

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ВАРНА

**ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ И ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ“**

маг. инж. Христиан Ивайлов Панчев

**ОПТИМИЗИРАНЕ ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕТО И ЕНЕРГИЙ-
НИТЕ РАЗХОДИ НА СИСТЕМИ ЗА ВЪНШНО ОСВЕТЛЕНИЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

**Докторска програма по
„Електроснабдяване и електрообзавеждане“**

Варна 2022 г.

Дисертационният труд съдържа 123 страници, включително 54 фигури, 29 таблици и 1 приложение, оформени в 4 глави, общи изводи и списък на използвана литература от 102 заглавия, от които 32 на кирилица и 70 на латиница.

**Защитата на дисертационния труд ще се състои на
г. от ч. в на открито заседание на жури сформирано
със заповед на Ректор №/..... г.**

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се в Докторантския център, стая 318 НУК.

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ-ВАРНА

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ
КАТЕДРА „ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕ И ЕЛЕКТРООБЗАВЕЖДАНЕ“

маг. инж. Христиан Ивайлов Панчев

**ОПТИМИЗИРАНЕ ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕТО И ЕНЕРГИЙ-
НИТЕ РАЗХОДИ НА СИСТЕМИ ЗА ВЪНШНО ОСВЕТЛЕНИЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

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

по докторска програма „Електроснабдяване и електрообзавеждане“
към професионално направление 5.2. Електротехника електроника и
автоматика.

Научен ръководител:

доц. д-р инж. Валентин Николов Гюров

Рецензенти:

1.
2.

Варна 2022 г.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема и на разработката.

Системите за външно осветление са един от основните потребители на електрическа енергия в населените места, като през последните години е налице тенденция за мащабна модернизиранизация с цел намаляване на енергийните и експлоатационни разходи. Естественият прираст на големите градове води до постоянно разширяване на обхвата на такъв тип системи, която в редица случаи не е адекватна с развитието на електроснабдителните системи. Появата на нов тип управляеми системи за улично осветление, внедряването на нови по вид източници на светлина и усъвършенстването на нормативната база, водят до промяна както в характера на електропотребление, така и в нормативните критерии за оценка. Ефективната работа на системите за външно осветление е свързана с оптимизационни задачи, целящи постигане на минимални загуби на мощност и енергия в процеса на електроснабдяване при осигуряване на качествена светлинна среда. В болшинството случаи, естественото разширяване и модернизацията на системите за външно осветление, се извършват без съществени промени в компонентите и топологията на електроснабдителните системи, които от своя страна са с многократно по-висока инвестиционна стойност.

Проблемът с дефинирането на нови методи за анализ и оценка на съществуващи и проектирането на нови системи за външно осветление с цел оптимизиране на процеса на електроснабдяване по критерии минимум на конвенционалните и допълнителни загуби в условията на постоянна промяна по мащаб и характер на потребителите е недостатъчно проучен.

Съществуват възможности за разработването на нови методики за анализ, оценка и оптимизация на електроснабдяването на системите за външно осветление, чрез които да се постигне намаляване на енергийните разходи и повишаване на ефективността им.

Обект на изследване на настоящия дисертационен труд са системите за външно осветление като е насочен предимно към създаването на метод за оптимизиране на електроснабдяването в процеса на проектиране и препроектиране на съществуващи и нови системи за външно осветление. Изследват се и се разработват методи за комплексен анализ на електроснабдителната система чрез създаване на поведенчески модел на осветителите и имплементиране в системите за външно осветление.

Основни цели на разработката представляват:

- Да се изследват взаимовръзките между топология, схемни решения, плътност и разпределение на потребителите, характер на електропотреблението и показателите за качество на електрическата енергия;
- Да се разработят и усъвършенстват методики и технически средства за оптимизиране на електро-снабдяването и енергийните разходи на системи за външно осветление;
- Да се дефинират и изследват взаимовръзки между различни оптимизационни критерии, да се установят оптимални нива и степен на въздействие на влияещите параметри.

Основни задачи на разработката:

- Изследване на съществуващите теоретични методи за анализ на конвенционалните и допълнителни загуби на мощност и енергия в електроснабдителни системи за външно осветление;
- Разработване методики за оценка на оптималното разположение на потребители и хранващи източници;
- Изследване и прогнозиране на загубите на мощност и енергия в електроснабдителни системи за външно осветление при различни оптимизационни критерии за характерни обекти;
- Разработване на аналитични методи и практично приложими постановки за оптимизация на електроснабдяването на външни осветителни уредби;
- Разработване на софтуерно приложение за изследване и проектиране на електроснабдителни системи за външно осветление по оптимизационни критерии.

Методи на провеждане на изследванията:

- Реални измервания по време на работа на улична осветителна уредба;
- Реални измервания от улични осветители в лаборатория „Улично осветление“ на катедра „Електроснабдяване и електрообзавеждане“ и разработването на симулационен поведенчески модел;
- Симулиране на реален сегмент от топологията на улична осветителна уредба.

Основни резултати:

- Разработена е методика за изследване и симулиране на поведенчески модел на едно-фазни електрически консуматори;
- Разработен е алгоритъм базиран на граф структура за оптимално разпределение на улични осветители по захранващи касети;
- Разработване на алгоритъм за определяне на оптимален брой захранващи източници приспособен да работи в системи за улично осветление;
- Разработен е алгоритъм за опроводяване на електрическите вериги в системите за улично осветление на база критерии минимум на приведените годишни разходи.

Списък на публикации по дисертационната работа

1. доц. д-р инж. Валентин Николов Гюров, **инж. Христиан Ивайлов Панчев**, доц. д-р инж. Румен Михайлов Киров, ОЦЕНКА НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ В УЛИЧНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ ПРИ ВАРИАНТНО ПРОЕКТИРАНЕ VII БАЛКАНСКА КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ОСВЕТЛЕНИЕ ISSN 978-954-353-347-3, София 2018
2. Gyurov, V. **Panchev, H.** Experimental Research on Light and Energy Parameters of Intelligent Street and Road Lighting, 11th Electrical engineering faculty conference (BulEF), Proceedings, 2019 Varna, DOI 10.1109/BulEF48056.2019.9030760 ([Scopus](#))
3. Gyurov, V. **Panchev, H.**, Makedonski, N. Possibilities for Optimizing the Electric Power Supply Network Topology of Lighting Systems, 11th Electrical engineering faculty conference (BulEF), Proceedings, 2019 Varna, DOI 10.1109/BulEF48056.2019.9030760 ([Scopus](#))
4. **Panchev, H.**, Gyurov, V. Graph-based Method for Optimization of Electric Power Supply Systems for Street Lighting, 12th Electrical engineering faculty conference (BulEF), Proceedings, 2020 Varna, DOI 10.1109/BulEF51036.2020.9326057 ([Scopus](#))
5. **Panchev, H.** Research and analysis of lighting and energy performance of the street lighting segment of the highway. 13th Electrical engineering faculty conference (BulEF), Proceedings, 2021 Varna, DOI 10.1109/BulEF53491.2021.9690826 ([Scopus](#))

КРАТКО СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

ПЪРВА ГЛАВА

ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР ВЪРХУ ШИРОК КРЪГ ВЪПРОСИ, СВЪРЗАНИ С ТЕМАТА НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1.1 Описание на проблемите при проектиране и изграждане на системите за външно осветление – улично осветление и осветление на открити работни места

В съответствие с новите европейски норми за улично осветление, относителният дял на второстепенните улици се увеличава, за сметка на градските артерии и магистрали. В резултат на това намалява необходимата инсталирана мощност и годишната консумация на електрическа енергия. Повишаване на относителния дял на второстепенните улици и тяхната сложна електроснабдителна система, дава по-големи възможности за рационализиране и оптимизиране на схемите, топологията и структурата на електроснабдяването. Също така се подобряват и възможностите за управление на външните осветителни уредби с използването на по-голямо разнообразие от критерии за оптимизация.

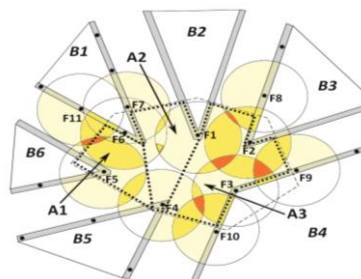
Изводът от тези данни е, че не е допустимо да се осъществява икономия на електрическа енергия от уличното осветление за сметка на влошаване на неговото качество и количество. Необходим е друг подход, който да се базира на използване на съвременни методи за оптимизация на електроснабдяването и енергийните разходи.

При съвременното проектиране на улични осветителни уредби (УОУ) от съществено значение за фотометричните изчисления са геометричните характеристики на осветяваните площи и инфраструктурните сегменти. Европейския стандарт за улично осветление EN 13201:2014 прилага детерминиран подход за детайлно описание на широк спектър от класове осветление, с което проектантите са максимално облекчени при оценка на инфраструктурните характеристики на УОУ. Въпреки това се оказва, че масовата проектантска практика се фокусира основно върху източниците на

светлина, т.е. това което осигурява светлината и в значително по-малка степен се обръща внимание и правилно се оценяват самите осветявани зони, т.е. това което се осветява.

Тези резултати, с маркираните противопоставящи тенденции, обуславят необходимостта от определяне на оптимална топология на електрическата мрежа и допълнителен анализ на загубите на мощност и електрическа енергия, капиталовите и експлоатационните разходи, за да може да се направи пълна технико-икономическа оценка на ефективността на представеното предложение.

В [76] на базата на разработвани класически постановки [53], [54], [77], [75] се анализират нестандартни фотометрични особености на светодиодни УОУ, като например прекалено много осветени зони, кръстовища, конфликтни зони, нетипични пътни ситуации и др. В работата е създаден графичен модел на градско пространство чрез формално описание с помощта на 3D хиперграф. Авторите предлагат светотехническите изчисления да се извършват в т.н. „разпределена среда от нарязани графи“.



Фиг. 1.1 Графично представяне на изследваното кръстовище

На Фиг. 1.1 е представена графична интерпретация на този модел за едно кръстовище (A) с шест сгради (B1-B6), десет броя осветители, означени с плътни точки (F1 – F10) и три под района (A1 – A3) с различни средни нива на осветеност. Фотометричната светлинна ситуация е ограничена с тънка пунктирна линия, а под районите A1, A2 и A3 са маркирани с плътен точков пунктир.

Светлоразпределението на всеки един осветител условно е представено със светложълт кръг, припокриването на 2 и 3 окръжности е маркирано съответно в жълто и оранжево, като това всъщност са изображения на т.н. “нарязан граф“. Прекалено осветените зони в жълто и оранжево са обект на оптимизация по критерий „енергийна ефективност“, постигнат чрез димиране на осветителите. Авторите са разработили компютърен алгоритъм и програма, при апробацията на които в проект SOWA, в обем от 7000 осветителя с променливи параметри изчисленията са завършени за 6 часа.

Предложения модел представлява подход за постигане на енергийно икономични резултати на база на оптимизация само светлотехнически параметри. Не се държи сметка на топологията на системата на електроснабдяване, особеностите на електрическата мрежа, режимите на експлоатация, свързани със загубите на мощност и ел. енергия, качеството на електроснабдяване, електромагнитната съвместимост при димиране и др. специфични характеристики на УОУ.

В [74] се препоръчва нов подход при проектиране на светодиодни УОУ с използване на евристични технологии, заложи в софтуера Kotulski et al 2013. Известните софтуерни продукти Dialux, Relux, Agi32 и др. използват стандартни ситуации при фотометричните изчисления – например широчината на пътя и разстоянието между осветителните тела се приемат равномерни по целия проектен участък. При прецизни изчисления в съответствие със стандарта EN 13201 – 3, с използване на действителни данни, авторите твърдят, че може да се постигне икономия на електрическа енергия 10 и повече процента. В тази връзка е предложен метод за оптимизиране на енергийната ефективност за МЕ класове улици при променливи пътни ситуации с динамично изменящи се височина на стълба, дължина на рамото и ъгъл на наклона на рогатката, модел на осветителя и ниво на димиране от 0 до 50 %. Общия брой на изследваните варианти (сценарии) за търсене на оптимално решение е $1,1 \cdot 10^9$. Изследваните фотометрични величини са средна яркост на уличното платно L_{cp} , обща равномерност на разпределението на яркостите U_0 , надлъжна равномерност на разпределението на яркостите U_e , показател на заслепяване PI , показател на осветлението на заобикалящата среда SR и експлоатационен фактор MF . Оценката на изходния параметър (енергийна ефективност) се извършва с помощта на показателя LFR ($LFR = 1$ и $LFR = 0$) при недимирана и напълно димирана УОУ.

1.2 Стандартизирани норми и изисквания към външното осветление

Разгледаните по-горе публикации поставят въпроса в каква степен стандартите представят възможностите за реализация на комплексен подход, обединяващ част светлотехническите характеристики и електроенергетичните параметри на ОУ. Необходимо е да се даде отговор на това, какви да възможностите и каква е ролята на нормативните документи за постигане на оптимални решения не само от светотехническо естество, но и от гледна точка на електроснабдяването и електрообзавеждането.

Нормативните изисквания за яркост на уличното платно, равномерността на разпределение на яркостта, показател на заслепяване, показатели за енергийни характеристики, както и останалите показатели, характеризиращи качеството на осветлението по различни класове улици са посочени в следните стандарти

- БДС EN 13201-1: Осветление на пътя - Част 1: Указания за избор на класове осветление.

- БДС EN 13201-2: Осветление на пътя - Част 2: Изисквания за експлоатационни характеристики.

- БДС EN 13201-3: Осветление на пътя - Част 3: Изчисляване на експлоатационните показатели.

- БДС EN 13201-4: Осветление на пътя - Част 4: Методи за измерване на светлинните характеристики.

- БДС EN 13201-5: Осветление на пътя - Част 5: Показатели за енергийни характеристики.

1.3 Прочуване методите и практиките при проектиране на системи за външно осветление в национален и световен мащаб.

1.3.1 Описание на основните параметри на проектните решения за външни ОУ

Компонентите на системата за улично осветление могат да бъдат разделени в три широки категории:

- Оптични системи, които покриват осветителни тела (включително отражатели и лещи), лампи или източници на светлина, както и контролното устройство.
- Поддържащи системи, състоящи се от стълбове и техните основи.
- Електрически системи (включително сервизни шкафове), покриващи съоръжения за захранване, контрол и измерване.
- Осветителни тела

Четири нива на безопасност на пътниците са посочени за подпорни конструкции, като ниво 4 представлява невредни подпорни конструкции, за които се предполага, че причиняват само малки щети. Останалите три нива се определят от ударни тестове, използващи леки автомобили със скорост 35, 50, 70 и 100 км / ч. [37], [62].

1.4 Критичен концептуален подход върху проблемите на електроснабдяването на системите за външно осветление

Направеното проучване на литературни източници, нормативни документи и практически реализации на системи за външно осветление, дават възможност да се формулират следните критични постановки:

1. *Необходимо е да се реформира концепцията за същността, функциите, предназначението и изискванията към външното осветление. Освен като ергономичен, социален и екологичен фактор, то трябва да се разглежда като възможност за осигуряване на висока сигурност безопасност и надеждност, както по отношение на характеристиките на светлинните източници, така също и по отношение на хранващите електроснабдителни системи. Недопустимо е да се дава приоритет на технико-икономическите параметри на осветлението за сметка на влошаване на качеството и комфорта на пешеходци и превозни средства, създаване на светлинно замърсяване и „технологичен хаос“ в системата на електроснабдяване. Така формулирана задачата има универсален характер и трябва да се решава с помощта на съвременни комплексни подходи и оптимизационни критерии, както по отношение на светоцветовата среда, така и на параметрите и характеристиките на електроснабдяването и електроенергийните разходи.*

2. *В проектантската практика съществуват методи и подходи за оптимизиране на светлоразпределителните криви на осветители по критерии „видимост“ с отчитане влиянието на геометричните размери на ОУ. Такъв подход с също с ограничена функционалност, т.к. не се взема предвид влиянието на други инфраструктурни компоненти, като начина на електроснабдяване, сложността за реализиране на схемите електротехническите решения, влиянието на размерите и дължините на хранващите и свързващите линии и др.*

3. *В болшинството от изследваните публикации се прилагат оптимизационни подходи само по отношение на светотехнически параметри и характеристики. Такова разглеждане е едностранчиво, т.к. не се отчита влиянието на особеностите на електроснабдяването и електрическата мрежа, на нейната структура и топология, а също така не се взимат предвид режимите на експлоатация с техните основни характеристики, като качество на ЕЕ, загуби на активна мощност и ел. енергия, загуби на напрежение, надеждност на електроснабдяването и др.*

4. При прилагане на нормативна база за външни ОУ е необходимо тя да се използва всеобхватно и пълно. Трябва да се контролират съвместно не само светотехническите, ергономичните, екологичните и нормите за енергийна ефективност, но в пълна степен да се обхванат при реализиране на конкретните проекти всички изисквания, свързани с качеството на ЕЕ, ЕМС, надеждността, загубите на мощност и др. Този подход трябва да се прилага и в условията на димиране на ОУ, както и при оценка на други специфични характеристики на външните ОУ. Да се има също така предвид, че стандартите за качество на ЕЕ, ЕМС и надеждността на електроснабдяването, имат една и съща природа, съществуват силни релации между основни техни показатели и използването им трябва да става комплексно и взаимно обвързано.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ПЪРВА ГЛАВА

1. В направения литературен обзор са разгледани публикации, в които се предлагат методи за усъвършенстване на външните ОУ чрез замяна на съществуващите източници с по-ефективни; чрез оптимизиране на светлоразпределителната крива на осветителите по критерий „видимост“; чрез прецизиране на светлотехническите изчисления с отчитане на реалните геометрични параметри на осветителните уредби; чрез вземане на метрични параметри на инфраструктурните елементи върху световата среда и създаване в тази връзка на база данни на характеристиките на инфраструктурата и някои други възможности за оптимизиране на параметрите на външните ОУ. Всички разгледани литературни източници тематично са насочени за модернизация на ОУ чрез постигане на високи светлотехнически характеристики, като се игнорира факта, че осветлението има електроенергетична природа. В тази връзка назрява необходимостта да се предложат и разработят методични постановки, в които да се разгледат характерните за електроснабдяването задачи, като например оптимизиране параметрите на хранващите осветителни мрежи, оптимизиране броя, разпределението и разположението на осветителите и уличните касети, оптимизиране дължината на кабелните линии, минимизиране загубите на мощност и ел. енергия и др.

2. Направен е основен преглед на стандартите и нормативната база за улично и външно осветление, като са обхванати и изискванията за енер-

гийна ефективност и качество на електроснабдяването. Обърнато е внимание, че във връзка със спазването на нормативните изисквания, е необходимо да се прилага нов подход, изразяващ се в комплексното разглеждане и контролиране на светлотехническите и електроенергетичните стандарти на осветителните уредби. Режимите на работа на ОУ, с техните основни характеристики, като надеждност и качество на електроснабдяването, електромагнитната съвместимост, загуби на мощност и напрежение, зависят и са пряко свързани със схемотехническите характеристики на външните ОУ, като структура и топология на осветителните мрежи, брой на хранващите възли, разпределение на осветителите към хранващите възли и т.н. прилагането на такъв комплексен подход дава възможност да се елиминират недостатъците на едностранчивото разглеждане на осветителните уредби само като източници на светлина и да се пренебрегва нейната електроенергетична природа.

3. Представени са общи характеристики на реализирани съвременни и модерни проекти на улични ОУ в Европа, включително в Р. България. Анализа показва, че от светотехнически аспект, те са осъществени на високо техническо и технологично ниво. Реализацията им обаче не дава основание да се твърди, че са постигнати достижения, съответстващи на най-добрите образци в областта на електроснабдяването и електрообзавеждането. Не са регистрирани резултати по въпросите свързани с реконструиране и оптимизиране на осветителните мрежи, няма информация, свързана с реализиране на оптимизационни задачи и критерии във връзка със загубите на мощност и ел. енергия като основен фактор за постигане на електроенергийната ефективност, липсват данни за подобряване на надеждността и устойчивостта на изградените системи за осветление. Всичко това показва, че за реализиране на тези проекти е работено разделно, едностранчиво. Усилията са насочени за постигане на висок светлотехнически ефект и е пренебрегната енергетичната същност на проблема. Не е възприет комплексен подход за постигане на високи резултати, което е основен стремеж и цел в настоящото изследване.

ЦЕЛ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

Целта на дисертационната работа е, да се изследват взаимовръзките между топология, схемни решения, плътност и разпределение на потребителите, характер на електропотреблението и показателите за качество на

електрическата енергия, да се разработят и усъвършенстват методики и технически средства за оптимизиране на електроснабдяването и енергийните разходи на системи за външно осветление, да се дефинират и изследват взаимовръзки между различни оптимизационни критерии, да се установят оптимални нива и степен на въздействие на влияещите параметри.

ОСНОВНИ ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

За да се реализират маркираните по-горе цели на дисертационната работа, е необходимо да се изпълнят следните задачи:

1. Да се извърши задълбочено обследване на широк кръг въпроси свързани с тематика на дисертационната работа, като се приложи критичен подход при маркиране на проблемите в тази област. Аналогично, обстоятелствено и всеобхватно да се анализират националните и международни стандарти, свързани с външно осветление, като се установи в каква степен нормативните документи дават възможности за реализиране на оптимизационни задачи. Да се анализират прогресивни международни проекти, изградени в съответствие с нормативните и с регистриран висок технико-икономически ефект, включително и такива, реализирани с финансиране по международни програми.

2. Да се разработи теоретични постановки, даващи възможност за дефиниране на оптимизационни задачи по различни критерий. Във връзка с поставените цели на дисертационната работа, е необходимо да се синтезират методики за оптимизиране на топологичните характеристики на външни ОУ и да се формулирана опростен метод за оценка на загуби на мощност. Също така се препоръчва да се предложи методика за технико-икономическа оценка на резултатите от изследванията и се потърсят възможности за представяне на някой оптимизационни процедури с помощта на „Теория на графите“.

3. Да се проведе изследване в комплексна светодиодна ОУ с прилагане на диференциран подход за определяне загубите на мощност във всички елементи и възли на осветителната уредба. Да се оцени тежестта на всеки елемент в баланса на общите загуби на мощност в системата и се предложат препоръки за тяхното минимизиране.

4. В съответствие с маркираните цели на дисертационната работа да се проведе експериментално и симулационно изследване на основните характеристики, свързани с регламентираните в нормативните документи изисквания за електроенергийна ефективност. Изследванията да обхваната

осветителни уредби с динамично изменящи се светотехнически, ергономични и геометрични характеристики, което дава възможност за постигане на оптимални решения в съответствие с дефинираните критерий.

5. Да се представи в подходяща математическа форма целева функция с помощта на която да се реши задачата за оптимално разпределение на осветителите по захранващи улични касети. Методиката да се апробира в реален обект и се оцени количествено ефекта от прилагане на оптимизационна процедура.

6. Да се формулира оптимизационен критерий и създаде методика за определяне на оптимален брой улични касети (захранващи източници) по критерий „минимум на приведените годишни разходи“. Методиката да се приложи в реална ОУ и се докаже нейната ефективност чрез количествена оценка и сравнителен анализ на различни варианти.

7. С помощта на „Теория на графите“ да се синтезира методическа постановка за оптимизиране на геометричните характеристики на ОУ и топологичните особености на захранващата мрежа. Синтезираните „дърво-видни структури“ да предоставят възможност за количествена оценка на оптимизационните решения.

ВТОРА ГЛАВА

АНАЛИЗ НА ТЕОРЕТИЧНИ И ПРАКТИЧНО-ПРИЛОЖНИ ПОСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ЗА ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЕЛЕКТРОСНАБДЯВАНЕТО НА ВЪНШНИ ОУ

2.1 Оптимално разположение на осветителите

2.2 Теоретични методи за определяне загубите на активна мощност в електроснабдителните системи за външно осветление

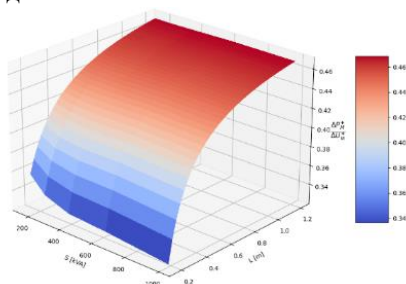
За постигане на висока електроенергийна ефективност на системите за външно осветление е необходимо да се формулират и разработят теоретични постановки на базата на научно обосновани оптимизационни критерии. Минимизирането загубите на мощност и електрическа енергия в мрежите на уличното осветление може да бъде показател и основен инструмент за реализиране на добри технико-икономически характеристики на енергийния баланс при запазване на качеството на светлинната среда. Друго съществено условие за оптимална работа на осветителните мрежи е съблюдаване не нормативните изисквания за основните ПКЕЕ. Отклонението на

напрежението в различни точки на осветителните мрежи, като един съществен показател от стандарта EN 50160, предизвикано от загубата на напрежение в силовите кабели, е необходимо да се разглежда в пряка връзка със загубите на активна мощност в захранващите магистрални линии на ОУ [87]. Тази постановка има своята логическа обосновка и от факта, че загубите на активна мощност в мрежите НН са пропорционално на регистрираните загуби на напрежение [87]. Тъй като уличните осветителни уредби не се захранват от самостоятелни ТП, точното отчитане на загубите би изисквало данни за типа и нивото на натоварване предизвикано от останалите консуматори свързани към съответния ТП. Такива данни са трудно достъпни за това могат да бъдат поставени като ограничителни условия за теоретичната постановка и тя ще разглежда само загубите породени от уличната осветителна уредба, ако тя е свързана самостоятелно към захранващ ТП.

Загубите на активна мощност в магистралните осветителни мрежи, може да се определят чрез загубата на напрежение ΔU_m^* в съответствие с израза:

$$\Delta P_m^* = 1,8 \cdot S_{\text{нтр}}^{-0,2} \cdot \Delta U_m^* \quad (2.1)$$

Това дава възможност при определянето им в реални условия, проведено в четвърта глава на настоящата разработка, да се извършва с използване на характерни, лесно определим и достъпни данни за осветителната уредба.

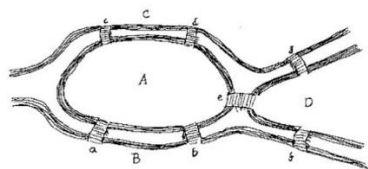


2.3 Техничко-икономически постановки при оценка и оптимизация на външни ОУ

2.4 Приложение на „Теория на графите“ за решаване на светлотехнически задачи

Фиг. 2.3 Визуализация на стойностите от отношението $\Delta P_m^* / \Delta U_m^*$ при различни условия

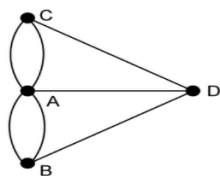
Теорията на графите, като част от приложната математика, се появява най-напред в разработки на Ойлер, впоследствие се доразвива от Кирхов, Кали, Хамилтон, Левин, Пойа, Харати и мн. др. За основател на теорията се счита Ойлер (1707 – 1782) който през 1736 г е решил известната в



Фиг. 2.4 Островите на р. Преголя

това време задача за Кьонингсберските острови (Фиг. 2.4). Двата острова на река Преголя се съединяват със сушата с помощта на осем моста. Жителите на града умували дали е възможно, излизайки от дома си да се върнат обратно, като минат по всеки мост само един път. Ойлер дефинирал

задачата по следния начин [1] .

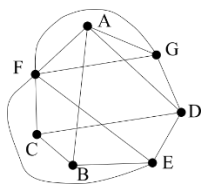


Фиг. 2.5 Граф към Фиг. 2.4

Да се намери такъв маршрут на движение през четирите части на сушата (A, B, C и D), който започва от коя да е от тях, завършва на нея и преминава само един път през всеки мост. За доказателство, че задачата няма

решение Ойлер обозначил всяка част на сушата с точка (върх) и всеки мост с линия (ребро). Полученият граф е показан на Фиг. 2.5. Той онагледява невъзможността за да осъществи такъв маршрут на движение, дефиниран в поставената задача [14].

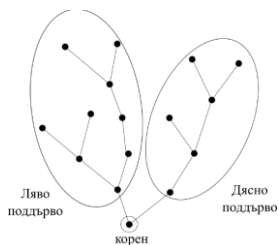
Под „граф“ се разбира диаграма, състояща се от няколко точки или



Фиг. 2.6 Примерен граф

върхове и части от прави или криви линии, съединяващи някои от тези върхове. Линиите, съединяващи върховете, се наричат „ребра“. На Фиг. 2.6 е изобразен примерен граф. Понятието „граф“ може да се разшири, като на всяко ребро съответства някакво число. Тогава може да се постави въпроса за извършване на математически операции, свързани с изчисления на определени параметри. Така в „Теория на графите“ възниква понятието „дърво“,

което представлява свързан граф, в който между кои да е два върха, съществува само един път. Графа на Фиг. 2.6 не е дърво, т.к. съдържа цикъла ABCDEFGA, докато графа

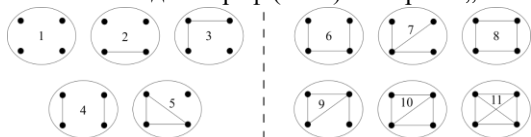


Фиг. 2.7 Към понятието „дърво“

от Фиг. 2.7 е точно дърво по определение. Във всяко дърво броя на ребра е с единица по-малък от броя на върховете. Двоично дърво – това е дърво с корен – Фиг. 2.7 съдържа ляво и дясно поддърво и корен [24].

Съществуват различни типове графи. На Фиг. 2.8 са показани 11 типа графи всеки с по четири върха. Характеризират се по следния начин:

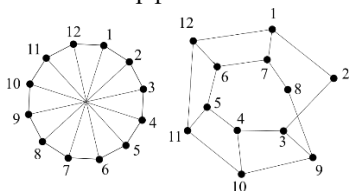
- Кой да е граф с четири върха е изоморфен на един от тях;
- Пет от графите (от 1 до 5), разположени вляво от заштрихованата линия, са „несвързани“;
- Шест от графите (от 6 до 11), разположени вдясно от заштрихованата линия, са „свързани“;
- Граф №1 е „пуст“ или напълно несвързан;
- Граф №8 с четири ребра образува „цикъл“;
- Последният граф (№11) се нарича „пълнен“ граф.



Фиг. 2.8 Различни типове графи с 4 върха

Счита се, че два графа са еднакви, или ако се използва техническия термин „изоморфни“, ако техните върхове се номерират с

цели числа 1,2,3 ... р така, че за кои да е два номера, върховете или съединят ребра на два графа, или не съединяват ребра на същата двойка графи. На Фиг. 2.9 представените графи на пръв поглед изглеждат различни, но всъщност те са изоморфни.

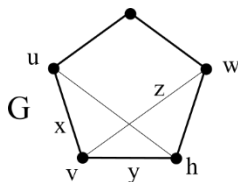


Фиг. 2.9 Изоморфни графи

На пръв поглед изглеждат различни, но всъщност те са изоморфни.

Разглеждаме свързан граф G , състоящ се от $p = 5$ върха и множество ребра (в случай броя на ребрата е седем). Означенията на

ребрата са прави по следния начин:



Фиг. 2.10 Свързан граф G

вте u и v са съвместими, а върховете u и w не са; ребрата x и y са съвместими, с x и z не са.

$x = u.v$; $y = v.h$; $z = v.w$ и т.н. Върховете u и v се наричат „съвместими“ върхове, те определят реброто x . По същия начин причината v и h съвместими. Върхът u и реброто x са инцидентни, така както v и x са инцидентни. Ако две различни ребра x и y са инцидентни на един връх (в случая върхът е v), то те са „съвместими“. За графа G от Фиг. 2.10 може да се каже, че върховете u и v са съвместими, а върховете u и w не са; ребрата x и y са съвместими, с x и z не са.

Два графа G и H са изоморфни ($G=H$), ако между множествата на техните върхове съществуват взаимно еднозначно съответствие, т.е. ако те са съвместими.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ВТОРА ГЛАВА

1. Разработена е методическа постановка за определяне на геометрични характеристики на разположение на осветителите. Дефинирани са показатели на разпределение на мощностите на осветителите по отношение на конкретни центрове на захранване, с което се дава качествено нова интерпретация на това понятие. Минимизирането на тези показатели по отношение на координатите на условни центрове на захранване, дава възможност да се формулират две основни задачи, свързани с оптимизиране на разпределението на осветителите и определяне на оптималния брой на захранващите източници. В синтезиран вид е представена препоръка, оптимизационните процедури да се извършват по критерий „минимум на приведените годишни разходи“.

2. Проведено е изследване на теоретични методи за анализ на конвенционалните загуби на мощност на електрическа енергия за улични ОУ. Синтезирана е универсална схемотехническа постановка, адекватно отразяваща характеристиките на външните осветителни уредби, изградени на магистрален принцип. Определено е отношението на относителните загуби на мощност и напрежение $\Delta P_M^*/\Delta U_M^*$ при различни параметри на силовите трансформатори и средна стойност на $\cos\phi$ ($\text{tg}\phi$). В табличен и графичен вид са представени тези зависимости, които дават възможност да се формулира опростен подход за оценка на загубите на мощност в зависимост от загубите на напрежение $\Delta P_M^* = f(\Delta U_M^*)$. При това тази удобна и практична поста-

новка се базира на използване на общо достъпни, лесно определими и в определени случаи тривиални параметри на магистралната мрежа, силовите трансформатори и осветителите.

3. Представени са технико-икономически аспекти за определяне на характеристиките на външни ОУ. Въз основа на метода на „Приведени годишни разходи“, подробно са анализирани компонентите и съставните части на експлоатационните разходи и капиталните вложения и са посочени възможностите за постигане на оптимални решения. Формулираната много параметрична задача може да се реши с помощта на специализирани софтуерни продукти, като се предоставя възможност за обобщена технико-икономическа оценка и анализ на резултатите на разработката. Постигането на оптимално разпределение на осветителите по захранващи източници и определяне на оптимален брой за захранващите източници е заложено като основен критерий в предложения технико-икономически подход в четвърта глава на разработката.

4. Разработените методики в параграф 2.1 и параграф 2.2 дава възможност за използване на утвърдени и ефективни постановки и научни теории от приложната математика, с която се осигурява постигане на по-убедителни и адекватни резултати. В тази връзка са представени основните понятия и характеристики на „Теория на графите“, като инструмент за решаване на задача в сферата на топологията. Описани са възможностите за нейното приложение представящи допълнителни предимства и изграждане на елементи на надстройка на разработените оптимизационни концепции.

ТРЕТА ГЛАВА

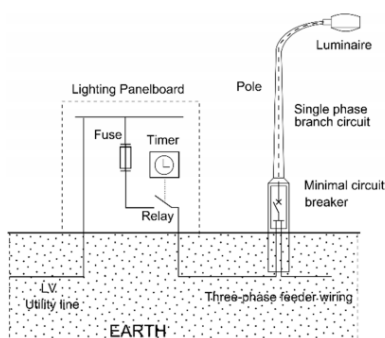
ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЗАГУБИТЕ НА МОЩНОСТ И ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ В ЗАВИСИМОСТ ОТ ТИПА НА ОСВЕТИТЕЛЯ, ПАРАМЕТРИТЕ И ГЕОМЕТРИЧНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ОСВЕТИТЕЛНА УРЕДБА

3.1 Оценка на загубите на активна мощност в комплексна улична осветителна уредба

Загубите на активна мощност в осветителните мрежи, се разглеждат като част от баланса на мощностите на осветителната уредба. Активната мощност на осветителната система се изчислява като сумата от мощността на осветителите P_k и мощността на други устройства, необходими за работа на осветителната система P_{ad} [95]:

$$P = \sum_{k=1}^{n_{ip}} P_k + P_{ad} \quad (3.1)$$

Осветителната уредба се състои от следните компоненти: Защитата на захранващия кабел в таблото за осветление, релейно димиране чрез астрономически часовник (или друго устройство за димиране), кабел на система за захранване, защита (поставена в стълба) на Фиг. 3.1 е показва принципна схема на инсталация за осветяване на пътя с основните ѝ компоненти. Общите загуби на мощност обхващат всички загуби на мощност, възникнали във всички гореспоменати компоненти на осветителната уредба. Отчетени са и загубите на мощност в неутралния проводник. Загубите в неутралния проводник се причиняват от потока на хармоници с по-високи и нулеви последователности и техният ред е кратен на три. LED осветителното тяло с устройство за захранване е нелинеен елемент, който генерира



Фиг. 3.1 Примерна схема на електроинсталация на улична осветителна уредба

смушения в захранващата мрежа (по-високи хармоници). В зависимост от конструктивното решение, THDI, определящ стойността на тези нарушения, е в границите от няколко до няколко десетки процента, което се потвърждава от резултатите от тестовете, представени в [51].

Общата загуба на мощност на осветителната инсталация ΔP може да се определи от следната сума [34]:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{Каб}} + \Delta P_{\text{H}} + \Delta P_{\text{П}} + \Delta P_{\text{АП}} + \Delta P_{\text{АПст}} + \Delta P_{\text{Конт}} \quad (3.2)$$

където: $\Delta P_{\text{Каб}}$ – загуби на активна мощност в захранващите кабели (W), ΔP_{H} – активните загуби в неутралния проводник (W), $\Delta P_{\text{П}}$ – активните загуби в захранващия проводник на стълба (W), $\Delta P_{\text{АП}}$ – активните загуби в защитната апаратура в касета (W), $\Delta P_{\text{АПст}}$ – загубите в защитната апаратура в стълба (W), $\Delta P_{\text{Конт}}$ – загубите в захранващият контактор (W).

Табл. 3.1 Относително процентно представяне на активните загуби

| $\Delta P_{\text{Каб}}$ (%) | ΔP_{H} (%) | $\Delta P_{\text{П}}$ (%) | $\Delta P_{\text{АП}}$ (%) | $\Delta P_{\text{АПст}}$ (%) | $\Delta P_{\text{Конт}}$ (%) | ΔP (W) | $\Delta P/P_{\text{мст}}$ |
|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------|
| 50,13 | 28,27 | 2,00 | 9,6 | 0,37 | 9,6 | 24,50 | 0,014 |

3.2 Оценка на енергийната ефективност при LED улични осветителни уредби.

Използването на LED източници на светлина в уличното осветление е пряко свързано с оценка на електроенергийната ефективност на осветителните уредби. Изборът на техническо решение се обуславя от оптималния баланс между направена инвестиция и постигнат технико-икономически ефект. Адекватната оценка на енергийната ефективност в системите улично осветление е актуален проблем, като в тази връзка през последните години бяха актуализирани групата стандарти EN13201 и бе приет изцяло нов стандарт БДС EN13201-5:2016 „Улично осветление. Част 5: Показатели за енергийна ефективност”.

В стандарта БДС EN 13201-5:2016 както беше показано в първа глава са представени два показателя - плътност на мощността на осветителната уредба (P_D) и годишен показател за потребление на енергия (A_{ECI}) D_E , които винаги трябва да се разглеждат заедно.

За сравнение между различни технически варианти се използва показателя за светлинна ефикасност на осветителната уредба η_{inst} .

Показателят за плътност на мощността се изчислява с формула (3.4) :

$$D_P = \frac{P}{\sum_{i=1}^n (\bar{E}_i \cdot A_i)} \quad (3.3)$$

Консумираната мощност на уредбата (P) се изчислява като сума от консумираната мощност от източниците на светлина, контролните уреди за управление на осветлението и загубите на мощност в пуско-регулиращата апаратура. Определя се за цялата осветителна уредба или за определен сегмент, който се използва в изследвания период. Изчисляването на P се извършва по формула (3.1) от параграф 3.1:

$$P = \sum_{k=1}^{n_{ip}} P_k + P_{ad} \quad (3.4)$$

Годишният показател за потребление на енергия се изчислява по формула (3.23):

$$D_E = \frac{\sum_{j=1}^m P_j \cdot t_j}{A} \quad (3.5)$$

Годишната консумация на електроенергия зависи от:

- продължителността на работните периоди на осветителната уредба;
- светлотехническият клас на улиците;
- ефективността на осветителната уредба за всеки работен период.
- начина, по който системата за управление на осветлението следва промяната във визуалните нужди на участниците в движението

Светлинната ефикасност се изчислява с помощта на израза:

$$\eta_{inst} = C_L \cdot f_M \cdot U \cdot R_{LO} \cdot \eta_{ls} \cdot \eta_P \quad (3.6)$$

Корекционният фактор за яркост се определя по формулата:

$$C_L = \sum_{i=1}^n (\bar{E}_{l\min} \cdot A_i) / \Phi_A \quad (3.7)$$

При проектиране по нормена яркост се приема:

$$\bar{E}_{l\min} = \frac{\bar{L}_{l\min}}{0,07} \quad (3.8)$$

Коефициентът на използване U се определя по формулата:

$$U = \frac{\Phi_A}{\Phi_{ls} \cdot n_{lu} \cdot R_{LO}} \quad (3.9)$$

Светлинният фактор на осветителната уредба се изчислява с формула (3.10).

$$q_{inst} = \frac{\bar{L}}{Q_0 \cdot \bar{E}} \quad (3.10)$$

Типични стойности по стандарт са $0.8 < q_{inst} < 1.3$

- *Експериментално изследване на три типа LED осветители за улично осветление.*

Експерименталното изследване включва три типа LED осветители, използващи трите най-разпространени технологии за оптични системи по отношение начините за формиране на светлоразпределението: от единични лещи (тип 1); с използването на индивидуални рефлектори раз-положени в различни равнини (тип 2); с различни лещи, разположени в една равнина на LED матрица (тип 3) (Фиг. 3.2).

Представено е симулационно изследване при проектиране на улично осветление със софтуер Dialux [30] и е извършен сравнителен анализ на получените резултати за трите типа осветители.

Светлоразпределението на осветителите е измерено експериментално с

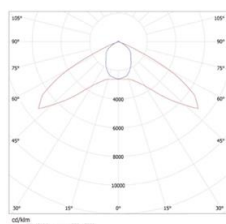


Тип 1 Тип 2 Тип 3

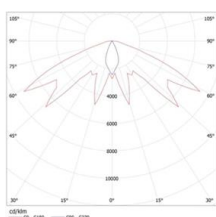
Фиг. 3.2 Видове изследвани LED осветители

гонифотометър в лаборатория „Светлинна техника” при Технически университет-Варна. От резултатите са съставени фотометрични файлове в ldt формат, като светлоразпределителните

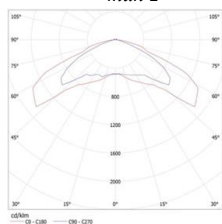
криви за трите осветителя са показани на Фиг. 3.3 Фиг. , Фиг. 3.4 и Фиг. 3.5. Отчетените електрически и светлотехнически параметри за осветителите са показани съответно в Табл. 3.2, Табл. 3.3 и Табл. 3.4.



Фиг. 3.3 LDT на осветител тип 1



Фиг. 3.4 LDT на осветител тип 2



Фиг. 3.5 LDT на осветител тип 3

Табл. 3.2 Параметри на осветител тип 1

| | | |
|-------------------------------------|----|-------|
| Светлинен поток - Φ | lm | 14832 |
| Изпитвателно напрежение – $U_{изп}$ | V | 229 |
| Ток - I | A | 0.677 |
| Мрежова честота - f | Hz | 50 |
| Активна мощност - P | W | 152.8 |
| Пълна мощност - S | VA | 154.8 |
| Фактор на мощността - PF | - | 0.99 |

Табл. 3.3 Параметри на осветител тип 2

| | | |
|-------------------------------------|----|-------|
| Светлинен поток - Φ | lm | 7377 |
| Изпитвателно напрежение – $U_{изп}$ | V | 230 |
| Ток - I | A | 0.55 |
| Мрежова честота - f | Hz | 50 |
| Активна мощност - P | W | 112.4 |
| Пълна мощност - S | VA | 128 |
| Фактор на мощността - PF | - | 0.88 |

Табл. 3.4 Параметри на осветител тип 3

| | | |
|-------------------------------------|----|------|
| Светлинен поток - Φ | lm | 5721 |
| Изпитвателно напрежение – $U_{изп}$ | V | 231 |
| Ток - I | A | 0.42 |
| Мрежова честота - f | Hz | 50 |
| Активна мощност - P | W | 93.6 |
| Пълна мощност - S | VA | 97.5 |
| Фактор на мощността -PF | - | 0.96 |

- *Симуляционно изследване на показателите за енергийна ефективност по БДС EN 13201-5:2016 при съставяне на проектни решения с трите типа осветители*

Обобщените данни за двете геометрии на улиците и трите типа осветители са показани в Табл. 3.5.

Табл. 3.5 Обобщените данни за двете геометрии на улиците и трите типа осветители

| Осветител | Транспортна артерия | n_{is} (lm/W) | q_{inst} (-) | D_p (W.lx-1.m-2) | n_{inst} (lm/W) |
|-----------|---------------------|--------------------|----------------|-----------------------|----------------------|
| LED 1 | булевард | 96,94 | 0,732 | 0,0240 | 11,742 |
| LED 2 | булевард | 65,28 | 0,882 | 0,0209 | 31,349 |
| LED 3 | булевард | 60,86 | 0,851 | 0,0108 | 25,455 |
| LED 1 | улица | 94,94 | 0,728 | 0,0480 | 3,164 |
| LED 2 | улица | 65,28 | 0,909 | 0,0401 | 6,517 |
| LED 3 | улица | 60,86 | 0,871 | 0,0327 | 9,009 |

В изследването са използвани осветители от средноценови клас, притежаващи ниски стойности за светлинен добив за LED технология – от 60 до 100 [lm/W], като осветителите са модели на производство в периода 2007-2012 г. Проведеното изследване показва, че те могат да покриват изискванията на стандарта за енергийна ефективност от 2016 г. Проведеното изследване потвърждава, че в много случаи решаващо за ефективността на проектното решение не е светлинния добив, а оптималната комбинацията между светлинен добив, инсталирана мощност, брой осветители и оптимално светлоразпределение. В конкретния характерен случай е онагледено как проектно решение с осветител с 50% по-лош светлинен добив (Геометрия 2 LED3 в сравнение с LED1) може да има по-високи показатели q_{inst} и η_{inst} , като за вторият разликата е 2.5 пъти.

ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ТРЕТА ГЛАВА.

1. В съответствие с изискванията на стандарта БДС EN 13201 – 5, е направена аналитична оценка на загубите на активна мощност в комплексна ОУ. За целта е предложен диференциран подход, с помощта на който се определят загубите на активна мощност във всички елементи на уличната ОУ. Методът е приложим както за трифазни, така и за еднофазни осветителни

инсталации. Направен е анализ и са оценени някои нетрадиционни фактори, като нивото на димиране, топологията и конфигурацията на мрежата, влияещи съществено върху загубите на активна мощност. За конкретна ОУ. Изследването потвърждава тезата за необходимостта от дефиниране на адекватна методика за прецизиране на приноса на всеки елемент към общите загуби на активна мощност на ОУ.

2. Представената постановка може ефективно да се използва в проектантската практика при прилагане на многовариантно проектиране. При него се изисква светлотехническата задача да се дефинира, като се приеме най-добрият вариант. В конкретния случай оптимизационният модел може да се осъществи по критерий минимални загуби на активна мощност или максимална електроенергийна ефективност. Решаването на задачата в съответствие с маркираните критерий ще доведе и да друг съществен ефект в експлоатацията на съоръженията, а именно постигане на висока надеждност, безотказност и устойчивост на ОУ.

3. Синтезирана е методическа постановка и е проведено експериментално изследване за определяне на електроенергийната ефективност на улична ОУ, изпълнена с LED осветители. В изследването са включени три различни светодиодни осветителя с различни оптични системи, използващи най-прогресивни технологии. Фотометрирането на осветителите е проведено с помощта гониофотометър и сфера на Улбрихт в лабораторията по светлинна техника на ТУ-Варна. Симулационният модел на показателите за електроенергийна ефективност е построен за две характерни геометрии за булевард и улица. Проведен е сравнителен анализ на годишния показател за потребление на електрическа енергия D_E , светлинната ефикасност η_{inst} и светлинния фактор на осветителната уредба q_{inst} за трите осветителя при две характерни геометрии. Получените резултати са нееднозначни, но убедително се потвърждава тезата, че оценката по няколко показателя подобрява техниката – икономическата обосновка на различните проектни решения. По отношение на използваните осветители, не може да се твърди категорично за предимства на някои от технологиите за оптични системи, т.к. ефективността им зависи от геометричните и топологичните особености на ОУ.

4. Симулационното изследване е проведено за три типа LED осветители (LED1, LED2, LED3) и при различни топологични и геометрични характеристики на осветителната уредба. Потвърдено е, че геометрията на уличната ОУ оказва съществено влияние върху изследваните светлотехнически характеристики D_p , η_{inst} , q_{inst} . Установено е, че по отношение на светлинна ефикасност η_{inst} , за геометрия №1 (булевард с две платна, всяко по две ленти клас M3), най-удачно е решението с LED №2, а при геометрия №2

(улица с едно платно, по една лента във всяка посока, светлинен клас M4), най-добро е решението с осветител LED3. Подобни зависимости между светлотехническите и топологическите характеристики, за установени и за другите светлотехнически показатели D_p и q_{inst} . Следователно пряка зависимост между топологичните и геометричните показатели на уличните ОУ и техните енергоефективни показатели, респективно системата на електрооснабдяването.

5. С това изследване се потвърждава възможността за използване на един от най-ефективните в проектантската светлотехническа практика софтуерни продукти – DIALUX. Следователно, дефинираните в стандарта показатели за енергийна ефективност имат своята софтуерна реализация и трябва да бъдат неразделна част от съвременните прогресивни проекти за улично осветление.

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

ИЗСЛЕДВАНЕ И ОПТИМИЗИРАНЕ НА ЕЛЕКТРООСНАБДЯВАНЕТО И ЕНЕРГИЙНИТЕ РАЗХОДИ НА ВЪНШНИ ОСВЕТИТЕЛНИ УРЕДБИ ПО РАЗЛИЧНИ КРИТЕРИИ.

4.1 Оптимално разпределение на осветителите по захранващи източници

В съответствие с теоретичната постановка, представена в параграф 2.1, разположението на осветителите по улични касети или захранващи източници (ЗИ), може да се представи с помощта на показателя на разпределение R_x и R_y и обобщения показател на разпределение R^2

За постигане на оптимално разпределение на осветителите по ЗИ най-напред се разлага показателя на разпределение R^2 на съставящи по следния алгоритъм. Нека множеството G на ЕП Z_i , $i = 1, 2, \dots, n$ се разбие на S произволни групи, като $j=1, 2, \dots, s < n$. Записваме показателя на разпределение R^2 от множеството осветители G относно точка имаща координати a, b :

$$\begin{aligned}
 R^2 &= \sum_{i=1}^n P_i [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2] \\
 &= \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^{m_j} P_i [(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2]
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

където: m_j – брой осветители на j -тата група [10].

Разлагането на този показател става с помощта на преобразуването:

$$R^2 = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^{m_j} P_i \{[(x_i - \xi_{0j})^2 + (\xi_{0j} - a)^2] + [(y_i - \eta_{0j})^2 + (\eta_{0j} - b)^2]\} \quad (4.2)$$

където:

$$\xi_{0j} = \frac{\sum_{i=1}^{m_j} P_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^{m_j} P_i} \quad \eta_{0j} = \frac{\sum_{i=1}^{m_j} P_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^{m_j} P_i}$$

са координати на ЦЕТ на j група осветители.

Следователно може да се използва в качеството на ЦФ за решение на следните задачи:

1. Оптимално разпределение на ЕП по ЗИ и определяне местоположението на тези ЗИ в ЦЕТ на отделни групи осветители. Решаването на тази задача е в основата на това разглеждане и е непосредствено показана по-долу.

2. Определяне на оптимален брой ЗИ за дадено множество осветители. Тази задача е разгледана в следващия параграф

За ЦФ при решаване на първата задача може да се използва първото слагане на (4.4) и (4.7):

$$\text{ЦФ} \equiv \sum_{j=1}^s R_j^2 = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^m P_i [(x_i - \xi_j)^2 + (y_i - \eta_j)^2] \quad (4.3)$$

където: ξ_j и η_j ($j=1,2,\dots,s$) са търсените координати на местоположението на ЗИ. Минимизирането на ЦФ (4.8) още на етап проектиране на осветителна уредба ще доведе до намаляване на ПГР за построяването и при експлоатацията на ЕСС на тези групи ЕП.

ЦФ се дефинира по следния начин. **Изисква се дадено множество G на осветители z_i с номера $i=1,2,\dots,n$, товари P_i известни координати $(X_i ; Y_i)$ да се разбие на S не пресичащи се групи A_j ; $j=1,2,\dots,s < n$ съобразно зададения брой ЗИ, така че ЦФ (4.8) да има най-малка стойност.**

В качеството на критерии за приобщаването на осветителите Z_i с координати (x_i, y_i) към групата A_j с център (ξ_j, η_j) се използва следното правило:

$$Z_i \in A_j \text{ ако } (x_i - \xi_j)^2 + (y_i - \eta_j)^2 < (x_i - \xi_l)^2 + (y_i - \eta_l)^2 \quad (4.4)$$

$l=1,2,\dots,s$; $l \neq j$

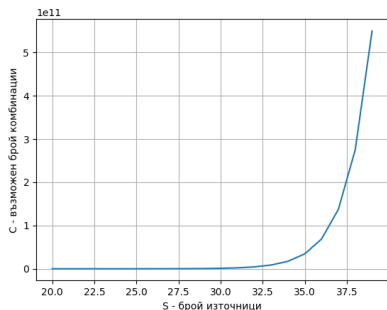
т.е. осветител Z_i с номер i се приобщава към група A_j когато разстоянието от мястото на разположението му (x_i, y_i) до центъра (ξ_j, η_j) е най-малко.

Ограничителните критерии на тази целева функция могат да бъдат броят на ЗИ и брой на осветителите тъй като с увеличаване на броя им броят на итерациите също расте. Това можем да го провери чрез броят на възможните комбинации, като използва следната формула:

$$C(n, r) = \binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$$

Ако вземем пример с 560 ЗИ и 280 от тях да използваме, ще получим 1.271890543^{167} възможни комбинации което е изключително голямо число и би било трудно да се сметне дори и от съвременните компютри.

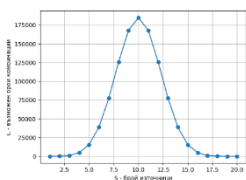
Затова можем да намалим броят на ЗИ и осветители т.е. ще разгледаме само част от УО на гр. Варна. За да се провери колко на брой ЗИ е удачно да се използват, се разглежда следната графика (4.2) [7]:



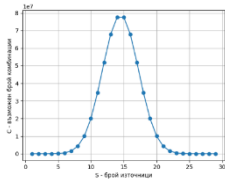
Фиг. 4.2 Нарастване на броят на комбинациите между 20 и 40 ЗИ

Тя показва бързо нарастване на броят възможни комбинации при между 20 и 40 ЗИ. Фиг.4.3 показва разпределението на комбинациите при 20 ЗИ, а Фиг.4.5 при 40 ЗИ. Нарастването е с 524288.49 пъти повече т.е. трябва да се намери рационален брой ЗИ за изчисление. Фиг.4.4 представлява разпределението при 30 ЗИ, нарастването тук е 1024 пъти спрямо 20 ЗИ. Вижда се че най-удачно ще

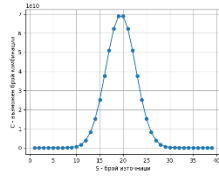
бъде използването на 20 ЗИ. Такъв обем от източници можем да използваме част от квартал на гр. Варна представен на фиг.4.8.



Фиг. 4.3 Комбинации при 20 ЗИ



Фиг. 4.4 Комбинации при 30 ЗИ



Фиг. 4.5 Комбинации при 40 ЗИ

Поради големината на и сложността на изчисленията алгоритъмът е разделен на три части описани в приложение 1.

Избрана е част от ОУ на кв. Левски която съдържа 20 бр. ЗИ и 479 улични осветителя [7] представена на Фиг. 4.6 Генералният план на осветителната уредба съдържа следната информация: тип на осветителя, координати по x, y и неговата мощност, както и информация коя улична касета с кой трансформатор е свързана. Алгоритъма представлява интерпретирането на (4.8), като разпределението започне от само с един случайно избран осветител и се добавят всички осветители към него, след което се премине към вторият източник и отново се добавял всички осветители към него. Това продължава до последния източник.

След това се избират два произволни източника и отново се прави

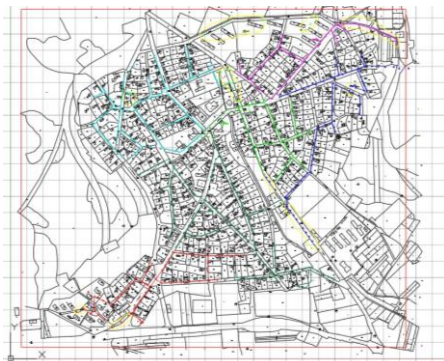


Фиг. 4.6 Схема на част от ОУ на кв. Левски

разпределение на осветителите между тях, след което се заменя единият източник с произволен и отново се прави разпределение. Това продължава докато не се изпълнят всички възможни комбинации споменати по-горе.

Създава се база данни с всяко едно възможно разпределение между ЗИ и осветителите. На база на това разпределение се използва ЦФ (4.8) за определяне на най-добрата възможна комбинация. Като критерии отново е разходът за цветен метал (т.е. сумата на минималното разстояние между ЗИ и всеки един осветител). Аналогично изследване е проведено и за осветителната уредба на кв. Повеляново гр. Девня. Тя се състои от 447 осветителя, запазени от 6 бр. улични касети, в съответствие с генплана на УОУ на квартала Фиг. 4.8.

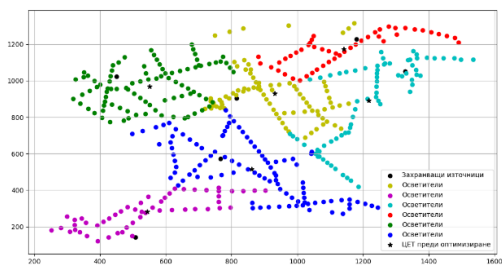
Системата за анализ, представена тук, е разработена изцяло с помощта на езика за програмиране от високо ниво Python, който е с отворен код.



Фиг.4.8 Генерален план на УОУ на кв. Повеляново.

Фиг. 4.10 представлява образ на осветителната уредба след като бъдат импортирани данните и различен цвят са представени отделните групи, маркирани са техните захранващи улични касети и по формула 2.6 са определени центровете на електрическите товари за съответната група. От колона 6 на Табл. 4.2 се вижда разлика в раз-

стоянията между ЗИ и ЦЕТ, като в повечето случаи това разстояние е над



Фиг. 4.10 Изглед след импортиране на данните

100 м (средно за 6-те групи разстоянието е 124 м.) Това е показател, че има нужда от оптимизация защото с увеличаване на разстоянието между ЗИ и ЦЕТ се увеличават загубите на мощност и ЕЕ в резултат на по-ниското напрежение. Увеличават се

също така и загубите на напрежение и се влошава качеството на електрическата енергия.

Табл.4.1 Първоначално положение на УОУ

| | Координати на ЗИ | | Координати на ЦЕТ | | Разлика между ЗИ | Брой осв. в група |
|---------|------------------|---------|-------------------|---------|------------------|-------------------|
| | X | Y | X | Y | | |
| Група 1 | 765,8 | 571,6 | 861,5 | 515,3 | 111,03 | 84 |
| Група 2 | 450,98 | 1022,01 | 550,47 | 969,5 | 112,50 | 53 |
| Група 3 | 1179,82 | 1228,19 | 1140,9 | 1173,27 | 67,31 | 72 |
| Група 4 | 1327,34 | 1051,29 | 1218,02 | 889,73 | 195,07 | 47 |
| Група 5 | 508,08 | 142,61 | 544,32 | 2281,66 | 143,69 | 92 |
| Група 6 | 815,08 | 903,17 | 930,98 | 929,73 | 118,92 | 99 |

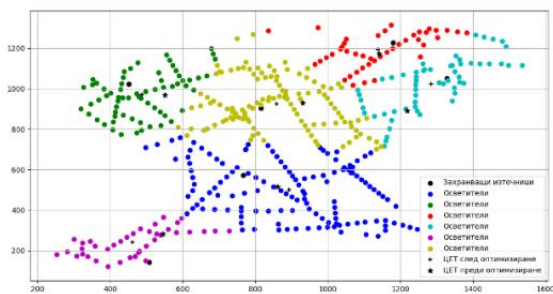
Създадено е приложение което използва правило (4.9) е изисква дадено множество G на осветители z_i с номера $i=1,2,\dots,n$, товари P_i известни координати $(X_i; Y_i)$ да се разбие на S не пресичащи се групи $A_j; j=1,2,\dots,s < n$ съобразно зададения брой ЗИ, така че ЦФ (4.8) да има най-малка стойност.

След прилагане на оптимизационния подход се наблюдава преразпределение на потребители по ЗИ. Група 1 е нараснала с 45 осветителя, група 2 е нараснала с 12 осветителя, група 3 е намалила с 30 осветителя, група 4 се е увеличила с 10 осветителя, група 5 е намалила с 54 осветителя и група 6 се е увеличила с 18 осветителя. Това разпределяни се е получило на база оптималното разстояние между ЗИ и осветители. На Фиг. 4.11 са представени визуално резултатите, наблюдава се доближаване на ЦЕТ до ЗИ. Табл. 4.2 резултатите са представени в табличен вид.

Табл.4.2 Резултати след оптимизация

| | Координати на ЗИ | | Координати на ЦЕТ | | Разлика между ЗИ м | Брой осв. в група |
|---------|------------------|---------|-------------------|---------|-----------------------|----------------------|
| | X | Y | X | Y | | |
| Група 1 | 765,8 | 571,6 | 892,31 | 468,46 | 146,13 | 129 |
| Група 2 | 450,98 | 1022,01 | 486,98 | 971,14 | 62,32 | 65 |
| Група 3 | 1179,82 | 1228,19 | 1137,18 | 1194,87 | 54,11 | 42 |
| Група 4 | 1327,34 | 1051,29 | 1284,32 | 1022,79 | 51,60 | 57 |
| Група 5 | 508,08 | 142,61 | 461,81 | 241,22 | 108,93 | 38 |
| Група 6 | 815,08 | 903,17 | 857,94 | 924,26 | 47,77 | 117 |

От резултати се вижда новото разпределение на осветители по групи и разликата в разстоянията между ЗИ и ЦЕТ, като средното разстояние е 78м.



Фиг. 4.11 Резултат след оптимизиране

Разработеният алгоритъм дава възможност задачата да се решава на софтуерни продукти от високо ниво. Ефекта на оптимизационния процес се изразява не само в определяне на оптималното разпределение на осветителите към захранващите източници, но и чрез получените конкретни

Изследванията, проведени в два различни обекта, показват приложимостта на дефинираната оптимизационна задача, както на ниво проектиране, така и при извършване на модернизация и рехабилитация на ОУ.

числени стойности за разстоянията между хранващия източник и центрoвете на групите осветители. Средната стойност на този параметър за обект „Повеляново“ се е намалил от 124 м на 74 м.

4.2 Оптимален брой на хранващи източници по критерий минимум на ПГР.

В параграф 4.1 беше дефинирана целева функция за решаване на две задачи. Втората задача е свързана с оптимизиране на броя на хранващите източници.

ЦФ се дефинира по следния начин: *За дадено множество G на ЕП Z_i с номер $i=1,2,..,n$ и товари P_i с координати $(x_i; y_i)$ да се намери оптимален брой на ЗИ. Тази задача може да се реши по критерий на минимум на разходите на цветни метали. Ако са известни относителните ПГР Z_1 и Z_2 , определени за единица показател на разпределение съответно за разпределителната и хранваща мрежа, то ПГР Z може да се запише:*

$$Z = Z_1 \sum_{j=1}^s R_j^2 + Z_2 \sum_{j=1}^s R_{0j}^2 \quad (4.5)$$

Но данни за Z_1 и Z_2 в проектантската практика не съществуват, затова ЦФ за ПГР се представят в следния вид:

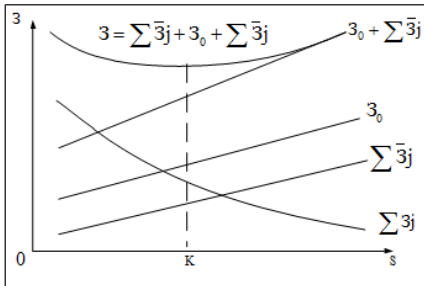
$$Z = \sum_{j=1}^s \sum_{i=1}^{m_j} Z_i \sqrt{(x_i - \xi_j)^2 + (y_i - \eta_j)^2} + \sum_{j=1}^s Z_j \sqrt{(\xi_j - a_j)^2 + (\eta_j - b_j)^2} = \sum_{j=1}^s Z_j + Z_0 \quad (4.6)$$

където: Z_i и Z_j – относителните ПГР за единица дължина на линиите в разпределителната мрежа; S – търсеният брой ЗИ; ξ_j и η_j – координатите на разположение на ЗИ; a_j и b_j – координатите на разположение на централния ЗИ.

Първото слагаемо на (4.6) $\sum_{j=1}^s Z_j$ представлява разходите на разпределителната мрежа НН или СН, свързваща проектираните ЗИ с осветителите в отделните групи: второто слагаемо Z_0 представлява ПГР на хранващата мрежа, свързваща централния ЗИ с координати (a, b) с проектираните ЗИ. При необходимост ЦФ (4.10) може да бъде допълнена с още едно събираемо $\sum_{j=1}^s \bar{Z}_j$ отчитащо ПГР \bar{Z}_j на отделните ЗИ. Тогава ЦФ ще бъде:

$$Z = \sum_{j=1}^s Z_j + Z_0 + \sum_{j=1}^s \bar{Z}_j \quad (4.7)$$

При изменение на броят на ЗИ от $S=1$ до $S=K$ ЦФ (4.10) и (4.11) изменя своите стойности като първото слагаемо намалява, а второто се увеличава. Следователно съществува такава стойност на ЗИ $S=K$, при която ЦФ (4.10) и (4.12) ще имат минимум. Определянето на тези минимума може да стане по итерационен метод чрез групиране на осветителите в две, три и повече групи и определяне на ЦФ по (4.10) и (4.12). На Фиг. 4.12 е представено примерно графично изображение на постановката, разяснена по-горе и формализиране с израза (4.12). От фигурата се вижда, че при брой на ЗИ $S=K$ ПГР имат минимум и следователно това е оптималния брой на ЗИ.

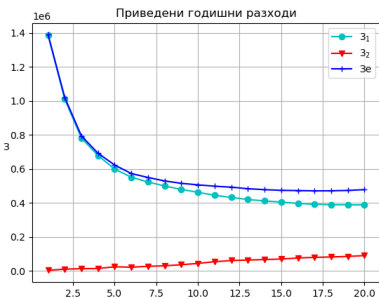


Фиг. 4.12 Примерно изображение на разпределение на загубите

Изследването е направено за същата част от осветителната уредба на кв. Левски в гр. Варна. Броят на захранващите източници е 20, осветителите са 479, а дължината и сечението на захранващите линии съответно за разпределителната и захранващата мрежа, се определят от кадастралните карти. Методът

изисква използването на относителните ПГР за единица дължина на захранващите и разпределителни линии. Тъй като те не са известни можем да ги заменим с разходите на цветен метал при изграждането на уличната осветителна уредба съответно: Z_i и Z_j – относителните разходи на цветен метал за единица дължина на линиите в разпределителната и захранваща мрежа; S – търсеният брой ЗИ; ξ_j и η_j – координатите на разположение на уличните касети; a_j и b_j – координатите на разположение на захранващите източници на касетите.

Минимумът на функцията показва, че оптималният брой захранващи източни е 16 т.е. постигната е оптимизация като е намален броят на източниците. Добри резултати би дал алгоритъма при правилно зададени



Фиг. 4.13 Приведени годишни разходи за ОУ

разходи Z_i и Z_j в включването на всички строително монтажни работи при ново изградена или препроектирана улична осветителна уредба. Често разходите по захранващите касети могат да бъдат в пъти по-големи сравнение с единична цена на осветител. Това зависи от системата за управление, наличието на измервателни уреди за регистрация на консумираната електро енергия, контролери за комуникация и управление. Също така

цената на захранващите кабели на уличните касети може да е в пъти по-голяма от тази за захранване на уличните осветители. Като пример можем да посочим че типичен захранващ кабел СВТ 3x25 mm² за захранване на улична касета към момента има цена над 20 лв/м докато кабел AL/R 2x6 1.97 лв/м т.е. разликата е около 9 пъти. Естествено, има разлика в сеченията на кабелите, но цените не са пропорционални.

4.3 Създаване на оптимизирана топология на захранваща мрежа на ОУ с помощта на „Теория на графите“

След определяне оптималният брой на ЗИ и разпределението между тези ЗИ и уличните осветители можем да пристъпи създаване на нова топология на захранващата мрежа чрез алгоритъм на Kruskal за Оптимално покриващо дърво в съответствие с параграф 2.4.2. За създаването на топологията трябва да се направят следните стъпки [63]:

1. Създаване на структура Граф, като всеки възел от дадения граф е уличен осветител или захранваща касета, а връзките между тях представляват проводниците.
2. Създаване на пълен Граф, като връзките представляват всяка една възможна връзка между касета-осветител и осветител-осветител.
3. Прилагане на алгоритъм на Kruskal за създаване на минимално разтягащо дърво, от вече създадения пълен граф.

За създаването на Граф структурата е удачно да се използва пакетът NetworkX на програмният продукт Python, той служи за създаване, обработка и изучаване на структурата и функциите на сложни графи. Продуктът съдържа следните основни типове графи в неговите класове [60].

- **Graph**
- **DiGraph**
- **MultiGraph**
- **MultiDiGraph**

При създаването на граф първо трябва да се избере какъв да е неговият тип. Графът е съвкупност от връзки и възли, които могат да са свързани помежду си. Често се добавят и атрибути на връзки и възлите. За представянето на ОУ като граф е удачно да се използва не насочен граф, тъй като няма нужда от посочване на посока на връзките между възлите [38].

Следващата стъпка е какви връзки и възли трябва да се използват, в случаят с репрезентирането на улична осветителна уредба, всеки възел трябва да съдържа в себе си идентификационен номер, координати X и Y който се позицията на уличната касета или осветителя всеки от ген планът. Тъй като на този етап все още не са създадени връзки между отделните възли които вече представляват улични осветители все още към тях не се добавят атрибути.

На базата на предходните оптимизации при вече намерен оптимален брой захранващи източници и оптимално разпределение на осветителите между тях и е създаден граф за група 1 от обект ОУ в кв. Левски, като с номер 0 е представена уличната касета, а останалите номера са уличните осветители.



Фиг. 4.14 УОУ като несвързан граф

На Фиг. 4.14 е показана визуализация на създадената структура, вижда се разположението на осветители че отговаря на това от ген планът.

При вече създадената структура след да се добавят връзките между отделните възли, в случаят на ОУ това ще представляват захранващите проводници, тъй като

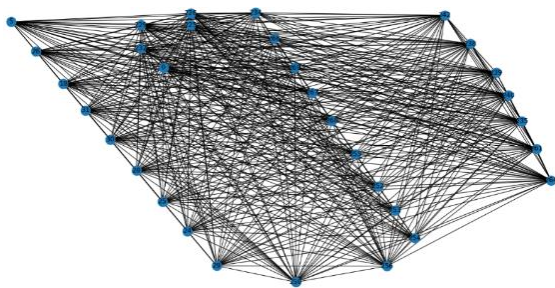
възможните комбинации на тези връзки са изключително много и удачно да се използва оптимизационен алгоритъм който на база определени критерии за определи най-оптималният начин за свързване на осветителите един с друг и захранването им към захранващата касета.

За използването на алгоритми способни да изпълнят оптимизационната задача най-често са алгоритми за „Минимални растящи дървета“. Те представляват подмножество от връзки на свързан не насочен тегловен граф, който свързва всички възли заедно, без цикли и с възможно най-малко сумарно тегло на връзките. Класическите алгоритми за тази оптимизация са следните:

- **Boruvka**
- **Prim/Dijkstra**
- **Kruskal**

За прилагането на които и да е от трите алгоритъма се изисква да има създаден **пълен граф** т.е. всяка двойка от върхове от графът е свързана с връзка [46] [56].

На Фиг. 4.15 е представен напълно свързан граф за един сегмент от ОУ, като са показани всички възможни взаимовръзки. Всяка една връзка представлява геометричното разстояние между възлите, които свързва, теглото за връзката представлява това разстояние в метри. След прилагането на алго-

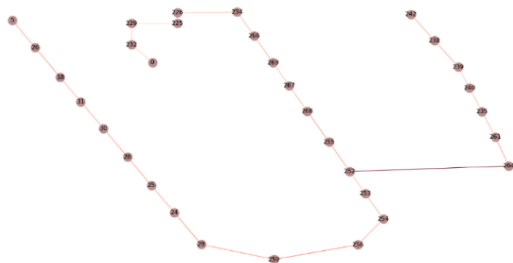


Фиг. 4.15 Напълно свързан граф на сегмент от ОУ

нарстващ ред на тегловните им коефициенти.

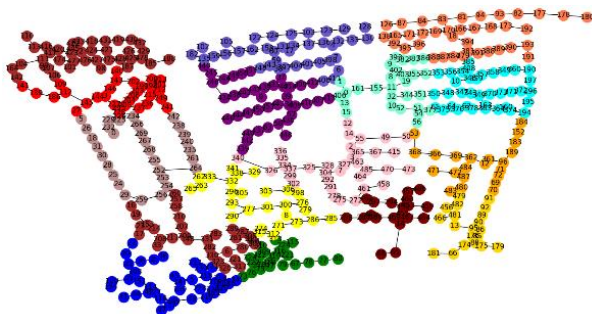
ритъм на Kruskal се получава новосъздадената структура на Фиг. 4.15 като е започнато с ребрата с най-малки тегловни коефициенти [28]. След това едно след друго започват да се добавят следващите ребра по

Построяването започва от осветители №225 и №226 и тегловен коефициент между тях 11,99 м. следващият по големина тегловен коефициент е 19,24 м. между осветители №225 и №229, следващата стъпка е между осветители №232 и №0 (което се явява захранващата касета) с тегловен коефициент 21,71 м. така вече има създадено дърво със следните връзки (225, 226), (225, 229) и (232, 0). Всяка следваща стъпка



Фиг. 4.16 Оптимизиран сегмент на ОУ след прилагане на алгоритъм на Kruskal

добавя връзки към дървото като увеличава тегловният коефициент т.е. разстоянието между осветителите. След като е обходен целият граф и са свързани всички възли без наличие на цикли може да се счете че е построено минимално растящо дърво. Полученото дърво за изследваният участък от ОУ е представено на Фиг. 4.16. Прилагането на алгоритъма на Kruskal за всички 16 групи, създава цялостна система показан на Фиг. 4.17.



Фиг. 4.17 Улична осветителна уредба представена като граф

В табличен вид в Табл. 4.6 са представени общите дължини на трасетата за отделните участъци. Представените участъци се генерират автоматично при създаването на графът, едно от предимствата при работа с такъв тип структури, е че цялата информация относно графът се съдържа вътре с него (номер на възел, атрибути на възел (координати x, y), връзки между отделните възли, тегла на връзките и възлите) тъй като тази информация е динамична позволява да се модифицира по всяко едно време и да се използва по удобен начин.

Резултатите от оптимизацията имат следното числено изражение: Брой из-

Табл. 4.6 *Обща дължина на участъците*

| № на участък | Разстояние (м) |
|--------------|----------------|
| Участък 1 | 948,50 |
| Участък 2 | 852,38 |
| Участък 3 | 688,23 |
| Участък 4 | 401,81 |
| Участък 5 | 823,58 |
| Участък 6 | 735,24 |
| Участък 7 | 976,45 |
| Участък 8 | 784,05 |
| Участък 9 | 865,91 |
| Участък 10 | 753,77 |
| Участък 11 | 650,35 |
| Участък 12 | 472,47 |
| Участък 13 | 503,13 |
| Участък 14 | 952,44 |
| Участък 15 | 1005,43 |
| Участък 16 | 639,88 |

точници преди оптимизация – 20 бр. след оптимизация 16 бр. Обща дължина на трасето 13 500 м [21]. по предварителни измервания от предоставената архитектурна подложка. След оптимизация общата дължина на проводниците се е намалила на 12 000м. Това показва че имаме намаляване на дължината на проводниците с 1 500 м. При заложена цена в оптимизационния алгоритъм за най-масово използвания проводник в ули-

ните осветителни уредби NYU 4x6 мм² от 11.65 лв/м без ДДС е постигната икономия от 17 475 лв., като тази стойност е само стойността на проводника, без да се взимат предвид всички СМР които трябва да бъдат изпълнени.

ОСНОВНИ ИЗВОДИ И РЕЗУЛТАТИ КЪМ ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

1. Въз основа на методическата постановка в параграф 0 е доразвит теоретичен модел на обобщения показател на разпределение R^2 , обхващащ разпределителната и захранващата мрежа НН. Дефинирана е целева функция, с помощта на която може да се реши задачата за оптимално разпределение на осветителите по захранващи източници. За тази цел е формулиран критерий и създаден алгоритъм , минимизиращ целевата функция. За два конкретни обекта (кв. Левски и кв. Повеляново) е определен целесъобразен брой захранващи източници и е извършено оптимално разпределение на осветителите по тези източници. Изчисленията са проведени в помощта на езика за програмиране от високо ниво Python. Глобалния ефект от оптимално разпределение на осветителите дава отражение върху средната стойност на разстоянията между захранващите източници и центровете на групите осветители, която чувствително се намалява след провеждане на оптимизационни процедури.

2. Създадена е методика за определяне на оптимален брой на хранващите източници, като е формулирана целева функция по критерии минимум на приведени годишни разходи с това се постига всеобхватност, пълнота и завършеност на изследването, както в теоретичен, така и в практично-приложен план. Аprobацията на теоретичния модел е извършена за част от осветителната уредба в кв. Левски, гр. Варна. Получените резултати, представени в табличен вид и графичен вид, потвърждават приложимостта, достоверността и твърдостта на методиката. Съществено намаление на хранващите източници, след провеждане на оптимизационните процедури, потвърждава ефикасността на синтезираната методика.

3. За създаване на оптимизирана топология на хранващата мрежа, е приложена „Теория на графите“. С помощта на алгоритъма на Kruskal е създаден пълен граф, като всеки възел на дадени граф е уличен осветител или хранваща касета, а „ребрата“ между тях са кабелните линии. При това се реализират всички възможни връзки между касета-осветител и осветител-осветител и на тяхна база е създадено минимално растящо дърво. В резултат на оптимизационната процедура общата дължина на кабелната линия се редуцира от 13 500. м до 12 000 м., а приведените годишни разходи се намаляват с около 10%.

ОБЩИ ИЗВОДИ КЪМ ДИСЕРТАЦИОННАТА РАБОТА

1. Направеното проучване на голям брой литературни източници, нормативни документи и анализа на реализирани прогресивни ОУ дава възможност за изработване и прилагане на реформаторски подход по отношение на функциите, предназначението и изискванията към външни ОУ. Утвърждава се иновативна постановка и концепция за всеобхватно, много критерийно и много факторно разглеждане на външните ОУ, като светотехническите, ергономичен, електротехнически и топологичен обект. Необходимо е в този много пластов комплекс да се отчита приоритетно влиянието на електроснабдителните фактори, като режимите на експлоатация, качеството на ЕЕ, загубите на мощност и напрежение, надеждността и устойчивостта на системата, както и топологичните и структурните особености на хранващата мрежа. По аналогичен начин стой въпроса и за прилагането на стандартите и нормите за външни ОУ – те трябва да се използват с отчитане на тяхната взаимосвързаност със стандартите за качество на ЕЕ, електромагнитната съвместимост и надеждността на електроснабдяването.

2. Разработени са методични постановки за оптимизиране на структурата, топологията и геометричните характеристики на външни ОУ, като са апробирани иновативни технологични решения за оптимално разпределение на осветителите и оптимален брой на захранващите източници. Представени са адаптирани теоретични подходи за анализ и оптимизация на загубите на мощност и електроенергийната ефективност, както и методи за технико-икономическа оценка на ОУ. Синтезирани са и са предложени методи за използване на основни теоретични постановки от „Теория на графите“, като ефективен раздел от приложната математика, за решаване на топологични задачи.

3. С използването на адекватна методика, даваща възможност за прецизиране на приноса на всеки елемент от външната ОУ към общите загуби на мощност, е проведено изследване в реални улични ОУ. При това са взети предвид и е направена оценка и анализ на няколко нетрадиционни фактори, като например нивото на димиране, топологията и конфигурацията на мрежата и др., които имат съществено влияние върху загубата на мощност. Тъй като задачата е много-критерийна и много-параметрична, използването ѝ в проектантската практика, при много-вариантно проектиране, също е целесъобразно и ефективно.

4. Проведено е експериментално изследване за определяне на електроенергийната ефективност на фотометрирани LED осветители за две характерни геометрични дадености (булевард и улица). Сравнителния анализ на резултатите, получени от три стандартизирани показателя за електроенергийната ефективност (D_E , η_{inst} , q_{inst}) показват, че не могат да се направят еднозначни оценки за техните приоритети в различните варианти. По този начин се потвърждава убедително тезата, че използването на няколко показателя подобрява технико-икономическата обосновка на различните проектни решения. Следователно, прилагането на комплексен много факторен подход при оценката на електроенергийната ефективност, е подход с висока адекватност, значимост и тъждественост.

5. Проведено е симулационно изследване с използване на софтуерния продукт DIALUX за три типа LED осветители при две характерни геометрични дадености (булевард и улица). Установено е, че LED източниците имат нееднозначен приоритет по отношение на геометричните характеристики. Следователно съществува силно изразена зависимост между топо-

гичните геометричните показатели на външните ОУ и съответните стандартизираните показатели за електроенергийната ефективност респективно характеристиките и особеностите на системата на електроснабдяване. Освен това се установява, че показателите за електроенергийна ефективност, чрез DIALUX имат своята софтуерна реализация и приложимост в съвременните проекти за улично осветление.

6. Проведено е изследване в осветителните уредби на кв. Левски и кв. Повеляново на гр. Варна и гр. Девня за установяване на оптимално разпределение на осветители и определяне на оптимален брой на захранващите източници. За целта са дефинирани целеви функции и са формулирани критерий за оптималност. Получените резултати потвърждават приложимостта, достоверността и тъждествеността на представената методика. Ефекта от нейното приложение се изразява в чувствително намаляване на средната стойност на захранващите кабелни линии и съществено намаляване на броя на захранващите източници (улични касети).

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Предложена е и е реализирана в практически изследвания иновативна постановка за оптимално разпределение на осветители и оптимален брой на захранващите източници. Формулирани са критерии и създадени алгоритми, материализирани с помощта на езика на програмиране от високо ниво Python, чрез който се оптимизира (минимизира) целевата функция и се постига глобален технико-икономически ефект от чувствително намаляване дължината на кабелната мрежа и броя на захранващите източници. Чрез постановката се реализира концепцията за всеобхватно, много-критериално, многофакторно и комплексно оценяване на външните ОУ, като светотехнически, ергономичен, електротехнически и топологичен обект.

2. Формулирана е иновативна методическа постановка, апробирана в реални условия, за определяне на загубите на мощност и загубите на напрежение, разглеждани в единна форма в зависимост от параметрите на универсална външна ОУ. Постановката дава възможност чрез таблични данни и визуализация на в 3D формат, да се получат оптимални резултати за загубите на мощност чрез прилагане на опростен подход с използване на тривиални, достъпни и лесно определими параметри на ОУ.

НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

1. Синтезирана е методическа постановка, приложима в реални светодни осветителни уредби, която дава възможност за оценка на електроенергийната ефективност поняколко показателя, регламентирани от стандарта. Доказано е, че такъв подход подобрява технико-икономическата обосновка на различните проектни решения и създава условия за реализиране на оптимизационни процедури, като ефикасността им зависи от геометричните и топологичните особености на външните ОУ.

2. Създаден е симулационен модел, работещ с реални осветители в условията на динамично изменящи се параметри на външните ОУ. Приложението му дава възможност за анализ и оценка на различни варианти, комбиниращи характеристиките на осветителната уредба и светлинния източник, с което постигат оптимални решения. С помощта на метода е установено, че съществува пряка зависимост между топологичните и геометричните характеристики на уличната ОУ и техните енергоефективни показатели, респективно в системата на електроснабдяване. Това е нов иновативен подход и критерий, който се препоръчва да намери приложение при проектиране и изграждане на прогресивни и високо ефективни външни ОУ, като софтуерната му реализация е целесъобразно да се осъществява с използване на доказалия своята ефективност продукт DIALUX.

3. Приложена е технико-икономическа методика за анализ и оценка на компонентите на приведените годишни разходи. Синтезираната постановка представлява много-параметрична задача, предоставяща възможности за постигане на оптимални решения с използване на специализирани софтуерни продукти. Аprobацията на методиката при определяне на оптималното разпределение на осветители и оптималния брой на захранващите източници е висок атестат на приложимост, обоснованост и адекватности на постановката.

Списък на публикации по дисертационната работа

1. доц. д-р инж. Валентин Николов Гюров, инж. Христиан Ивайлов **Панчев**, доц. д-р инж. Румен Михайлов Киров, ОЦЕНКА НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ В УЛИЧНОТО ОСВЕТЛЕНИЕ ПРИ ВАРИАНТНО ПРОЕКТИРАНЕ VII БАЛКАНСКА КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ОСВЕТЛЕНИЕ ISSN 978-954-353- 347-3, София 2018
2. Gyurov, V. **Panchev, H.** Experimental Research on Light and Energy Parameters of Intelligent Street and Road Lighting, 11th Electrical engineering faculty conference (BulEF), Proceedings, 2019 Varna, DOI 10.1109/BulEF48056.2019.9030760 ([Scopus](#))
3. Gyurov, V. **Panchev, H.**, Makedonski, N. Possibilities for Optimizing the Electric Power Supply Network Topology of Lighting Systems, 11th Electrical engineering faculty conference (BulEF), Proceedings, 2019 Varna, DOI 10.1109/BulEF48056.2019.9030760 ([Scopus](#))
4. **Panchev, H.**, Gyurov, V. Graph-based Method for Optimization of Electric Power Supply Systems for Street Lighting, 12th Electrical engineering faculty conference (BulEF), Proceedings, 2020 Varna, DOI 10.1109/BulEF51036.2020.9326057 ([Scopus](#))
5. **Panchev, H.** Research and analysis of lighting and energy performance of the street lighting segment of the highway. 13th Electrical engineering faculty conference (BulEF), Proceedings, 2021 Varna (In print)

СЪКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ В ТЕКСТА

МПС – Моторно превозно средство
ПТП - Пътнотранспортно произшествие
УОУ – Улична осветителна уредба
ОУ – Осветителна уредба
ЕРС - Energy Performance Contracting
ТП – Трафопост
КУО – Касета за улично осветление
ЕЕ – Електрическа енергия
ЕМС – Електромагнитна съвместимост
ЕП – Електрически потребител
ЗИ – Захранващ източник
ЦФ – Целева функция
ПГР – Приведени годишни разходи
ЦЕТ – Център на електрически товари
ПКЕЕ – Показатели за качеството на електрическата енергия
НН – Ниско напрежение
СТ – Силов трансформатор
ПРА – Пуско-регулираща апаратура
MST - Minimum spanning tree
MSF - Minimum spanning forest
LED – Light emitting diode
THD – Total harmonic distortion
МАП – Миниатюрен автоматичен прекъсвач
RMS – Root mean square
PDI – Power density indicator
АЕСИ - Annual energy consumption indicator
LDT – Light distribution types
ЕСС – Електроснабдителна система
СН – Средно напрежение
СМР – Строително монтажни работи
ДДС – Данък добавена стойност