1,11	2,07
Септември	2,58	3,05	3,29	6,26	2,96	1,75	0,41	1,03	1,88
Октомври	2,57	3,05	3,28	6,38	2,84	1,62	0,4	1,08	2,02
Ноември	2,56	3,04	3,29	6,48	2,84	1,76	0,39	1,07	1,87
Декември	2,58	3,03	3,27	6,39	3,25	1,77	0,4	0,93	1,85

3.2.2 Изследване на показателя заслепяване от естествено осветление на базата на получени експериментални данни за отношението BX

Широко използван показател за оценка на заслепяването от естествена светлина е Daylight Glare Index (DGI), предложен от Хопкинсън през 1970

$$DGI = 10 \log \sum_{i=1}^n G_i \quad (3.2)$$

където:

$$G_i = 0.478 \left(\frac{L_s^{1.6} \Omega_i^{0.8}}{L_b + (0.07 \omega^{0.5} L_w)} \right) \quad (3.3)$$

В уравнение (3.3) L_s е яркостта на всички части на източника, cd/m^2 ; L_b е средната яркост на повърхностите, попадащи в зрителното поле, cd/m^2 , L_w е претеглената средна яркост на прозореца,

като функция на относителната площ на небето, обструкциите и земята, които се виждат, ω е пространствен ъгъл под който се вижда прозореца, σ , Ω е пространствен ъгъл на източника в зависимост от посоката на зрителната ос и позиционния фактор, σ . Оценката на заслепяването по този показател става според долната таблица:

Таблица 3. 2 Оценка на заслепяването посредством показателя DGI

Субективна оценка	DGI
Неосезаемо заслепяване	<18
Осезаемо заслепяване	18-24
Смущаващо заслепяване	24-31
Нетърпимо заслепяване	>31

Най – съвременният показател за оценка на заслепяването от естествено осветление е Daylight Glare Probability (DGP)

$$DGP = 5,87 \cdot 10^{-5} E_v + 9,18 \cdot 10^{-2} \cdot \log \left(1 + \sum_{i=1}^n \frac{L_{s,i}^2 \omega_{s,i}}{E_v^{1.87} + p_{s,i}^2} \right) + 0.16 \quad (3.4)$$

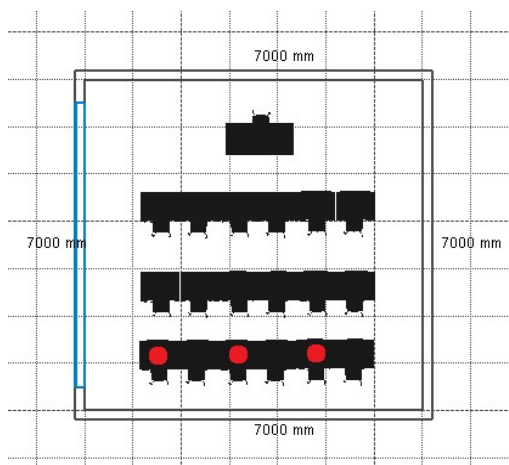
където E_v е вертикална осветеност на нивото на око, lx ; $L_{s,i}$ е яркост на източника, cd/m^2 , ω_s – пространствен ъгъл, под който се вижда източника; $p_{s,i}$, позиционен индекс

Таблица 3. 3 Оценка на заслепяването посредством показателя DGP Субективна оценка

	DGP
Неосезаемо заслепяване	<0.35
Осезаемо заслепяване	0.35-0.4
Смущаващо заслепяване	0.4-0.45
Нетърпимо заслепяване	>0.45

Геометрия на експерименталното помещение

За оценка на заслепяването е използвано описаното експериментално помещение Фигура 3. 2.

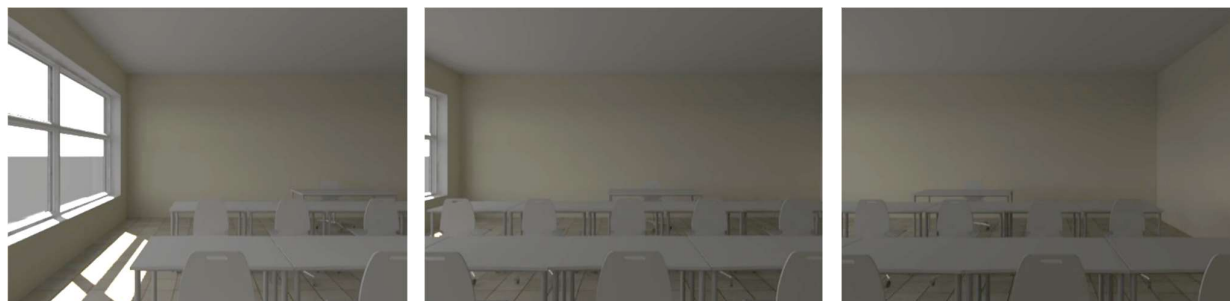


Фигура 3. 2 Геометрия на изследваното помещение

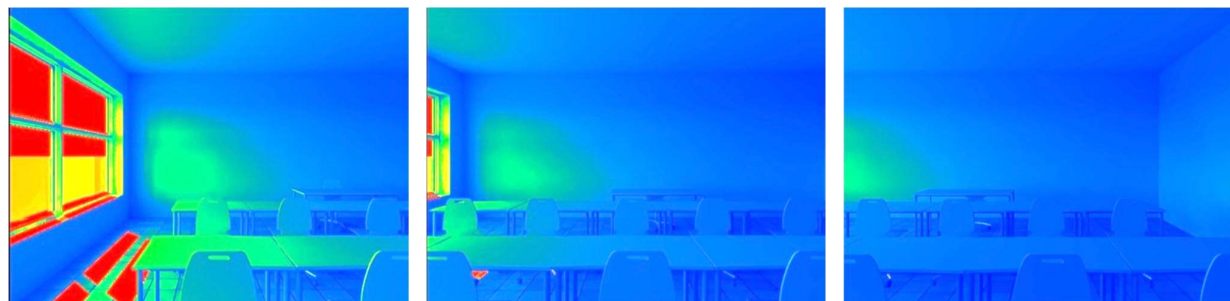
Изчислителна процедура за определяне на заслепяването от естествена светлина в разглежданото помещение

За определяне на яркостите в помещението е използван софтуер „VELUX Daylight Visualizer“. За определяне на стойностите на вертикалната осветеност в разглежданото помещение са използвани

експериментални данни, получени от автоматична система за измерване на хоризонтална и вертикална осветеност на отбелязаните на Фигура 3. 2 работни места. Изготвени са симулационни модели за наличието на заслепяване в годишен план, като са взети под внимание часовете, в които са получени големи разлики в стойностите на отношението ВХ спрямо относително постоянните такива. Тъй като експериментални данни за ВХ и хоризонталната осветеност вътре и навън са налични само за помещение със западно географско изложение, данни за помещенията със източно, южно и северно изложение са получени само от симулационния софтуер, който съдържа и база данни за промяната на естествената осветеност навън за района на град София. Изчисленията за определяне на заслепяването от дневната светлина представени по-долу се отнасят за слънчев ден през месеца, в който яркостта на небосвода е най- голяма - Август. Използван е стандартен наблюдател с височина на зрителната ос 1,2м от нивото на пода. На Фигура 3. 3 е показан симулационен модел на зрителната задача за трите работни места, за които са извършени изчисленията. На Фигура 3. 4 са показани симулираните яркости, които влизат във Фигура 3. 3 и Фигура 3. 4 се отнасят за южна ориентация на прозорците.



Фигура 3. 3 Нормален изглед от работните места за ориентация на прозорците юг



Фигура 3. 4 Изглед на яркостите отчетени от работните места

Снети са резултати за яркостта на прозоречните площи за четирите ориентации и са показани на Фигура 3. 3, като позиция едно е най- близката до прозорците.

Таблица 3. 4 Яркост на прозорците

	Яркоти на прозорците cd/m2			
	Изток	Запад	Север	Юг
позиция 1	1653	2000	1611	3358
позиция 2	1954	1983	842	3467
позиция 3	0	0	0	0

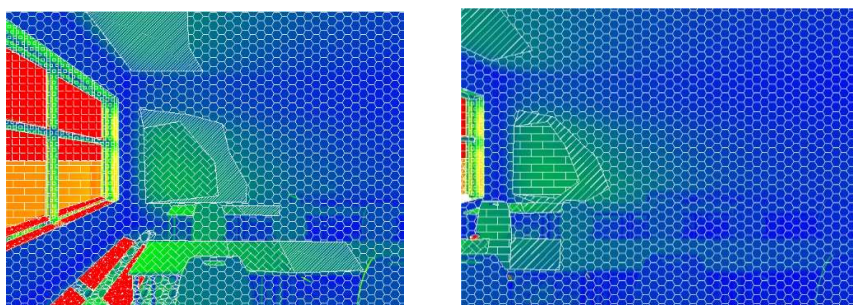
Измерена вертикална осветеност на височината на погледа (1,2м от пода) за трите работни места е показана на Фигура 3. 4.

Таблица 3. 5 Стойности на вертикалните осветености

	Вертикалната осветеност lx			
	Изток	Запад	Север	Юг
позиция 1	640	850	640	1100
позиция 2	381	490	405	560
позиция 3	232	290	250	300

Оценка на заслепяването

За извършване на оценка на заслепяването от естествена светлина е необходимо да се изчисли средната яркост на повърхностите, попадащи в зрителното поле. За целта, изображението на симулационния модел, се разделя на равноркостни повърхности Фигура 3. 5



Фигура 3. 5 Разделяне на симулационния модел на равноркостни повърхности

Колкото е по- голяма една повърхност, с толкова по-голям тегловния коефициент участва в изчислението на яркостта на обкръжението L_b .

Заслепяването от естествената светлина по метода, използващ индекс (DGI) е определено по формули (3.2) и (3.3) и получените резултати са систематизирани вТаблица 3. 6

Таблица 3. 6 Заслепяване от естествена светлина

	Стойност на DGI			
	Изток	Запад	Север	Юг
позиция 1	16,9	17,4	16,8	18,7
позиция 2	8,1	8,2	5,9	9,6
позиция 3	0	0	0	0

За оценка на заслепяването от естествено осветление е приложен и метода DGP (Daylight Glare Probability), използвана е формула (3). Резултатите са представени в Таблица 3. 7

Таблица 3. 7 Стойности на заслепяването от естествено осветление

	Стойност на DGP			
	Изток	Запад	Север	Юг
позиция 1	0,245	0,254	0,244	0,284
позиция 2	0,191	0,195	0,185	0,205
позиция 3	0	0	0	0

От направените изчисления за наличието на заслепяване от дневната естествена светлина за помещения с различна географска ориентация в гр. София се вижда, че при използване на метод за заслепяването от естествена светлина (DGI), единствено при прозорци ориентирани на юг съществува осезаемо заслепяване, което е на границата с неосезаемото. При използване на по-съвременния метод

за оценка на заслепяването от естествено осветление (DGP) резултатите за четирите разглеждани помещения попадат в графата неосезаемо заслепяване. Вероятната причина за това е, че при оценка на заслепяването посредством показателя DGP са използвани резултатите от съвременни научни изследвания, показващи, че поради характера на дневното естествено осветление, човек толерира много високи нива на яркост в зрителното си поле, без да почувства осезаем дискомфорт или намаляване на остротата на зрението си, поради физиологично заслепяване.

Направени са изчисления за DGP при най- висока външна осветеност- 13 часа на 21-во число от месеца Таблица 3. 8

Таблица 3. 8 Получени стойности за DGP

	Стойност на DGP			
	Изток	Запад	Север	Юг
Януари	0.261	0.685	0.260	0.747
Февруари	0.284	0.709	0.282	0.744
Март	0.338	0.716	0.336	0.730
Април	0.341	0.743	0.338	0.756
Май	0.329	0.757	0.327	0.768
Юни	0.321	0.761	0.320	0.768
Юли	0.348	0.758	0.345	0.768
Август	0.336	0.746	0.332	0.763
Септември	0.339	0.720	0.334	0.708
Октомври	0.321	0.704	0.318	0.731
Ноември	0.280	0.694	0.272	0.746
Декември	0.258	0.686	0.257	0.747

От направените изчисления се вижда, че най- високи заслепявания с използване на метод DGP има при южно изложение.

3.3. Анализ на резултатите

В глава 3 от дисертацията са изследвани показателите за качество на дневното естествено осветление. Значително внимание е отделено на заслепяването от естествена светлина и посредством изчислителни, експериментални и симулационни резултати е установено, че поради спецификата на полажението на България на земното кълбо и положението на слънцето през различните сезони (високо през летните месеци и ниско през зимата) в закрити помещения с характерна за страната архитектура (по отношение на височината на сградите) няма продължителни периоди от време, през които показателите за оценка на заслепяването имат недопустимо високи стойности.

На базата на получените резултати от тригодишно измерване на хоризонтална и вертикална осветеност е установено, че отношението на вертикалната и хоризонталната осветеност в точката на измерване, независимо от посоката на насочване на сензорите за вертикална осветеност остава приблизително еднакво в денонощен и годишен план. Разлики в това отношение се получават единствено при попадане на пряка слънчева светлина върхо сензорите. Стабилността на показателя вертикална към хоризонтална осветеност и възможността за използването му за количествена и качествена оценка на светлинната среда в сградите.

Глава 4 Симулационни програми за определяне на количествени и качествени показатели на дневното естествено осветление и оценка на тяхната достоверност.

4.1. Компютърни методи за оценка на естествената светлина

Съществуват много инструменти за оценка или измерване на светлинните нива във вътрешни пространства. Използват се програми за светлинни симулации за изчисляване на нивата на естествена осветеност в новостроящи се сгради. Такива са Dialux, Relux, Velux Daylight Visualizer, Radiance, Daysim, Ecotect и др. Тези програми имат недостатъка, че не включват възможността за анализ на гледката навън и визуалните качества на прозорците. Преди бързото развитие на компютърните технологии, проектантите и изследователите са използвали числови методи, диаграми и/или таблици.

Светлинните симулации са компютърни симулации, които имат за цел да предвидят светлинната сцена при дадена специфична ситуация на осветление с естествена светлина. Разработени са множество програми, които дават възможност за извършване на светлинни симулации в зависимост от спецификата на естественото осветление. Като входни данни, тези програми използват информация за геометрията на сградата, свойствата на повърхностите и преобладаващото състояние на атмосферата. Като резултат се получава информация за осветеностите в помещенията и/или яркостите на повърхностите.

Алгоритми за светлинни симулации

Четири най-разпространени алгоритми за светлинни симулации са:

1. Директно изчисление;
2. Радиосити (radiosity);
3. Проследяване на лъчите или рей трейсинг (ray tracing);
4. Проследяване на фотоните (photon mapping).

Директно изчисление се използва за симулация на светлината, която идва директно от светлинните източници – естествени или електрически. Директно изчисление се прилага в повечето случаи в програми, които вземат под внимание изкуствената светлина, тъй като заложените в тях алгоритми изключват дифузната компонента от небосвода. В Европа най-широко разпространените програми за светотехнически изчисления са RELUX и DIALUX. И двете програми използват директни изчисления за симулация на светлината, излъчвана от светлинните източници.

В програмата Dialux има вграден и RadiCal софтуер, който използва радиосити метода за изчисляване на индиректната съставка на осветеността на повърхностите в помещенията. Радиосити метода е разработен през 1984г. и се основава на принципите за съхранение на енергията, адаптирани от принципите за пренос на топлина към светлинни симулации. Методът се основава на разпространение на светлина посредством оценка на видимостта и при него се приема, че всички повърхности отразяват светлината дифузно. Методът не зависи от положението на наблюдателя в помещението, което означава, че разпространението на светлина се изчислява за всяка точка от помещението, а не само за точките, които са видими за наблюдателите.

Програмата Relux Suite има вградена рей-трейсинг процедура, която използва симулационен софтуер Radiance. Когато дадена светлинна сцена се описва с рей-трейсинг процедура, векторите на интензитета на светлината се проследяват от точката на наблюдение към източника. По този начин рей трейсинга е зависим от положението на наблюдателя алгоритъм. Той е предложен от Уитед през 1980год. и в чист вид представлява детерминистичен алгоритъм, което означава, че при всяка следваща симулация се получава един и същ резултат. В първоначалният си вид алгоритъмът включва само идеално огледално отражение на лъчите. В Radiance рей-трейсинг алгоритъмът използва както детерминистичен похват, така и стохастичен, при който светлинните лъчи се насочват в случайно подбрани посоки. Това позволява на софтуерът да дава симулационни резултати както за огледални, така и за дифузни взаимодействия.

Друг метод за светлинна симулация представлява проследяването на фотоните, създаден от Йенсен през 1995. Този метод включва двупосочен алгоритъм, който проследява разпространението на светлинните лъчи, както от светлинните източници, така и от точката на наблюдение. В първата стъпка фотоните се проследяват от източниците на светлина към околното пространство. Тези фотони

са преносители на светлинния поток и се улавят в информационна структура, наречена фотонна карта. На втората стъпка се генерира изображение с използване на информацията от фотонната карта. Този алгоритъм се използва в програма VELUX Daylight Visualizer. Това е програма, която се фокусира основно върху естественото осветление.

Количеството естествена светлина, което попада на повърхностите в дадено помещение, зависи от тяхната геометрия, материалът от който са изработени, както и от яркостното разпределение на небосвода. В публикация CIE 2003 МКО дефинира 15 стандартни типа небосвод, вариращи от плътна облачност до ясно небе.

За изчисление на естествена осветеност в помещения DIALUX използва три от дефинираните от МКО типа небосвод – облачно, ясно и средно небе, като тези типове небосвод са описани посредством тяхното яркостно разпределение – a, b, c.

За симулация на естествената осветеност в Relux се използват четири от петнадесетте типа стандартно небе – ясно, облачно, междинно, и с равномерна облачност.

В програма Velux Daylight Visualizer могат да бъдат зададени всичките 15 типа небосвод.

Нивото на естествената осветеност в софтуерните симулации, най-често се оценява посредством метода на статистически определен КЕО, комбиниран с кумулативно разпределение на естествената светлина. Оценката за КЕО реално представлява моментна оценка на условията за естествена осветеност, в която са изключени фактори като климат, ориентация на сградата и наличие на пряка слънчева светлина. През последния век множество изследвания в областта на естественото осветление описват недостатъците на този метод, но въпреки това КЕО се използва все още широко и е залегнал в редица национални стандарти. Според някои учени причина за това е неговата простота, а не капацитетът му да описва реалните условия на естествено осветление. В своите разработки редица учени демонстрират използването на принципа на базирано на климата моделиране на дневната светлина. При този принцип се „предсказват“ величини като облъченост, осветеност, лъчиста яркост, яркост, с използване на статистически метеорологични данни от типа DRY.

Моделиране на системата и симулации: компютърните симулации на енергийна ефективност в сгради доказват своята полезност при анализ на естествената светлина. Приложенията, който поддържат детайлни симулации на енергийното представяне, сградите включват множество математически модели, които количествено отговарят на въпроса как всеки компонент на системата работи при конкретен набор от условия. Те се превръщат в широко разпространен метод и са особено полезни на етап проектиране на обществени сгради.

4.2. Оценка на корелацията между получените по експериментален път резултати за ФЕО и КЕО, получени посредством използване на софтуерни програми Velux Daylight Visualizer, Dialux, Relux Suite, Andrew Marsh Dynamic Daylight Analysis.

Целта на настоящата глава от дисертацията е да се направи сравнение на получените по изчислителен път (чрез симулации) резултати за характера на изменение на естествената осветеност и тези, получени на базата на проведения експеримент. Софтуерните програми имат възможност за оценка на естествената осветеност в помещения, но е важно да се отчете и точността на симулационните модели и факта, че те могат да бъдат повлияни от редица фактори като: метод за изчисление, модел на небосвода, модел на помещението и сградата, в която се намира, характеристики на повърхностите, човешки фактор.

Моделът на сградата и помещението е особено важен, тъй като може да повлияе значително качеството и точността на симулациите на дневната светлина. Важно е и отчитането на наличността на външни обструкции, тъй като те оказват влияние върху навлизащата в помещенията естествена светлина. Свойствата на материалите, от които са изработени вътрешните повърхности като тип, отражателни способности, коефициенти на пропускане, също оказват влияние върху преразпределението на естествената осветеност в помещенията. От особено значение е моделирането на прозоречните площи и точното определяне на коефициентите на пропускане на стъклото.

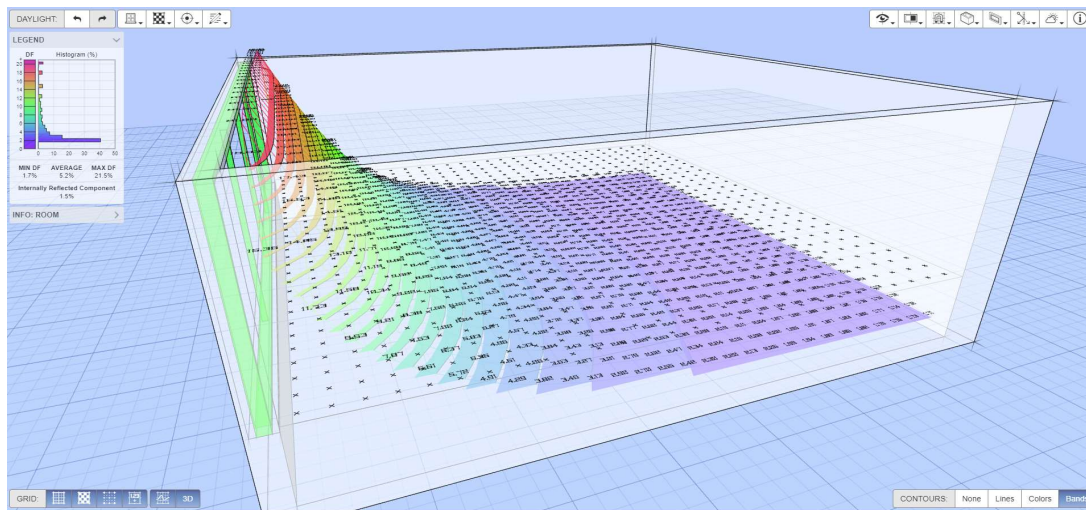
Събрани са експериментални данни за характера на изменение на дневната естествена светлина в едно помещение – учебна лаборатория номер 12307 и те са обработени, като за тях е изведена стойност на ФЕО в случай на слънчево, смесено и облачно небе (sunny, intermediate, overcast). Получените по експериментален път стойности за ФЕО в годишен план са сравнени с получени от

симулационни модели в различни софтуерни програми стойности за КЕО. Определена е корелационната зависимост между експерименталните данни и данните от симулационните модели.

Изводи за статистическата зависимост между две случайни величини, в случая получените по експериментален път стойности за КЕО и тези, установени посредством симулации, могат да се направят както въз основа на външния вид на построена диаграма на разсейване, така и по т.нар. коефициент на корелация. Той е число, което се изменя в границите от -1 до 1 и отразява степента на линейна статистическа зависимост между случайните величини. Неговата оценка се бележи с r , а изчисляването му става по формула:

$$r_{yz} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(z_i - \bar{z})}{(n-1)s_y s_z} \quad (4.1)$$

Разглежданото помещение е реално и при моделирането му са използвани отразителните характеристики на реалните повърхности, посочени в глава 2, както и коефициентите на пропускане на стъклопакетите, използвани за прозоречните площи ($\tau = 0,8$).



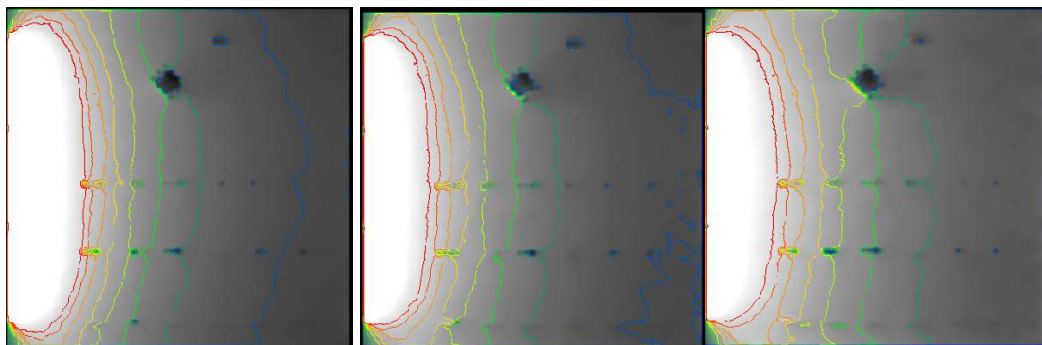
Фигура 4. 1 Изменение на КЕО в дълбочина на помещението

Симулационните резултати, които са получени имат следното съдържание:

Velux Daylight Visualizer

На Фигура 4. 2 е показана разликата на КЕО в изпитваното помещение, при различни видове небе. В първия случай е използвано стандартно облачно небе, във втория стандартно смесено небе и в последния случай- стандартно слънчево небе.

На е показан изработения за симулациите 3D модел на помещението.



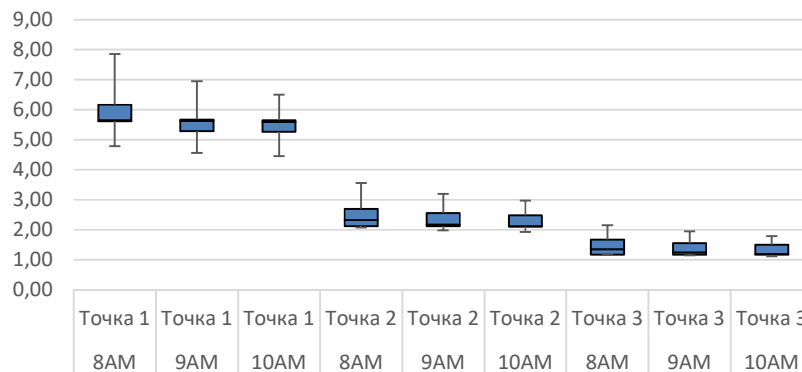
Фигура 4. 2 КЕО изчислено за месец Март 9 часа



Фигура 4. 3 Изглед отвътре на симулираното помещение

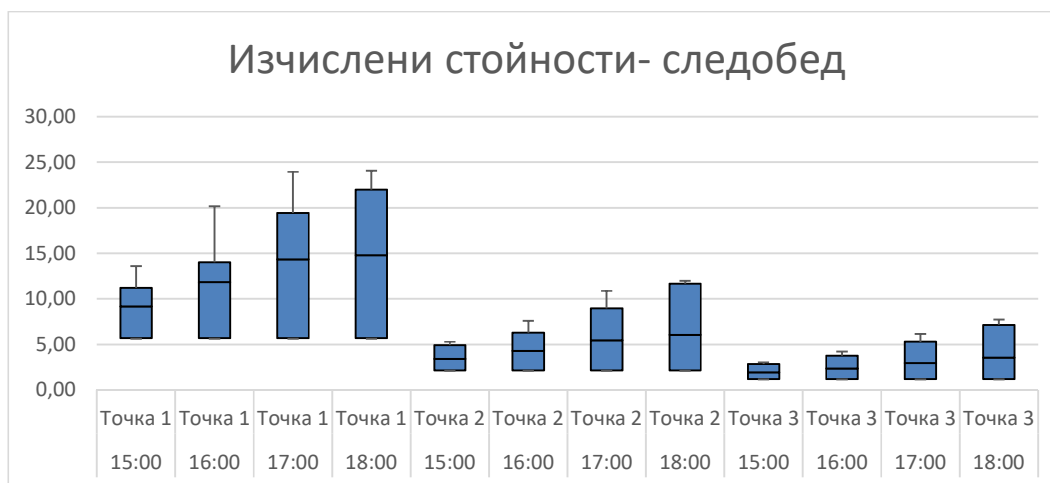
Данни от направените симулации чрез програма Velux показват измененията на КЕО по часове в различните месеци в измервателните точки Фигура 4. 4 и Фигура 4. 5.

Изчислени стойности- сутрин



Фигура 4. 4 Графично изображение на изчислените стойности на КЕО- сутрин

Изчислени стойности- следобед

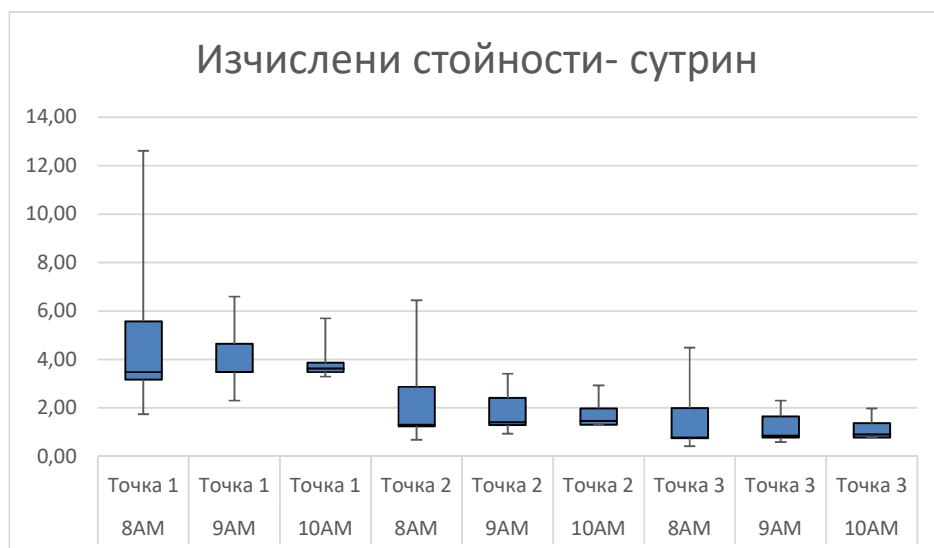


Фигура 4. 5 Графично изображение на изчислените стойности на КЕО- следобед

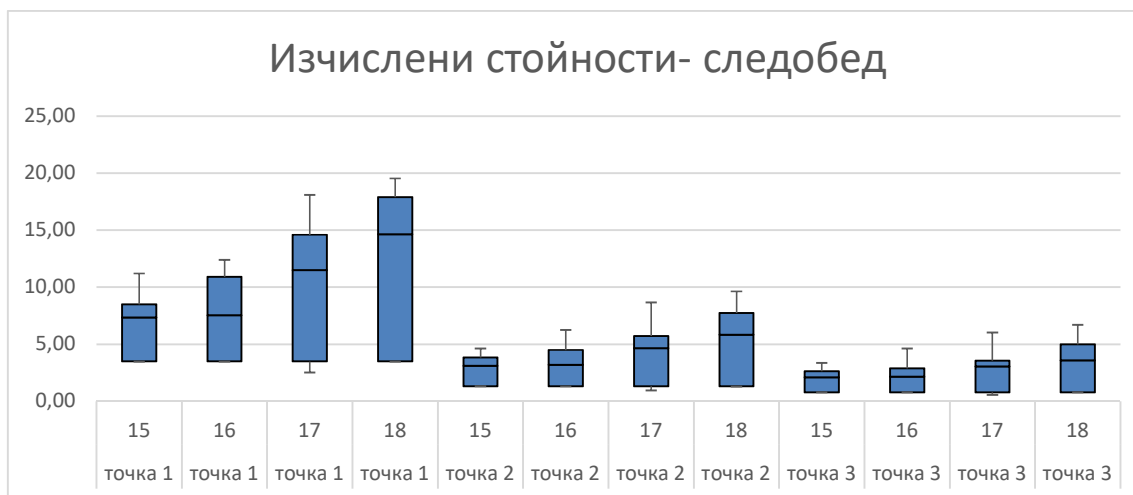
DIALux:



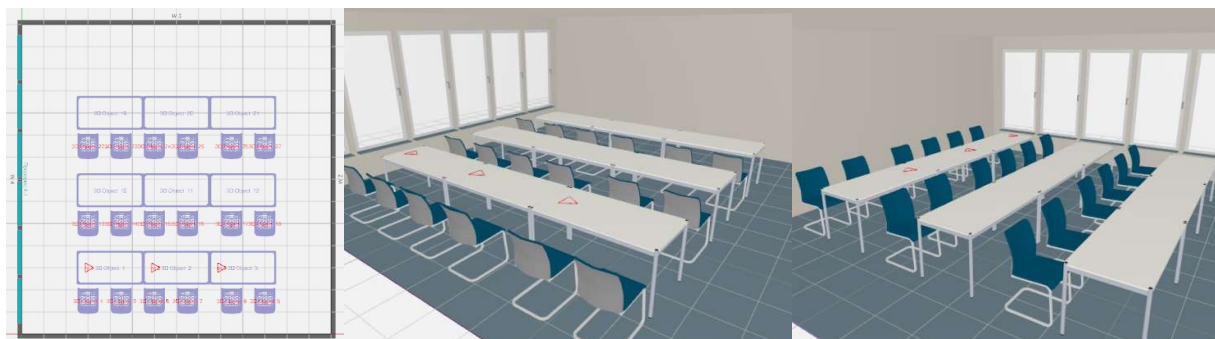
Фигура 4. 6 Изглед отвътре на симулираното помещение



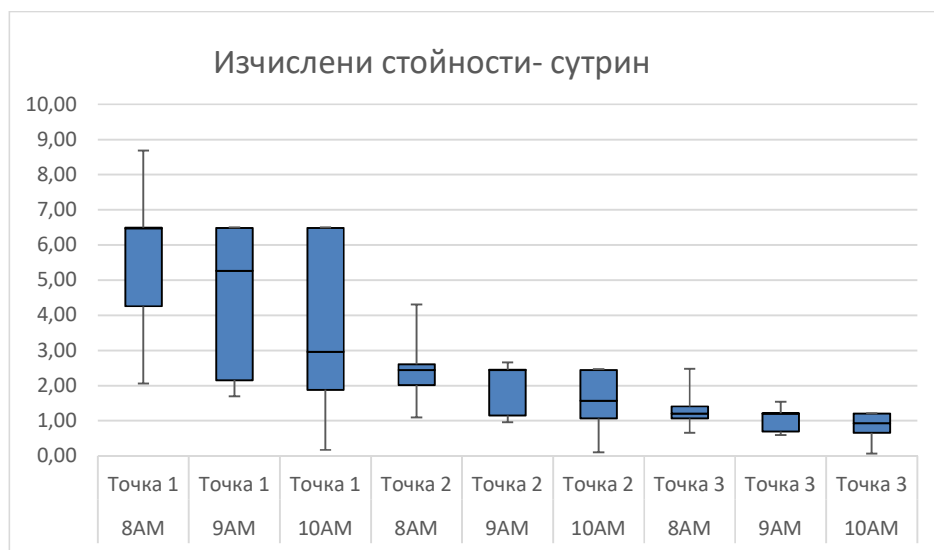
Фигура 4. 7 Графично изображение на изчислените стойности на КЕО- сутрин



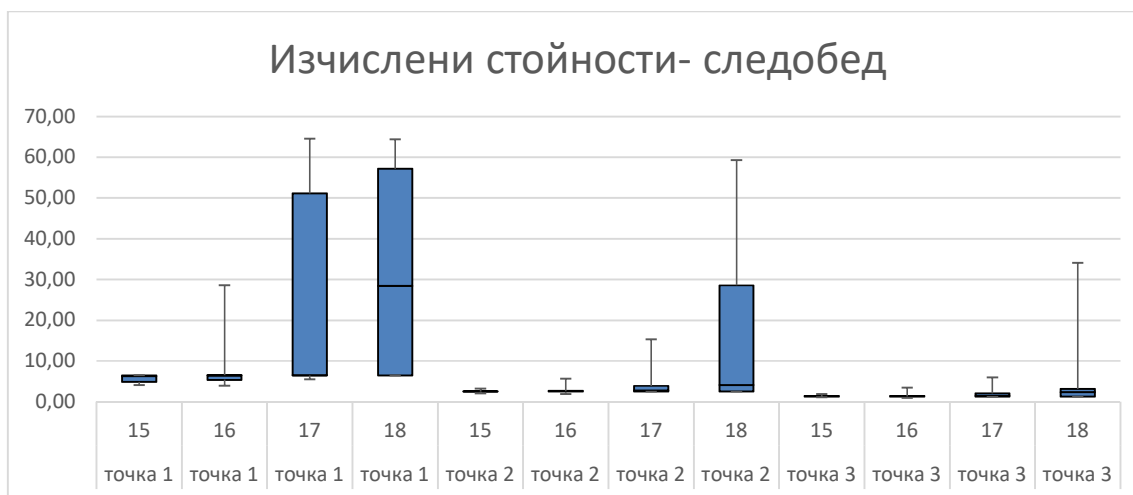
Фигура 4. 8 Графично изображение на изчислените стойности на КЕО- следобед



Фигура 4. 9 Изглед отвътре на симулираното помещение



Фигура 4. 10 Графично изображение на изчислените стойности на КЕО- сутрин



Фигура 4. 11 Графично изображение на изчислените стойности на КЕО- следобед

Изчислен е коефициента на корелация на Пийрсън между симулираните и получените по изчислителен път данни. Резултатите са представени в Таблица 4. 1

Таблица 4. 1 Коефициент на корелация на Пийрсън за измерените и изчислените данни

час от деня	позиция	Използвана програма		
		Velux	DIALux	Relux
8:00	точка 1	0,9488	0,4718	0,1929
9:00	точка 1	0,9375	0,2573	0,0166
10:00	точка 1	0,9148	0,1646	0,0111
15:00	точка 1	0,9892	0,4094	0,5185
16:00	точка 1	0,9249	0,3901	0,0024
17:00	точка 1	0,9477	0,6019	0,4643
18:00	точка 1	0,9677	0,8959	0,7946
8:00	точка 2	0,9514	0,6309	0,1295
9:00	точка 2	0,8468	0,5813	0,3947
10:00	точка 2	0,8048	0,5925	0,2596
15:00	точка 2	0,9862	0,4622	0,0068
16:00	точка 2	0,9342	0,5027	0,0447
17:00	точка 2	0,9582	0,6038	0,1118
18:00	точка 2	0,9984	0,9157	0,2874
8:00	точка 3	0,9517	0,7220	0,2262
9:00	точка 3	0,9174	0,6427	0,0772
10:00	точка 3	0,8480	0,6470	0,3927
15:00	точка 3	0,9637	0,5117	0,0432
16:00	точка 3	0,9134	0,5680	0,1339
17:00	точка 3	0,9382	0,6506	0,3070
18:00	точка 3	0,9591	0,9202	0,7372

4.3. Анализ на получените резултати

В настоящата глава от дисертационния труд са разработени 3Д модели с най- широко използваните програми за светлотехнически изчисления. За максимална точност, в моелите са заложени коефициентите на отражение на стените, тавана, пода, столовете и масите. Направени са изчисления, като се използват различни типове небе. След направените симулации, получените данни са представени таблично и под формата на боксплот диаграми. Определена е корелационната зависимост на получените по експериментален път резултати, за показателя фактор на естествено осветление и тези, получени посредством симулации. Получените коефициенти на корелация на експерименталните и симулационните резултати недвусмислено показват силна корелационна зависимост при използване на програма Velux Daylight Visualizer, докато при използване на програми като Dialux, Relux, Andrew Marsh, корелацията е по-слаба т.е получените резултати не съответстват достатъчно точно на експерименталните такива. Поради невъзможността, при проектиране на осветителната уредба, ФЕО да бъде измерен с точност, е най- подходящо да се използва програмен продукт Velux Daylight Visualizer.

Глава 5 Представяне на проблема за управление на осветлението с минимални разходи за електрическа енергия и максимално задоволяване на нуждите на потребителите с използване на генетични алгоритми

5.1. Оптимизация при проектиране на осветителни уредби

Настоящата работа е фокусирана върху използването на система за управление на осветлението, интегрираща максимално естествената светлина. За реализирането ѝ е използван еволюционен оптимизационен подход, като целта на оптимизацията е:

1. Да се подобри ефективността на осветлението още на етап проектиране т.е. да се заложи максимално използване на наличната естествена светлина;
2. Да се избере най-доброто от поредица оптимални или близки до оптималните решения, позволяващи на проектантите да изберат най-добър вариант за дадено приложение;
3. Да се реализира система за управление на осветлението, работеща по получено и избрано оптимално решение.

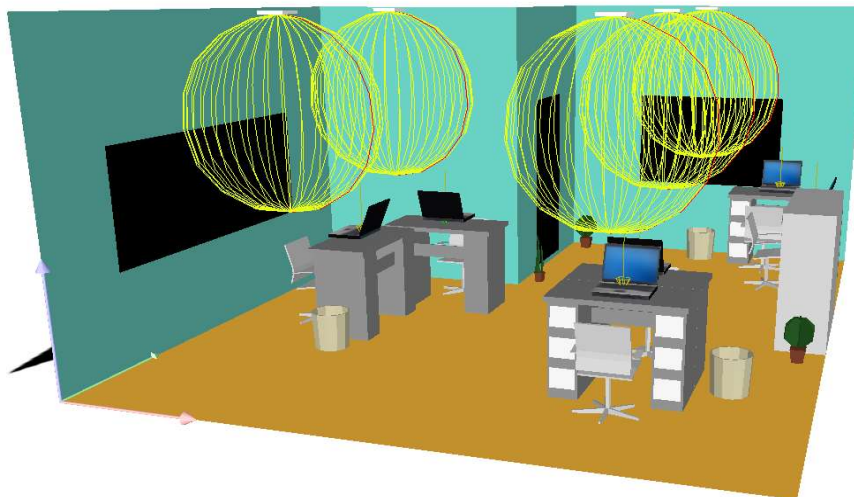
5.2. Оптимизационен алгоритъм за управление на електрическото осветление в сгради

5.2.1. Подход за управление на осветлението в сгради

В настоящата работа е предложен нов подход за управление на осветлението в зависимост от наличната естествена светлина. Управлението е базирано на оптимизация на режима на работа на осветителите в помещението, така че на работната повърхност винаги да се гарантира получаването на нормената осветеност при минимална консумация на електрическа енергия. Методът за управление, който е разгледан е вкл./изкл. на осветителите. Предложения алгоритъм за управление на осветлението в сгради има за цел минимизацията на общата консумация на електрическа енергия за осветление без да се прави компромис с предписанията на европейските норми. Физическата реализация на системата е лесна и нискостойностна – тя включва контролери и сензори за измерване на осветеност. Алгоритъмът на управление на осветлението е разработен като проблем на линейното програмиране. Той е базиран на генетичен алгоритъм, чиято целева функция е минимум разход на електрическа енергия за осветление. В алгоритъмът са заложили и резултатите от експериментални изследвания на естествената осветеност в България, описани в глава 2. Алгоритъмът предвижда индивидуално управление на всеки осветител от разглежданото помещение – или посредством димиране или посредством включване/изключване.

За да може да се анализира възможната икономия на енергия посредством сравнение между планов разход на енергия при теоретична работа на системата за управление и при реалната ѝ експлоатация, при решаване на оптимизационната задача е разгледано помещение със същата конфигурация като помещението, в което е внедрена разработената система. То представлява офис, разположен на територията на град София Площта на пода на помещението е 26 m², височината му е 2.8m. Прозоречните площи са с обща площ 5.44 m², като тази площ се разделя на два прозореца и една врата, съответно единият от прозорците е с южно изложение и размери 1.5x1.0m, вторият прозорец е с размери 2.5x1.0m и заедно с вратата с размери 0.8x1.8m е със западно географско изложение. Стъклопакетите са изпълнение със специално слънцезащитно стъкло с коефициент на пропускане 0.7. Стените на помещението са боядисани с матов латекс със цвят „светъл тюркоаз“, с коефициент на отражение 0.68, таванът е боядисан с бял латекс с коефициент на отражение 0.7, работната повърхност е на височина 0.8 m и цветът на бюрата е „дърво“ с коефициент на отражение 0.48, като височината на работната повърхност е 0.85 (върху бюрата са поставени преносими компютри, поради което контролните точки са разположени на 0.88m от пода на помещението). Подът е покрит с ламиниран паркет (светъл), с коефициент на отражение 0.52. На тавана на помещението са монтирани 5 светодиодни осветителя с мощност по 29W, корелирана цветова температура 3000K (топло бяла светлина) и светлинен поток 2800lm и CRI.

На Фигура 5. 1 е показана конфигурацията на помещението, общата осветеност, която се получава от комбинираното действие на осветителите в изследваното помещение и разположението на работните места.



Фигура 5. 1 Конфигурация на помещението, обща осветеност и разположение на работните места

Посредством автоматизирана система за измерване на естествена осветеност и заснетите от нея осветености за период от 3 години до настоящият момент са прецизирани стойностите на ФЕО, получени в Таблица 2.1 и Таблица 2.2

От заснетите експериментални данни за естествената осветеност навън и в помещението са получени стойности за ФЕО, а също и отношението ВВХ за контролни точки разположени в характерни равнини, перпендикулярно на прозорците. Разгледани са шест работни места Фигура 5. 1.

Стойностите на ФЕО, които са заложили са тези данни от симулационните програми, които се доближават максимално до експерименталните данни за този показател. ВХ отношението е включено в алгоритъмът за управление на осветлението – посредством единствен сензор за измерване на вертикална осветеност в определена точка от вертикална повърхност, която не се засенчва и данни за осветеността навън изкуственото осветление се изключва своевременно при наличие на достатъчно естествена светлина

5.2.2. Формулировка на оптимизационната задача

Осветителите в помещението се управляват така, че на работната повърхност в разглежданите шест контролни точки да бъде поддържано постоянно ниво на осветеност. Необходимата осветеност от осветителната уредба се определя като разлика между нормената осветеност за извършване на зрителната задача и изчисленото ниво на естествената осветеност за разглеждан интервал от време. Нивото на осветеност от електрическото осветление се определя според уравнението:

$$E_{AL} = E_N - DC \cdot E_{Do} \quad (5.1)$$

където,

E_N е вектор представящ необходимото ниво на осветеност на работната повърхност;

DC е матрица от стойности на **ФЕО**;

E_{Do} осветеността навън, изчислена по статистически данни.

Общата осветеност в помещението, която се получава от осветителната уредба се приема като линейна комбинация от приноса на всеки индивидуален осветител.

С цел оптимизация на консумираната от осветителите електрическа енергия, е необходимо да се минимизира общата осветеност от електрическата осветителна уредба. В този смисъл всеки осветител трябва да осигурява точно определено количество светлина в добавка на наличната естествена светлина с цел да се поддържа необходимото ниво на осветеност в работните зони. Оптимизационната задача при такава постановка може да се изрази с уравнение (5.2), което може да се интерпретира така, че необходимата допълнителна осветеност от осветителите в осветителната

уредба трябва да бъде равна на необходимото ниво на осветеност минус осветеността, която дневната светлина осигурява:

$$A \cdot X = E_{AL} = E_N - DC \cdot E_{DO} \quad (5.2)$$

където,

X е матрица, която дава осветеността, която всеки осветител осигурява в контролните точки. Матрицата **X** е с размерност **m** x **n**, където **m** е броя осветители в помещението;

A е матрица с размерност **n** x **m** която представлява осветеността от **m** осветителя в **n** работни точки;

E_{AL} е матрица с размерност **n** x **1** която представя осветеностите, необходими от електрическата осветителна уредба в контролните точки.

Ако броят на контролните точки (работни места) е равен на броя осветители в разглежданото помещение (**n=m**), системата от линейни уравнения може да се реши и има единствено решение. В случая, обаче, когато помещението има повече работни места, отколкото осветители (**n > m**), уравнение (5.9) се превръща в система, която няма единствено решение. В този случай се търси приблизително решение. Въвежда се вектор на грешката с размерност **n** x **1**, **E**, определен като следва:

$$E = E_{AL} - A \cdot X \quad (5.3)$$

Този вектор **E** представлява „излишъка“ на осветеност на работните места. За да се осигури максимално енергоспестяване, нормата на излишъка на осветеността се минимизира:

$$\|E\| = [(E_{AL} - A \cdot X)^T (E_{AL} - A \cdot X)]^{1/2} \quad (5.4)$$

В настоящата дисертация се разглежда метод за минимизация, базиран на генетичен алгоритъм, който се използва за оценка на **X** а оттам и на потенциалното енергоспестяване.

По-специално генетичният алгоритъм определя най-ефективния метод за управление за осветителите и изчислява излишъка на осветеността на базата на необходимото ниво на осветеност в работните точки.

5.2.3. Генетичен алгоритъм

Генетичният алгоритъм е еволюционен оптимизационен подход, който е създаден да намери близки до оптималните решения на сложни проблеми. За да направи това той използва множество от евентуални решения, наречени индивиди и ги кара да еволюират към по-приемливи решения. При ясно дефиниран проблем, който трябва да бъде решен, генетичният алгоритъм работи както следва:

1. Започва със създадено на случаен принцип поколение от **n** хромозоми (възможни решения на проблема).
2. Изчислява съответствието **f(x)** на всяка хромозома **x** в поколението.
3. Повтаря следните стъпки докато не се създаде потомство от **n** индивида:
 - Избира двойка родителски хромозоми от настоящото поколение, като вероятността за избор е нарастваща функция на съответствие.
 - С избрана вероятност за кръстосване се кръстосват двойките индивиди и се получават два потомъка.
 - С дадена вероятност се прилага оператор за мутация на двата индивида.
4. Настоящото поколение се заменя с новото.
5. Отива се на стъпка 2.

Всяка итерация на този процес се нарича поколение. Един генетичен алгоритъм съдържа обикновено от 50 до 500 или повече поколения. Цялото множество от поколения се нарича цикъл. В края на цикъла обикновено се получават една или повече хромозоми от поколението. Тъй като случайността има значима роля във всеки цикъл, два цикъла със различни случайно избрани начални поколения ще доведат до различно развитие. Това означава, че генетичният алгоритъм осигурява множество от потенциални решения на даден проблем и изборът на крайно решение зависи от потребителя и приложението.

5.3 Приложение на разработения алгоритъм за управление на осветлението

5.3.1. Алгоритъм за управление на осветлението

С цел управление на осветлението в конкретното помещение е разработен микропроцесорен контролер, описанието на апаратната и програмна част на който е дадено в Приложение 3. Апаратната реализация на контролера е с ниска стойност – цената на цялата система за управление на

осветлението, включваща един контролер, два сензор за осветеност и съответното окабеляване възлиза на 100 лева. В паметта на микропроцесора PIC18F4520 са записани описаните по-горе 432 възможни сценария за работа на осветителната уредба.



Фигура 5. 2 Блок схема на алгоритъма за управление

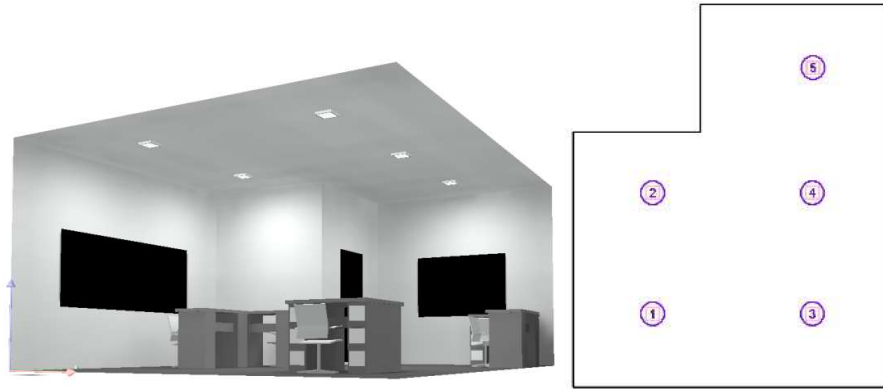
В контролера е реализиран програмно астрономически часовник за реално време, който държи сметка за ден, месец, час и минута от годината. Сутрин по показанията и градиента на нарастване на стойностите на външната осветеност се определя състоянието на атмосферата и в зависимост от него се реализират светлинните сцени за часовете от 8.30 до 10.00 часа, като се превключват (ако е необходимо на всеки 30 минути) Фигура 5. 2. В 10.30 часа се прави проверка за осветеността на работното място, като се измерва стойността на вертикалната осветеност в контролната точка, в която е монтиран сензорът и по определеното отношение на вертикалната към хоризонталната осветеност (измерено на място) се определя дали на работните места е постигната нормената стойност на осветеността (в конкретното помещение $E = 300\text{lx}$). Ако стойността на хоризонталната осветеност е под норменото ниво, последната светлинна сцена се реализира за още 30 минути, след което осветлението се гаси и е възможно ръчно управление по групи осветители.

След обяд управлението на осветлението започва от 15.00 часа, като първо се прави проверка за състоянието на атмосферата - по стойността и градиента на нарастване на външната осветеност. Следва проверка за стойността на вертикалната осветеност в определената контролна точка и определяне на нейна база на хоризонталната осветеност. Ако стойността на хоризонталната осветеност е по-висока от 300lx , осветлението остава изключено за още 30 минути, след което отново се прави проверка за стойността на хоризонталната осветеност. Ако тя е под 300lx се реализират светлинните сцени за съответното време до 18.00 часа, като се превключват (ако е необходимо на всеки 30 минути). В 18.30 часа осветлението се гаси и е възможно само ръчно управление по групи осветители.

Описаната система за управление на осветлението е внедрена в реално съществуващо офис помещение, като инсталирането ѝ е направено при реконструкция на осветителната уредба на помещението. Работата на системата е следена за период от два месеца – март и април 2018год. През този период са наблюдавани само два случая за ръчно управление на осветителната система – в марчни дни се е наложило допълнително осветление на две от работните места след изключване на изкуственото осветление от системата за управление в 10.30 часа, като втората група осветители са включени ръчно и са работили допълнително за период от 90 минути.

5.3.2. Управление с включване и изключване на осветлението

След получаване и верификация на резултатите от генетичния алгоритъм е разработен режим на работа на осветителната уредба Фигура 5. 3



Фигура 5. 3 Положение на осветителната уредба

Поради малката продължителност на прехода между изгрева и достигането на нормената стойност на осветеността на работната повърхност и бързата промяна на естествената осветеност навън, всяка светлинна сцена се приема с продължителност 30 минути.

5.4. Икономическа оценка

При изпълнение на проекти с цел икономическа оценка на пригодността им обикновено се използва методът „Нетна сегашна стойност“ (Net Present Value NPV). При този метод се залага голямо капиталовложение в настоящия момент, което се изплаща на серия от положителни парични потоци в бъдеще. Тази серия от парични потоци трябва да се предвиди прецизно, за да се получи точна оценка. В настоящия случай се прави оценка на нетната сегашна стойност на системата за управление на осветлението, разработена в дисертацията, като се залагат съответните елементи, необходими за реализирането ѝ. Използва се формула (5.5), за да се определи дали предложената система за управление на осветлението е икономически изгодна.

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (5.5)$$

където,

- C_0 е стойността на инвестицията за системата за управление на осветлението;
- C_t е позитивния паричен поток за годината t ;

r е лихвата.

Срокът на възвръщане (PBP) е продължителността на периода, необходим за да се възстановят първоначалните инвестиции, за сметка на породения от тях паричен доход ($NPV=0$).

Когато се очакват равни по размер НПП за всяка година от първата до N –та, може да се улесни изчислението на сумата на техните настоящи стойности, като се използва анюитетен фактор. Анюитетния фактор (AF) представлява сумата на дисконтовите фактори за определяне на норма на скотиране r , като се започва от първия до последния период.

$$AF = \frac{(1+r)^N + 1}{r \cdot (1+r)^N} \quad (5.6)$$

Положителната нетна сегашна стойност NPV означава че инвестицията може да бъде направена и няма да доведе до загуби, докато негативната стойност показва, че инвестицията не би трябвало да бъде направена, тъй като не може да бъде гарантирано възвръщането на капитала.

Финансиране със 100% кредит

Таблица 5. 1 Изходни данни:

1	Необходими инвестиции за дълготрайни активи.	хил. лв.	100
2	Размер на кредита	%	100 %
3	Лихвен процент на банката	%	4,0 %
4	Срока на погасяване на кредита	год.	10
5	Икономическият живот на новите дълготрайни активи	год.	25
6	Икономия на електроенергия в резултат на внедряване на енергоспестяващото технологично обновление	kWh/г.	66,27
7	Цената на електрическата енергия	лв./kWh	0,22
8	Увеличение на средната цена електрическата енергия всяка год.	%	2,0 %
9	Сконтен процент, $r[88]$	%	2,63 %
10	Годишни разходи за обслужване на инсталацията, % от цената на придобитите дълготрайни активи	%	0,1 %

Изчисляване на анюитетна годишна вноска по кредит:

$$A = C \cdot r \cdot (1 + r)^n / [(1 + r)^n - 1] \quad (5.7)$$

C =	100	лв.
r =	4,00%	год. лихва
n =	10	бр. периоди (години)
A =	12,33	анюитетна годишна вноска, лв.
S =	123,3	анюитетна сума (сума за плащане), лв.
R =	50	лихви за периода, лв.

Цената на контролера за управление на осветлението, заедно с необходимото окабеляване е 100 лева. Цената на електрическата енергия в настоящия момент е 0.22 лева за kWh, а периода за възвръщане на инвестицията е в размер от 10 години. Положителните парични потоци се дължат на икономията на електрическа енергия от използване на система за управление на осветлението. Ако лихвения процент се приеме 4% за година, нетната сегашна стойност на осветителната уредба на разглежданото помещение при прилагане на система за управление с вкл./изкл. на осветителите или димиране е както следва:

NPV= 2 за управление с вкл. /изкл. на осветлението е западно географско изложение.

При работа на осветителната уредба без управление, годишната консумация на електроенергия е възлизала на 137,2kWh. Необходимата електроенергия след внедряване на системата за управление на база на генетичен алгоритъм е намалена до 70,93 kWh/год. Спестената енергия за една година е 66,27 kWh или 48 %. Внедряването на системата в офис помещения, със стандартната за България архитектура, води до икономия на енергия между 35% и 52%. Реализираната икономия зависи от:

- Броя и разположението на осветителите;
- Работните места;
- Светлинните отвори в помещението;

5.5 Анализ на получените резултати

В настоящата глава от дисертацията е разработен оптимизационен подход за минимизиране на консумираната електрическа енергия за осветление посредством използване на еволюционен оптимизационен подход. Предложеният алгоритъм за управление на изкуственото осветление с максимално използване на дневната естествена светлина е внедрен в нискостойностна система за автоматизация. Системата за управление е проектирана за реално помещение, на което е направен 3Д модел и е въведен в програмен продукт Velux Daylight Visualizer. Заложени са реалните, измерени, коефициенти на отражение на тавана, стените, пода и работната повърхност. Посредством направените изчисления е определен ФЕО за работните места за цялата година. За всеки месец от годината, е определено, какво е необходимото допълващо осветление до норменото, при различни

типове небе. В паметта на микропроцесора PIC18F4520 са записани 432 възможни сценария за работа на осветителната уредба. Системата за управление е внедрена в реален офис.

Извършен е мониторинг за работата на системата. Установено е, че за тримесечния период са наблюдавани само два случая за ръчно управление на осветителната система – в мрачни дни се е наложило допълнително осветление на две от работните места след изключване на изкуственото осветление от системата за управление в 10.30 часа, като втората група осветители са включени ръчно и са работили допълнително за период от 90 минути.

Направена е икономическа оценка на системата. За период от 10 години системата се изкупува. Икономията на електрическа енергия е значима и възлиза на 48%

Този резултат показва, че си струва да се прави инвестиция за внедряване на системи за управление на осветлението. Цената на самите контролери е много ниска, което не предполага тежкото на кредит само за системите. Максимална икономия на електрическа енергия би се получила при едновременна реконструкция на осветителната уредба с подмяна на конвенционални осветители със светодиодни и същевременно внедряване на системи за управление на осветлението с максимално използване на дневната естествена светлина.

Заключение и направление за бъдеща работа

Потенциалът за икономия на електрическа енергия за осветление в слънчеви дни е малък, докато при мрачни дни има възможност за по-значително енергоспестяване, тъй като в този случай осветлението остава включено през значителна част от работното време и коректното му управление води до намаляване на консумацията на електрическа енергия.

За усъвършенстване на предложената система за управление на изкуствено осветление е възможно използването на мрежа с безжични сензори и изпълнителни устройства. Мрежата от безжични сензори и изпълнителни устройства (Wireless Sensors and Actuators Network WSA) представлява разпределена система, която използва информацията от сензорите, за да задейства управляващи устройства и съответно да управлява автоматизирана ситема. Напоследък WSA се прилагат широко в системи за управление, в частност на осветлението. Управлението на осветителната уредба може да се извърши като се използва информация от безжичните сензори и управляващите устройства в зависимост от нивото на отчетената от сензорите естествена осветеност. Използваните в осветителната уредба луминесцентни или светодиодни осветители могат да бъдат димирани посредством използване на димируема ПРА. При използване на управление с включване и изключване на осветители, управляващите устройства разпознават командите за прекъсване и подаване на напрежение към реле, което включва и изключва осветлението. Архитектурата, която може да се използва за конкретното приложение е със следните компоненти: сензори, управляващи устройства и един или повече контролера. Като контролери могат да се използват функционални модули, вградени в базова станция или отделни възли, съоръжени с достатъчно мощен изчислителен и комуникационен капацитет. При използване на такава архитектура, сензорите изпращат събраната информация към контролерите. Контролерите изпълняват управляващия алгоритъм и генерират управляващи команди, които изпращат на изпълнителните устройства. В този смисъл както информацията от сензорите, така и управляващите команди трябва да се предават безжично.

Тъй като целта на системата за управление на осветлението, която се предлага, е да осигури максимално възможна икономия на електрическа енергия за осветление, тя може да бъде допълнително усъвършенствана като се използват допълнителни сензори за осветеност в контролни точки от помещението – за измерване на вертикалната осветеност, със сензори захранвани от фотоволтаични клетки, които подават информация за изпълнителните устройства в осветителите. При захранване на този тип сензори и изпълнителни устройства са необходими PV клетки, елементи за съхранение на енергия, инвертори.

Приноси на дисертационния труд

Научни приноси

1. Разработена е автоматизирана система за измерване на хоризонтална и вертикална осветеност в харзктерни точки от експериментално помещение. С помощта на реализираната система за измерване на осветеност е възможно получаването на статистически значими данни за характера на изменение на дневната естествена осветеност в помещения, в зависимост от размера и географската ориентация на светлинните отвори, облачността, положението на контролната точка в помещението, сезона и времето от деня за гр. София.
2. Определена е корелационната зависимост на получените по експериментален път резултати за показателя коефициент на естествено осветление и тези, получени посредством симулации. Симулационните модели са построени в най-широко използваните програми за светотехнически изчисления. Получените коефициенти на корелация на експерименталните и симулационните резултати недвусмислено показват дилна корелационна зависимост при използвана на програма Velux Daylight Visualizer
3. Значително внимание е отделено на заслепяването от естествена светлина и посредством изчислителни, експериментални и симулационни резултати е установено е, че пореди спецификата на полаожението на България на земното кълбо и положението на слънцето през различните сезони в закрити помещения с характерна за страната архитектура няма продължителни периоди от време, през които показателите за оценка на заслепяването имат недопустимо високи стойности.

Приложни приноси

1. Разработен е оптимизационен подход за минимизиране на консумираната електрическа енергия за осветление посредством използване на еволюционен оптимизационен подход. Предложеният алгоритъм за управление на изкуственото осветление с максимално използване на дневната естествена светлина е внедрен в проста система за автоматизация.
2. Системата за управление е заложена в реално помещение, като е извършен мониторинг на работата й.
3. С внедряването на системата за управление е постигната значителна икономия на електроенергия, възлизаща на 48%.

Списък на публикациите на автора, свързани с дисертационния труд

1. Петринска И., Д. Иванов, „Мерки за постигане на минимален разход на електрическа енергия и максимално удовлетворяване на нуждите на потребителите от светлина при вътрешни осветителни уредби“, VI Научна конференция „ЕФ 2014“, 15-17 септември 2014, Созопол.
2. Петринска И., Д. Иванов, „Методи за оценка на количествените и качествените показатели на дневната естествена светлина“, VII Научна конференция „ЕФ 2015“, 19 - 21 Септември 2015, Созопол.
3. Petrinska I. , V. Georgiev, D. Ivanov , “Optimizing Lighting Energy Savings in Public Buildings through Maximal Use of Daylight”, 25-28 September 2015, Germany, Dornfeld
4. Петринска И., Д. Иванов, В. Шаламанов, „Специфика при определяне на заслепяващото действие на светодиодни офис осветители“, VIII НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ЕФ 2016 България, Варна, "Св.св. Константин и Елена", 12 - 15 Септември, 2016 г.
5. Иванов Д., „Определяне на заслепяването при дневноестествено осветление на помещения в обществени сгради“ , VIII НАУЧНА КОНФЕРЕНЦИЯ ЕФ 2016 България, Варна, "Св.св. Константин и Елена", 12 - 15 Септември, 2016 г.
6. I. Petrinska I., D. Ivanov, V. Georgiev, "Influence of the Light Distribution of LED Luminaires on the Energy Consumption for Lighting in Public Premises", Lux junior 2017, 08. bis 10.9.17, Dörnfeld
7. Petrinska I., V. Georgiev, D. Ivanov, “Lighting control system for public premises, based on evolutionary optimization algorithm”, XXth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, 3 – 6 June, 2018 Bourgas, Bulgaria
8. Ivanov D., I. Petrinska, “Lighting Energy Savings through Implementation of Lighting Control System Based on Evolutionary Optimization Algorithm”, XXth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, 3 – 6 June, 2018 Bourgas, Bulgaria
9. Georgiev V., D. Ivanov, I. Petrinska, “Automated system for measurement of natural lighting and utilization of the results for lighting control”, XXth International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, 3 – 6 June, 2018 Bourgas, Bulgaria

INDOOR LIGHTING CONTROL BASED ON ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION

ABSTRACT

The opportunity for increased energy efficiency when it comes to lighting lays in the maximum use of the natural daylight. Besides the fact that the daylight is free, it also has positive psychological and physiological influence on the occupants of indoor spaces. Development of a lighting installation that meets simultaneously the need of energy efficiency and the individual human preferences for lighting is a complex task. That is the reason why often implementation of lighting control systems means compromising either the energy efficiency or the human factor. The current dissertation is aimed to implementation of such a lighting control system that meets to maximum extend both the requirement for efficiency and the natural need of daylight in order to increase productivity and well being of the occupants.

In order to meet the so described aim of the PhD thesis, the following problems have been solved:

1. Given the predetermined dimensions, characteristics and geometry of the room, the necessary qualitative and quantitative parameters of the natural daylight are determined, that meet the normative requirements for integral and daylighting, while keeping the energy consumption minimal;
2. An experimental setup for measurement of natural lighting availability in a test room has been developed. Through this system, experimental measurements of vertical and horizontal illuminances in characteristic points have been carried out for a period of two years. Based on the experimental data, the vertical to horizontal illuminance ratio and the daylight factor have been determined and analysed;
4. The experimental results have been compared to simulations and the software program, giving results best correlating to the experimental data has been determined. Pearson correlation coefficients have been calculated for the most widely used lighting simulation programs;
3. Based to the experimental and simulation results for the daylight availability in Bulgaria, a lighting control optimization task has been set. The goal of the optimization is to use to maximum extend the daylight availability and at the same time not to make compromise the quality of lighting. In order to decide the so set optimization problem, an evolutionary approach has been used;
5. Using the optimization results, a lighting control algorithm has been developed, and implemented in a low-cost physical system. The so developed lighting control system has been implemented in a private office and its operation has been monitored for two months, proving significant economy of electrical energy for lighting.

Solving the above mentioned problems the following conclusion has been made: using the natural daylight to maximum extend not only leads to significant energy savings, but also leads to higher extend of satisfaction and productivity of the occupants. Although the daylighting through windows leads to infrared gains in the hot seasons and also sometimes to glare, these problems can be solved through contemporary technologies – special glass or PV windows and light redirecting shading systems. Implementing such technologies, however is still not economically justified. So far the lighting control system, presented in the PhD thesis is both energy efficient and meets to maximum extend the need of the occupants of natural daylight.