

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Электроэнергетический факультет

Кафедра электро- и теплоэнергетики

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

**Энергоэффективная система управления  
наружным освещением парковой зоны**

Пояснительная записка

Научный руководитель

д-р пед. наук, канд. техн. наук, профессор \_\_\_\_\_  
подпись, дата

Н.Г. Семенова

Студент

\_\_\_\_\_  
подпись, дата

Р.М. Сабитов

Оренбург 2020

## Аннотация

Сети наружного освещения населённых пунктов являются достаточно энергоёмкими объектами. В связи с чем, целью данной выпускной квалификационной работы является разработка энергоэффективной системы управления наружным освещением парковой зоны.

Для достижения поставленной цели в работе осуществлён анализ научно-технической литературы в области энергоснабжения и управления наружным освещением парковой зоны. Спроектирована система электроснабжения парковой зоны. Разработана структурная схема управления освещением парковой зоны. Разработана математическая модель управления освещением парковой зоны по двум входным переменным: естественной освещенности; присутствию посетителей парка. Разработан и программно реализован алгоритм управления освещением парковой зоны на основе теории нечеткого вывода. А также осуществлено тестирование системы управления электроснабжением светильников наружного освещения на разработанном макете парковой зоны.

Разработанная в исследовании автоматизированная система управления светодиодными светильниками на основе алгоритма нечеткого вывода Mamdani по двум входным переменным является новым и энергоэффективным решением в области управления наружным освещением парковой зоны.

Пояснительная записка содержит 77 страниц, 7 таблиц, 51 рисунок.

					ОГУ 13.04.02.1320. 349 ПЗ			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Сабитов Р.М.</i>			Энергоэффективная система управления наружным освещением парковой зоны	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Семенова Н.Г.</i>					2	
<i>Н. Контр.</i>		<i>Семенова Н.Г.</i>						
<i>Зав.Каф</i>		<i>Соколов В.Ю.</i>						
						ЭЭФ, 18ЭЭ(м)АЭСК		

## Содержание

<b>Введение</b> .....	5
<b>Глава 1.</b> Анализ научно-технической литературы в области разработки систем управления наружным освещением. ....	7
1.1 Анализ научно технической литературы по видам применяемых.....	7
источников наружного освещения .....	7
1.2 Анализ научно технической литературы по разработке автоматизированных систем управления электроснабжением светильников наружного освещения .....	11
1.3 Применение теории нечетких множеств и нечеткой логики в задачах электроэнергетики.....	16
1.4 Энергоресурсосберегающие технологии в области наружного освещения .....	18
Выводы по 1-й главе .....	21
<b>Глава 2.</b> Проектирование системы электроснабжения светильников наружного освещения.....	22
2.1 Светотехнический расчёт СНО. ....	22
2.1.1 Выбор светильников наружного освещения.....	23
2.1.2 Светотехнический расчет освещения парковой зоны.....	26
2.1.3 Проектирование схемы расположения светильников наружного освещения.....	30
2.2 Расчет системы электроснабжения светильников наружного освещения. ....	33
2.2.1 Расчёт осветительной нагрузки парковой зоны.....	33
2.2.2 Выбор сечения проводов осветительной сети .....	36
2.2.3 Проверка трансформаторов на перегрузку .....	39
Выводы по 2-й главе. ....	42
<b>Глава 3.</b> Разработка энергоэффективной системы автоматизированного управления электроснабжением наружного освещения.....	43
3.1 Разработка структурной схемы автоматизированной системы управления электроснабжением светильников наружного освещения .....	43
3.2 Разработка математической модели и алгоритма управления системой электроснабжения светильников наружного освещения .....	46
3.3 Программная реализация алгоритма управления системы электроснабжения светильников наружного освещения .....	55
Выводы по 3-й главе. ....	59
<b>Глава 4.</b> Экспериментальное исследование энергоэффективной системы электроснабжения светильников наружного освещения.....	59
4.1 Элементная база макета «Освещение парковой зоны» .....	60
4.2 Подключение устройств к микроконтроллеру Arduino.....	62
4.3 Тестирование системы управления электроснабжением светильников наружного освещения на разработанном макете парковой зоны.....	66
Выводы по 4-й главе .....	71

<b>Заключение</b> .....	70
<b>Список использованных источников</b> .....	71

## Введение

Современные сети наружного освещения (СНО) представляют собой достаточно энергоемкие объекты. В работе [1] отмечено, что согласно оценке Международного энергетического агентства, 19% всей потребляемой в мире электроэнергии приходится на освещение, использование современных световых технологий делает возможным экономить до 40% потребляемой электроэнергии (106 млрд евро в мировом масштабе). Согласно статье [2] траты на электроэнергию в сетях наружного освещения населенных пунктов составляют 30% от всех затрат на освещение, а с учетом дополнительных затрат на обслуживание сетей освещения, занимают одно из ключевых мест в структуре затрат муниципальных бюджетов.

Согласно федеральному закону [3] вопросы энергосбережения и повышения энергетической эффективности являются приоритетными направлениями развития электроэнергетики Российской Федерации, поэтому разработка энергоэффективных систем управления наружным освещением парковой зоны является актуальной и значимой задачей.

В связи с этим **целью** ВКР является разработка автоматизированной системы управления СНО парковой зоны.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Анализ научно-технической литературы в области энергоснабжения и управления наружным освещением парковой зоны;
2. Проектирование системы электроснабжения парковой зоны;
3. Разработка структурной схемы управления освещением парковой зоны;
4. Разработка математической модели управления освещением парковой зоны по двум входным переменным: естественной освещенности; присутствию посетителей парка;
5. Разработка алгоритма управления освещением парковой зоны на основе теории нечеткого вывода и его программная реализация.
6. Тестирование системы управления электроснабжением светильников наружного освещения на разработанном макете парковой зоны.

**Объектом** исследования является энергоснабжение наружного освещения парковой зоны, **предметом** исследования - энергоэффективная система управления СНО парковой зоны.

**Научной новизной** исследования является разработанный и программно реализованный алгоритм управления освещением парковой зоны на основе теории нечеткого вывода Mamdani по двум входным переменным.

**Практической значимостью** исследования является разработанный программно-аппаратный стенд, включающий в себя программное обеспечение и макет парковой зоны со светодиодными светильниками, позволяющий оценивать энергоэффективность системы управления электроснабжением светильников наружного освещения.

По теме научно-исследовательской работы было опубликовано 5 научных статей в журналах и сборниках различных уровней.

## **1. Анализ научно-технической литературы в области разработки систем управления наружным освещением.**

Анализ работ [3, 4, 5, 6] позволил выявить следующие подходы к повышению энергоэффективности СНО:

- применение энергоэффективных источников света;
- внедрение систем автоматического регулирования СНО;
- использование энергоресурсосберегающих технологий в сфере СНО.

Рассмотрим каждый из подходов подробнее.

### **1.1 Анализ научно технической литературы по видам применяемых источников наружного освещения**

Одним из простейших способов повышения энергоэффективности СНО является применение энергоэффективных источников света.

Рассмотрим наиболее распространенные в России источники света, используемые в оборудовании наружного освещения.

Люминесцентные лампы без встроенной пускорегулирующей аппаратуры (ПРА). Обладают высокой светоотдачей, однако большие размеры светящегося тела затрудняют фокусировку светового потока в нужном месте. При понижении температуры снижается светоотдача ламп и возникают проблемы с запуском. Данные характеристики позволяют использовать люминесцентные лампы без ПРА только в качестве декоративного наружного освещения.

Люминесцентные лампы со встроенным ПРА, которые также называют компактными люминесцентными лампами (КЛЛ). Меньшие размеры упрощают проблему фокусировки светового потока, однако КЛЛ также как и люминесцентные лампы плохо работают при низких температурах. В связи с чем их использование допустимо на объектах низкой важности, например, для освещения территории частных домов.

Галогенные лампы накаливания (ГЛН). Представляют собой обычную лампу накаливания, в колбу которой добавлены пары брома или йода. Это повышает характеристики ГЛН по сравнению с лампой накаливания, однако, по сравнению с другими источниками света для наружного освещения световая отдача ламп низкая.

Ртутные лампы высокого давления (РЛВД). Представляет собой специфический источник света, в котором разряд газа генерирует оптическое излучение в парах ртути. РЛВД обеспечивают высокую светоотдачу на протяжении всего срока эксплуатации. Способны работать в широком температурном диапазоне без снижения характеристик. Обладают компактными размерами, высокой прочностью корпуса и широкой линейкой мощностей. К минусам РЛВД относят плохой уровень цветопередачи, низкий порог готовности к включению и невозможность мгновенного возобновления работы при отключении, а также отсутствие возможности регулировки яркости.

Не смотря на перечисленные минусы РЛВД до 80-х годов являлись наиболее распространенным источником света сетей наружного освещения.

Металлогалогенные лампы (МГЛ). Лампа состоит из внешней колбы, заполненной азотом, и расположенной в ней рабочей капсулы, заполненной инертным газом с небольшим количеством ртути и добавками галогенидов металлов. МГЛ обладают хорошей светоотдачей и высоким коэффициентом цветопередачи.

Натриевые лампы высокого давления (НЛВД). Представляют собой частный случай МГЛ. Из всех представленных ранее источников света обладает наибольшей светоотдачей. Наиболее распространены отечественные лампы ДНаТ (дуговая натриевая трубчатая). Недостатком является плохая цветопередача [6].

К группе современных энергоэффективных источников света относятся светодиоды. Светодиодные источники света – молодое, быстро прогрессирующее направление в светотехнике. Главными преимуществами светодиодных источников света перед традиционными являются высокая светоотдача и широкий диапазон регулировки яркости.

Один из главных критериев сравнения различных источников света является светоотдача. Светоотдача характеризует какое количество видимого света (Лм) даёт лампа при потреблении единицы электрической мощности (Вт). Таким образом, высокая светоотдача напрямую способствует энергосбережению.

На рисунке 1 представлен график показывающий светоотдачу различных источников света, применяемых в системах наружного освещения. График представлен из материалов фирмы OSRAM в редакции О. Т. Зотина, Н. О. Морозовой [5].

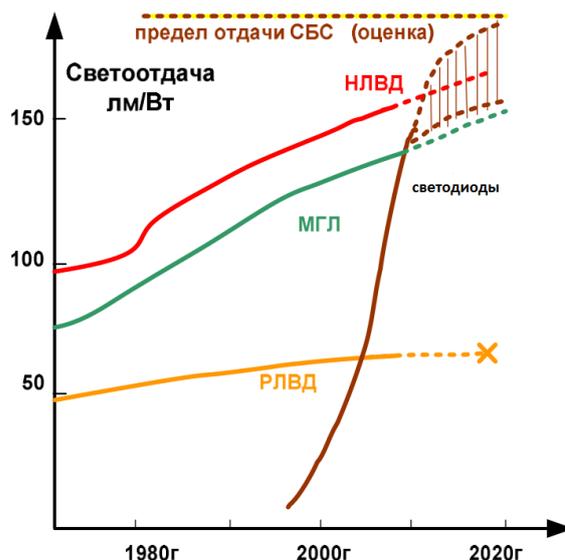


Рисунок 1 – Светоотдача источников света, применяемых в СНО

Из графика видно, что наиболее перспективными в области светоотдачи среди источников света являются светодиодные источники света.

Другим важным критерием, способствующим энергосбережению, является диммируемость источника света. Диммер представляет собой электронное устройство, предназначенное для регулировки электрической мощности. Обычно применяются с лампами накаливания и светодиодами.

Любая осветительная аппаратура с течением времени начинает выдавать меньшее количество излучаемого света. Данный процесс известен как деградация яркости. Примерно через 1000 часов работы ламп накаливания их яркость снижается на 10-15% от изначальных значений. Это связано с тем, что часть нити лампы накаливания со временем испаряется, а частицы вольфрама остаются на поверхности стекла. Люминесцентные лампы подвержены процессам деградации люминофора и накоплению поглощающих свет отложений. Яркость компактных люминесцентных ламп снижается до 20% от изначальной по достижению 10000 часов наработки. Высококачественные линейные люминесцентные лампы (T8 и T5), в которых используются редкоземельные люминофоры, теряют около 5% от начальной светимости через 20000 часов работы.

Светодиоды так же подвержены деградации яркости. Это связано с высокой температурой перехода полупроводникового чипа. Светодиоды не могут излучать тепло в виде инфракрасного излучения, в связи с чем необходимо удаление тепла из устройства посредством теплопроводности или конвекции. При плохой вентиляции и отсутствие достаточного теплоотвода, температура устройства будет возрастать из-за чего снизится уровень светового потока. Краткосрочное воздействие высоких температур на светодиоды не имеют необратимых последствий, однако постоянно высокая рабочая температура будет являться причиной постоянного снижения светового потока. Светодиоды способны продолжить работать даже при значительном снижении уровня светового потока [7].

Типичные значения стабильности светового потока для различных источников света, согласно справочнику по освещению [7], представлены на рисунке 2.

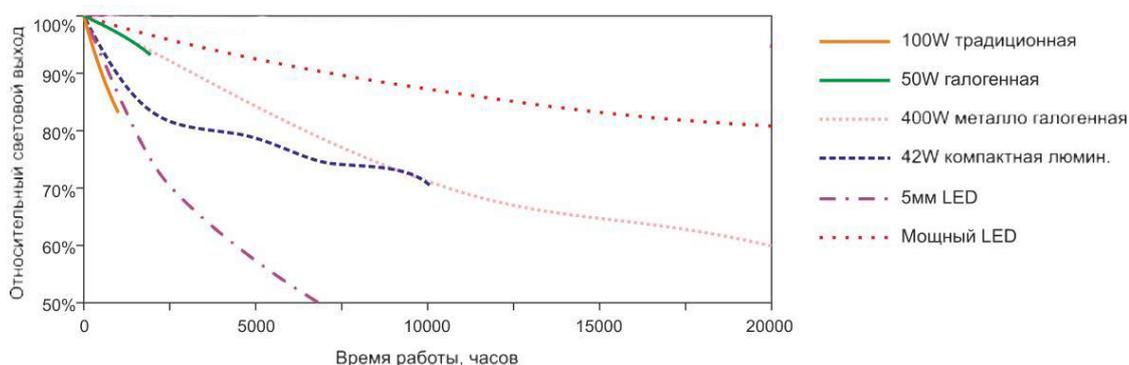


Рисунок 2 - Типичные значения стабильности светового потока для различных источников света

Согласно данным рисунка 2 лучшими значениями стабильности светового потока в течение наработки обладают мощные светодиоды.

Для определения срока эксплуатации необходимо определить какой уровень снижения яркости является допустимым. В случае общего применения осветительного оборудования, как, например, для освещения офисных помещений, большинство людей не заметят сокращения освещенности примерно на 30%, особенно при плавном снижении. В связи, с чем уровень в 70% от изначальных значений освещенности принимается как предел срока полезного использования для общего освещения. Для светодиодов этот уровень может быть снижен до 50%.

Коэффициент цветопередачи CRI – величина, характеризующая насколько естественный цвет тела соответствует видимому (кажущемуся) цвету тела при освещении его определённым источником света. Характер спектра излучения ламп определяет её цветопередающие свойства. Коэффициент цветопередачи CRI идеально передающий цвет предметов равен 100. Комфортным для человеческого зрения является диапазон цветопередачи 80-100 Ra.

Характеристики источников света, используемых в оборудовании наружного освещения, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Характеристики источников света, используемых в оборудовании наружного освещения

Тип ист. света	Свето-отдача, лм/Вт	Срок службы, ч	Коэф. цветопередачи CRI	Диммируемость	Стоимость*, руб
ГЛН	15-20	3000-4000	100	Ведет к уменьшению срока службы.	11200
КЛЛ	50-60	8000-10000	70-85	до 15% Мало допустимых моделей ламп	9117
РЛВД	50-60	8000-10000	60-80	Не применяется.	9099
НЛВД	80-150	10000-25000	20-30	до 50% Мало допустимых моделей ламп.  Снижение индекса цветопередачи.	8329

Продолжение таблицы 1

Свето диоды	100-150	50000	65-90	Широко распространено.  Отсутствие снижения характеристик.	26910
*На основе прайс листа от 15.04.2020 ОАО «АСТЗ». Стоимость для светильников с величиной светового потока в диапазоне 12500-13500 лм.					

По представленным в таблице данным можно сделать вывод, что использование светодиодных источников света является наиболее перспективным, благодаря их высокой светоотдаче и широкому диапазону регулирования. Высокая стоимость светодиодных источников света компенсируется долгим сроком службы и большой энергоэффективностью.

### **1.2 Анализ научно технической литературы по разработке автоматизированных систем управления электроснабжением светильников наружного освещения**

Рассмотрим следующий подход к повышению энергоэффективности СНО - внедрение систем автоматического управления СНО.

Под энергоэффективной системой управления понимаем такую систему, которая обеспечивает нормативный уровень освещенности при наименьшем потреблении электрической энергии светильниками. Использование автоматического управления СНО позволяет поддерживать на необходимых площадках уровень освещенности равный нормативному, предотвращая лишней перерасход электроэнергии.

Приступая к рассмотрению различных систем автоматического управления, первым делом необходимо установить на какие нормы освещенности эти системы должны ориентироваться в своей работе. Проанализируем нормативную документацию, устанавливающую нормы искусственного освещения территорий парковой зоны.

Согласно пункту 7.34, таблицы 14 СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [8] средняя горизонтальная освещенность территорий общегородских парков должна соответствовать следующим значениям:

- главные входы – 6 лк;
- вспомогательные ходы - 6 лк;
- центральные аллеи – 4 лк;
- боковые аллеи – 2 лк;
- площадки массового отдыха, площадки для настольных игр – 10 лк.

Для районных садов:

- главные входы – 4 лк;
- вспомогательные ходы - 1 лк;
- центральные аллеи – 2 лк;
- боковые аллеи – 1 лк;
- площадки массового отдыха, площадки для настольных игр – 10 лк.

Согласно пункту 7.33, таблицы 14 СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» средняя горизонтальная освещенность территорий детских ясли-садов, общеобразовательных школ и школ-интернатов, учебных заведений должна соответствовать следующим значениям:

- Групповые и физкультурные площадки – 10 лк;
- Площадки для подвижных игр зоны отдыха – 10лк.

Для санаториев, домов отдыха:

- Центральные аллеи парковой зоны – 6 лк;
- Боковые аллеи парковой зоны – 4 лк;
- Площадки зоны тихого отдыха и культурно-массового

обслуживания (площадки массового отдыха, площадки перед открытыми эстрадами и т.д.) – 10 лк.

Согласно пункту 7.75 таблицы 26 СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [9] площадки посадочные, детские и отдыха относятся к классу П2, нормируемые показатели  $E_{cp}$  не менее 10 лк и  $E_{мин}/E_{cp}$  не менее 0,3. Главные и вспомогательные входы парков, санаториев соответствуют классу П3, нормируемые показатели  $E_{cp}$  не менее 6 лк и  $E_{мин}/E_{cp}$  не менее 0,2. Боковые аллеи и вспомогательные входы парков административных округов относятся к классу П6, нормируемые показатели  $E_{cp}$  не менее 1 лк и  $E_{мин}/E_{cp}$  не менее 0,1.

На основе анализа работ [4, 10] была выделена следующая классификация систем автоматического управления СНО:

- Управление СНО по заранее заданному графику;
- Управление СНО по данным датчиков;
- Интеллектуальная система управления СНО.

Кратко охарактеризуем каждую выделенную группу управления.

Управление СНО по заранее заданному графику. Данный вид управления является наиболее простым способом управления, т.к. отключение и включение осветительных приборов осуществляется согласно заранее заданному графику. График составляется, опираясь на астрономические наблюдения или по критериям приоритетным для данной СНО. Достоинствами данного способа управления является простота разработки алгоритма управления, отсутствие затруднений при расширении сети электроснабжения СНО. Недостатком является недостаточная гибкость системы в случае несоответствия внешних условий с заданным графиком, отсутствие обратной связи.

Управление СНО по данным датчиков. В данной системе в качестве управляющего сигнала используются данные, полученные с датчиков движения и/или освещенности. Система лишена таких недостатков как отсутствие

гибкости управления и обратной связи, присущих системе управления по заданному графику.

Интеллектуальная система управления. В отличие от предыдущей системы, использующей жесткие алгоритмы управления, осуществляет управление посредством искусственного интеллекта. Система управления эффективна при большом количестве критериев управления, способна адаптироваться к новым условиям окружающей среды и расширению сети электроснабжения СНО. Интеллектуальная система управления является наиболее перспективной, однако на данный момент слабо распространена.

В связи с увеличением аппаратной части и усложнением разработки алгоритма управления возрастает стоимость СНО с управлением от датчиков или интеллектуальной системой управления.

Нами было проанализировано готовое технологическое решение, представленное на портале «Энергосовет», по созданию интеллектуальной системы управления уличным и внутренним освещением [11]. Каждый светильник комплектуется ЭПРА с чипом. Программирование чипа, позволяет осуществлять управление светильником по данным датчиков освещенности, присутствия, движения. Технология может быть применена для всех видов светильников, кроме светильников с лампами накаливания. Технологическое решение было реализовано торговой сетью TESCO в Чехии, Словакии. Эффект от внедрения: экономия электроэнергии, уменьшение срока окупаемости, гибкое управление. Недостатком технологии является отсутствие центрального аппарата управления. Использование в каждом светильнике собственного управляющего чипа ведёт к удорожанию и усложняет обнаружение неполадок отдельных элементов системы.

Выбор способа управления для конкретных СНО зависит от сложности управляемого объекта и степени детерминированности входных данных. Для объектов малой сложности с детерминированными входными данными оптимальным будет использование классических методов управления (т.е. описанного ранее управления СНО по заранее заданному графику или данным датчиков). При возрастании сложности СНО целесообразнее становится применение интеллектуальных систем управления, таких как: нечёткие системы или искусственные нейронные сети. Данное утверждение отражено на рисунке 3, взятом из работы [22].



Рисунок 3 - Области наиболее эффективного применения методов анализа и управления

Таким образом, проведенный анализ научно-технической литературы позволил заключить, что, не смотря на большие начальные вложения, СНО с управлением от датчиков и интеллектуальной системой управления является перспективным направлением при разработке автоматизированных энергоэффективных систем управления СНО.

Достоинства и недостатки рассмотренных подходов повышения энергоэффективности СНО сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Достоинства и недостатки различных подходов к повышению энергоэффективности систем НО

	Подходы к повышению энергоэффективности СНО	Ф.И.О. ученых	Достоинства	Недостатки
	Применение энергоэффективных источников света	О. Т. Зотин; Н. О. Морозова	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Уменьшение расхода энергии за счет высокой светоотдачи источников света</li> <li>• Нет необходимости в установке компенсирующих устройств</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Высокая стоимость современных энергоэффективных источников света</li> </ul>
	Управление СНО по заранее заданному графику	О. Т. Зотин; Н. О. Морозова	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Простота разработки алгоритма управления</li> <li>• Отсутствие затруднений при расширении сети</li> <li>• Электроснабжения СНО</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Недостаточная гибкость управления</li> <li>• Отсутствие обратной связи</li> </ul>
	Управление СНО по данным датчиков	К. Р. Валиуллин; Н.Г. Семенова; А. В. Гурьев; Е. А. Букварев	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Гибкость управления</li> <li>• Наличие обратной связи</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Жесткие алгоритмы управления</li> <li>• Необходимость изменения алгоритмов управления при расширении сети электроснабжения СНО</li> <li>• Высокая стоимость</li> </ul>
	Интеллектуальная система управления СНО	К. Р. Валиуллин; Н.Г. Семенова; А. И. Киричок; И.Н Краснокуцкий	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Адаптируется к изменениям условий окружающей среды и расширению сети НО</li> <li>• Эффективна при большом количестве критериев управления</li> <li>• Быстрая окупаемость</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Высокая стоимость</li> <li>• Мало распространена</li> </ul>

### 1.3 Применение теории нечетких множеств и нечеткой логики в задачах электроэнергетики

Анализ научно-технической литературы в области применения методов искусственного интеллекта в области управления электроэнергетическими объектами позволил выделить следующие технологии:

- нейронные сети;
- эволюционные вычисления;
- нечеткие системы.

Нейронная сеть (НС) представляет собой распределенный параллельный процессор, включающий в себя элементарные единицы обработки информации, накапливающий экспериментальные знания и предоставляющий их для последующей обработки. Подобно человеческому мозгу нейронная сеть получает знания из окружающей среды и использует их в процессе обучения. Также в НС для сохранения знаний используются нейронные связи (синоптические веса) [17].

НС обладает следующими полезными свойствами:

- **Нелинейность.** Данное качество позволяет считывать нелинейные входные сигналы, например, человеческую речь.
- **Адаптивность.** Позволяет нейронной сети адаптировать свои нейронные связи под изменения окружающей среды, в том числе в реальном времени.
- **Контекстная информация.** Знания представлены в самой структуре НС. Каждый нейрон подвергается воздействию остальных нейронов.
- **Отказоустойчивость.** При возникновении непредвиденных обстоятельств производительность НС падает незначительно. Это связано с тем, что повреждение отдельного нейрона не несет за собой серьезных последствий, так как хранимая информация носит распределенный характер.

Эволюционные методы представляют собой модели, основанные на принципах естественного отбора, которые обеспечивают отсеивание наименее рациональных решений согласно выбранному критерию. Данная группа методов включает в себя генетические алгоритмы.

Генетический алгоритм, являющийся основой эволюционных вычислений, представляет собой эвристический алгоритм поиска, который применяется для решения оптимизационных задач моделирования путем подбора, комбинации и вариации начальных параметров под действием механизмов, подобных биологической эволюции. Решение задачи при этом закодировано таким образом, что может быть представлено в виде вектора (хромосома). Случайно создается определенное количество начальных векторов (начальная популяция), которым затем присваиваются значения (приспособленность) в зависимости от вероятности «выживания» данного вектора. На основе полученных данных выбираются векторы для последующего скрещивания, осуществляется «селекция». К выбранным векторам применяются генетические операторы (скрещивание и мутация), тем самым создавая

следующее поколение. Моделируемый эволюционный процесс продолжает несколько циклов до выполнения критерия алгоритма [18].

Нечёткие системы основаны на принципах нечеткой логики и теории нечетких множеств - раздела математики, который обобщает классическую логику и теории множеств. Главной причиной возникновения данной теории было наличие нечетких и приближенных рассуждений, которые возникали при описании человеком различных объектов и процессов. Механизмы логического вывода в рамках нечеткой логики включает в себя четыре этапа: введение нечеткости (фазификация), нечеткий вывод, композиция и приведение к четкости или дефазификация.

Различные алгоритмы нечеткого вывода отличаются по виду используемых правил, логических операций и разновидностей метода дефазификации.

Впервые нечёткая логика упоминается в работах профессора Лотфи Заде в 1965 году. Им была предпринята попытка связать математику с творческим, много вариативным мыслительным процессом человека. В начале своего зарождения нечёткая логика была признана антинаучной теорией и отвергнута в Европе и США, а признание приобрела позднее [20, 21].

Решения, принимаемые системами управления на базе нечёткой логики схожи с решениями реального человека. Это возможно благодаря тому, что система содержит в себе не только конечные результаты, выраженные полярными понятиями (ответы «да», «нет» и т.п.), но и промежуточными понятиями (ответ «скорее да, чем нет»). Система не даёт точного ответа на определенные события, но определяет величину отклонения показателей системы от номинальных и принимает решения, направленные на уменьшение данного отклонения.

Нечёткая логика представляет собой математический аппарат, способный при помощи заданных правил работать с лингвистическими переменными. Это делает её близкой к разговорному языку, понятной человеку и способной работать в условиях неопределённости и нечёткости исходной информации.

Основными преимуществами использования fuzzy (рус. «нечётких») систем являются:

- работа с нечёткими, непрерывно изменяющимися во времени данными;
- использование критериев оценки, выраженных промежуточными понятиями («скорее да, чем нет» и т.п.), а не полярными («да», «нет» и т.п.);
- оценка входных и выходных переменных не только по их конкретным значениям, но и по степени их достоверности;
- быстрое моделирование сложных, меняющихся систем

В электроэнергетике нечёткая логика может применяться для расчёта нагрузок, потерь в линиях.

Технологии нечёткой логики успешно используются в области ветроэнергетики, позволяя учитывать постоянно меняющиеся погодные и ветровые характеристики [23]. Также их применение возможно для прогнозирования технического состояния особо опасных объектов

электроэнергетики, например, электроприводных газоперекачивающих агрегатов [24].

Таким образом, в настоящее время происходит быстрое развитие систем управления, основанных на нечёткой логике. Это обусловлено возможностью данных систем решать задачи, справиться с которыми не под силу обычным вычислительным алгоритмам. В связи с этим, в данной работе предлагается использовать теорию нечётких множеств в управлении СНО для определения оптимальной мощности питающей сети осветительных установок.

#### **1.4 Энергоресурсосберегающие технологии в области наружного освещения**

На сегодняшний день в разных городах мира используется большое множество различных систем наружного освещения. В связи с отсутствием жестких требований к разработке системы управления наружным освещением и большому числу потенциальных вариантов проектирования СНО, высока вероятность выбора системы с низкими технико-экономическими характеристиками. Каким же вариантам стоит отдавать предпочтение? В 2009 г. были проведены сравнительные технико-экономические расчеты применяемых и перспективных энергоресурсосберегающих решений в области СНО. Результаты расчета представлены в [5], также некоторые уточнения представлены в [25]. Кратко проанализируем данное исследование.

В своем исследовании О. Т. Зотин, Н. О. Морозова [5] выделяют несколько групп энергоресурсосберегающих решений (технологий) в области СНО.

К первой относится традиционное пофазное отключение светильников и более совершенный вариант данного решения с двойным количеством светильников на опоре. Установка на опорах удвоенного количества светильников способна обеспечить равномерное распределение света во время отключения части светильников, также данное решение подкупает своей простотой. Однако плюсы данного решения перечеркиваются высокой стоимостью монтажа и эксплуатации. Также авторы относят к данной группе популярное решение с двухрежимными ЭМПРА, которое обеспечивает уменьшение освещенности в ночное время. Данное решение позволяет экономить электроэнергию, благодаря установленному в каждом светильнике дополнительного балластного дросселя.

Ко второй группе решений были отнесены технологии, обеспечивающие групповое управление путём регулирования общего выходного напряжения линий освещения. Для данного решения наиболее широко применяется вариант, при котором управление, осуществляется переключением обмоток автотрансформатора симисторами или контакторами. При небольшом шаге напряжения переключения обмотки (-5В) возможность погасания лампы высокого давления для такого типа диммирования исключена. Менее распространены схемы, использующие симистронные фазорегуляторы, так как для данной схемы необходим дополнительный компенсатор коэффициента

мощности. Возможно применение схем с конвекторами-преобразователями. Однако в силу дороговизны и малой надежности схемы, конкретные пути ее реализации авторам неизвестны.

К третьей группе авторы относят решения, использующие управляемые ЭлПРА в светильниках. Данное решение обеспечивает наибольший процент экономии электроэнергии среди рассматриваемых групп. Использование ЭлПРА позволяет задействовать все резервы по повышению энергоэффективности, однако они являются функционально сложными из-за чего достижение высокого уровня надежности функционирования и низкой стоимости СНО является достаточно сложным.

К четвертой группе отнесены решения с применением светодиодных источников света, которые превосходят лампы высокого давления по сроку службы и возможности управления (в частности характеристике диммирования), однако имеют более высокую стоимость.

Оценивая эффективность энергоресурсосберегающих решений по проектированию СНО О. Т. Зотин и Н. О. Морозова рассматривали затраты каждого варианта в течение расчетного периода - 6 лет. Расчет производился на участке системы наружного освещения, длиной 8,2 км, который включает в себя 382 светильника. Сравнение вариантов происходило по их чистому дисконтируемому доходу, ставка дисконтирования 20%.

По результатам расчёта авторами были сделаны следующие выводы:

- Лучшими характеристиками обладает группа с управляемыми ЭлПРА.
- Группа со светодиодными источниками света уступает второй группе, в связи с большей стоимостью светильников, высокими начальными затратами.

Несмотря на высокую стоимость светодиодных светильников, их использование в парковой зоне более рационально, чем использование газоразрядных ламп с управляемым ЭлПРА. Это связано с тем, что в парковой зоне, часто используется архитектурно-художественная подсветка, что требует использование компактных светильников сложной формы. Лучшего всего с подобной задачей способны справиться светодиодные светильники. Модельный ряд светодиодных светильников настолько широк, что позволяет подобрать подходящий по форме и размеру вариант, при этом не жертвуя величиной освещённости.

Другим преимуществом светодиодных светильников является их хорошая диммируемость.

Использование светодиодов за рубежом показало, что их окупаемости способствует ночное применение диммирования. Диммируемые светодиодные аналоги ДНаТ 250 понижают потребления электроэнергии, в связи с чем сокращают срок окупаемости [26].

Нормы по световому потоку светильников СНО парковой зоны связаны с количеством посетителей парка. При отсутствии или минимальном количестве посетителей нет необходимости в максимальном световом потоке светильников. Во временном промежутке от 22 до 5 часов (с уточнением на

время года), в связи с отсутствием посетителей в парковой зоне, допустимо снизить яркость освещения до минимальной. Это позволит снизить потребление электроэнергии. Также снижение яркости освещения ночью способно уменьшить световое загрязнение окружающей среды (воздействие слишком сильного освещения на природу), и облегчит засыпание людям, живущим рядом с парковой зоной.

Светильники с металлогалогенными и натриевыми лампами плохо поддаются диммированию. В связи с чем до недавнего времени в СНО с данными светильниками глубокой ночью совершали отключение части светильников (через один при расположении вдоль дороги). При использовании данного способа регулирования на автомагистрали страдает равномерность освещения полотна дороги, что провоцирует рост аварий. При отключении части светильников парковой зоны, возникают неосвещенные зоны, которыми может воспользоваться криминалитет.

В 2011 году в силу вступил СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [9] (заменивший СНиП. Согласно пункту 7.43: «Допускается в ночное время снижать уровень наружного освещения городских улиц, дорог и площадей при нормируемой средней яркости более 0,8 кд/м или средней освещенности более 15 лк: на 30% при уменьшении интенсивности движения до 1/3 максимальной величины; на 50 % при уменьшении до 1/5.» Таким образом, использование диммирования в ночное время позволяет избежать неоправданных затрат на электроэнергию.

Проведённый анализ научно-технической литературы в параграфах 1.1-1.4 позволил нам заключить, что автоматизированные системы управления СНО парковой зоны с использованием методов искусственного интеллекта и светодиодных светильников в настоящее время являются наиболее перспективными. В связи с чем, разработка данных систем управления является актуальной и значимой задачей.

## **Выводы по 1-й главе**

По результатам анализа научно-технической литературы в области разработки систем управления наружным освещением нами были сделаны следующие выводы:

1. Использование светодиодных источников света является наиболее перспективным решением, благодаря их высокой светоотдаче и широкому диапазону регулирования.

2. Управление СНО посредством интеллектуальной системы управления является наиболее эффективным по сравнению с другими традиционно применяемыми системами управления.

3. Применение теории нечеткой логики позволяет повысить энергоэффективность систем управления электроэнергетическими объектами за счет возможности управления СНО в условиях неопределённости (количество посетителей парка) и нечёткости исходной информации (изменяющиеся условия внешней среды: погода, естественная освещенность).

4. Наиболее перспективной энергоресурсосберегающей технологией в области наружного освещения является использование диммирования светильников наружного освещения в темное время суток.

## 2 Проектирование системы электроснабжения светильников наружного освещения.

### 2.1 Светотехнический расчёт СНО.

Математическая модель СНО парковой зоны, основана на светотехническом расчёте, выполненном с помощью точечного метода расчёта освещённости. В качестве примера в данной работе рассмотрена СНО парковой зоны, расположенной в 18 микрорайоне города Оренбурга, рисунок 5.

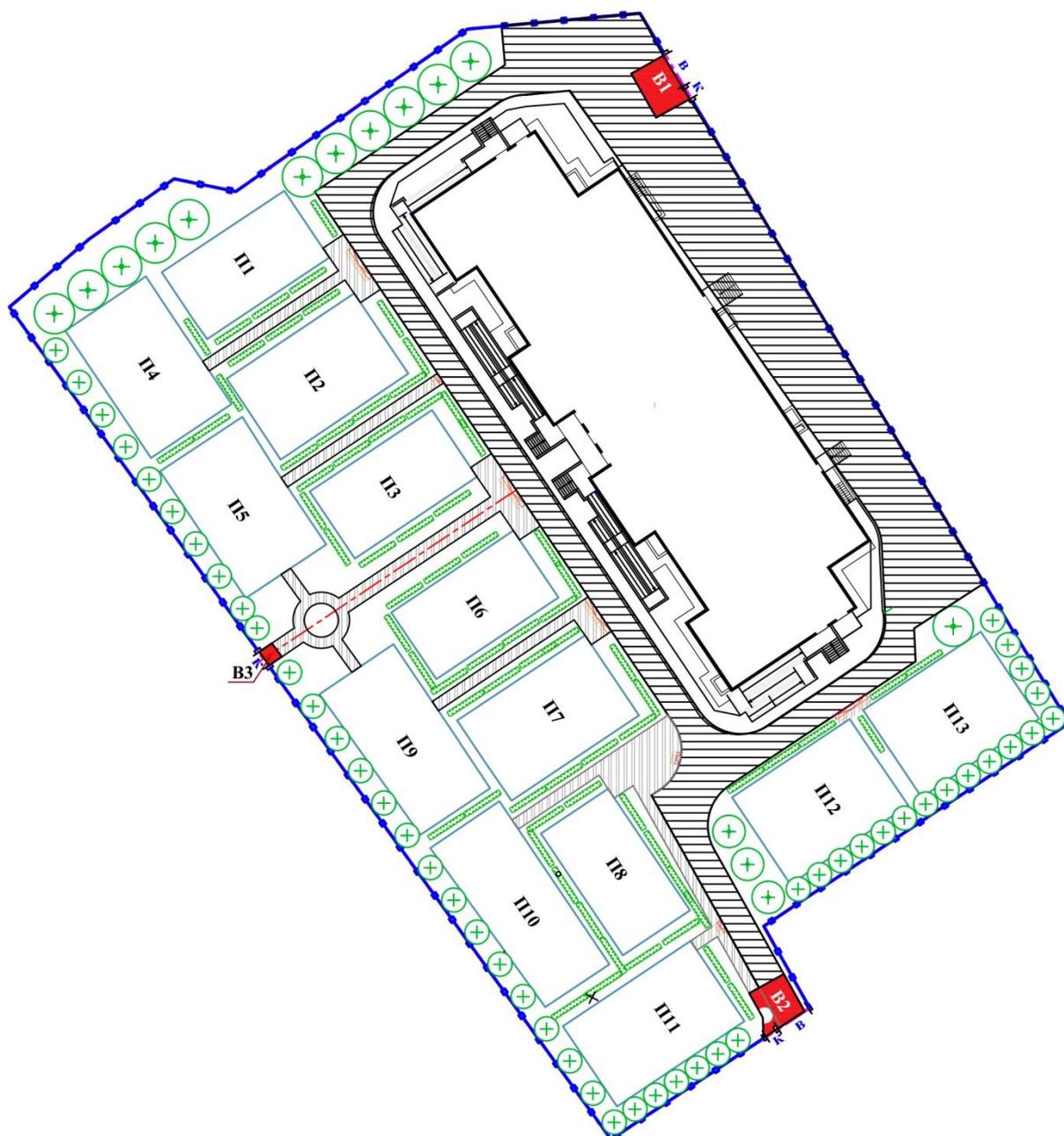


Рисунок 5 - Парковая зона в 18 микрорайоне города Оренбурга

Парковая зона включает в себя: игровые площадки (П1-П13), главные входы (В1, В2), вспомогательный вход (В3), а также центральные и боковые аллеи.

### 2.1.1 Выбор светильников наружного освещения

Подробнее рассмотрим вопрос выбора светильников для СНО. Устройства на основе светодиодов включают в себя следующие компоненты:

- цоколь;
- корпус с устройствами отвода тепла (например, вертикальными рёбрами);
- светодиодная плата;
- рассеиватель;
- электронный драйвер.

Наружные осветительные приборы имеют ряд отличий от светильников, используемых в помещении. Устройство светильника наружного освещения, на примере светильника компании LuxOn UniLed, представлено на рисунке 6 [27].

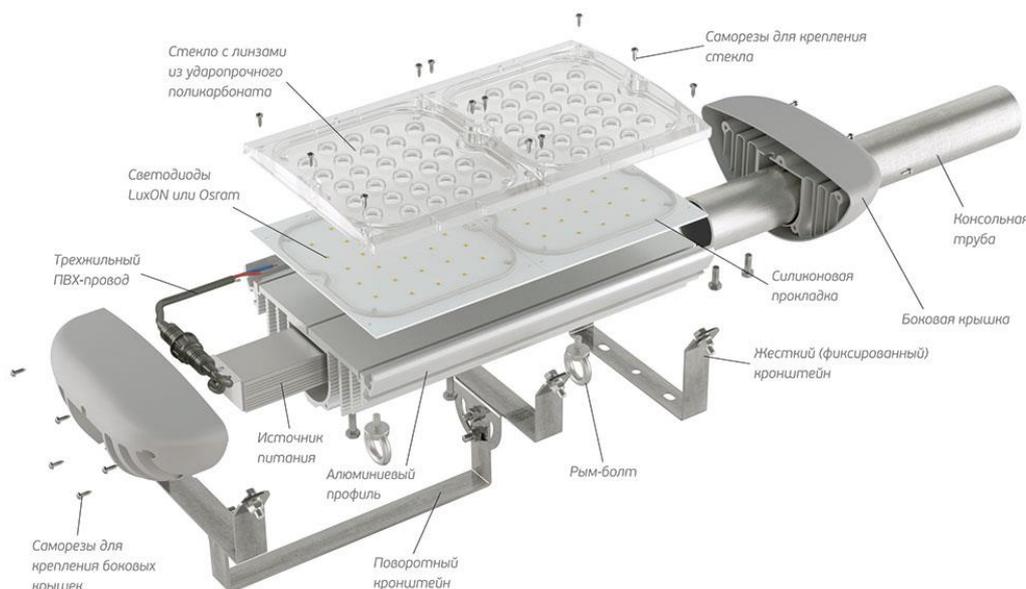


Рисунок 6 - Устройство светильника наружного освещения

Важной частью светильников наружного освещения являются линзы, позволяющие фокусировать световой поток в пучок и направлять в необходимую область. Другой особенностью является обязательное наличие прочного корпуса, защищающего устройство от воздействия окружающей среды и вандализма. Степень защиты светильников должен быть не менее IP44. Это позволит избежать попадания в корпус влаги. Как правило, в качестве материала для светильников наружного освещения используют алюминий, в особых случаях используется стальной корпус.

Выделяют несколько разновидностей уличных светодиодных светильников по типу установки: устанавливаемые на столбах, настенные, подвесные, встраиваемые.

Подвесные светильники состоят из герметичного кожуха и находящегося в нём светодиода. Данные устройства закрепляются с помощью троса или цепи на горизонтальных балках. Преимуществом подвесных светильников является способность выдерживать большие механические нагрузки, что актуально для областей, в которых в зимней период выпадает большое количество снега.

Настенный светильник является универсальным устройством, его установка возможна на любой вертикальной поверхности. Обладают большим потенциалом в области декора. Обычно имеют корпус из легких сплавов металлов и плафон из стекла или пластика.

Главным преимуществом светильников, устанавливаемых на столбах, является возможность установки светильника на большом расстоянии от земли. Это позволяет создать необходимую освещенность на большой территории.

Одним из основных преимуществ встраиваемых светильников является их скрытость (незаметность) в дневное время. Их использование актуально для подсвечивания фонтанов, скульптур и других значимых архитектурных объектов.

Для рассматриваемой в данной работе, СНО парковой зоны доминирующим критерием являются световые характеристики светильников, а не декоративные. В связи с чем рациональней будет применение светильников, устанавливаемых на столбах [28].

При выборе светодиодных светильников для уличного освещения, в том числе парковой зоны, необходимо обратить внимание на следующие факторы:

- рассеивание светового пучка: поток света может быть круглой или овальной формы. Овальная форма потока света даёт более мягкое свечение, при круглой форме свечение может быть чрезмерно ярким;
- величина светового потока;
- качество корпуса;
- высота установки;
- степень защиты корпуса;
- встроенные датчики движения, освещенности и иные энергосберегающие функции.

Предварительно для освещения территории парковой зоны, выбраны светодиодные светильники марки ДКУ62-100-001 Champion 750, производства ОАО «АСТЗ». Мощность светильников 100 Вт, световой поток 11500 лм [30]. Материал корпуса алюминий. Степень защищенности IP66. Таким образом светильники способны будут выдержать воздействие негативных факторов внешней среды.

Внешний вид выбранного светильника марки ДКУ62-100-001 Champion 750 представлен на рисунке 7 [30].



Рисунок 7 - Светильник марки ДКУ62-100-001 Champion 750

При выборе конструкции опор для уличного освещения необходимо учитывать индивидуальные факторы СНО, в которой будут применяться данные опоры. В зависимости от целевого назначения опоры могут различаться по материалу, высоте, способу крепления в грунте. От правильного подбора опор зависит длительность их эксплуатации и качество освещения.

Тип опор может отличаться в зависимости от места их применения. На объектах большой площади, например, стадионах или площадях, используют высокомагнатовые опоры высотой 12-50 метров. Для освещения автомобильных дорог и магистралей, городских улиц, парков и зон отдыха используют стандартные опоры освещения:

- опоры гранёные силовые (ОГС);
- опоры гранёные конические (ОГК);
- несилловые фланцевые гранёные (НФГ).

В особых случаях возможно использование декоративных опор. Высота установки светильников на опорах вдоль дорог и магистралей составляет 6-12 метров. Для парков и пешеходных улиц 6-9 метров.

Опоры освещения могут быть выполнены из различных материалов: металла, древесины, бетона, железобетона.

При изготовлении металлических опор применяют чугун, сталь, алюминий. Высокой устойчивостью к воздействию окружающей среды обладают оцинкованные опоры. Металлические опоры имеют небольшой вес и размеры, что значительно облегчает и удешевляет их перевозку и установку. Используемый при изготовлении опор листовой прокат толщиной всего 3-15 мм. способен выдерживать серьёзные механические нагрузки. Опоры имеют длительный срок эксплуатации, легко поддаются ремонту или демонтажу. Имеют привлекательный внешний вид, даже если изготовлены не для декоративных целей. К недостаткам металлических опор относят:

необходимость окрашивания для предотвращения образования ржавчины, высокая стоимость по сравнению с аналогами из других материалов.

Деревянные опоры, как и металлические, имеют небольшой вес, просты в перевозке и монтаже. Обладают высоким сроком эксплуатации, невысокой стоимостью, в связи с доступностью материала. Устойчивы к механическим нагрузкам. Имеют следующие недостатки: разрушение опор из-за обледенения, гниение древесины из-за неправильной обработки защитным составом.

Бетонные и железобетонные опоры являлись наиболее распространённым видом опор несколько десятилетий назад. Имеют низкую стоимость, срок службы до 50 лет. Недостатками опор является: сложность в перевозке и установке, разрушительное воздействие грунтовых вод на опоры, плохая устойчивость к ударным нагрузкам непривлекательный внешний вид.

По методу установки в грунт опоры делят на прямостоечные и фланцевые. Прямостоечные опоры устанавливаются в специально подготовленный котлован и заливаются бетоном, при фланцевом монтаже бетонируется отдельный элемент опоры, а основная часть устанавливается на постамент [29].

Высота установки светильника 5 метров над уровнем земли. Светильники устанавливаются на металлических граненых конических опорах марки ОГК-7 с кронштейнами консольного типа.

Окончательный выбор мощности и высоты установки светильников будет определен после завершения светотехнического расчёта.

### **2.1.2 Светотехнический расчет освещения парковой зоны**

Целью светотехнического расчёта является:

- определение мощности ламп, необходимой для создания требуемого уровня освещённости при известном типе, числе и местах расположения светильников;
- определения числа и мест расположения светильников при известном типе светильников и мощности ламп;
- определения расчётной освещённости;

Светотехнический расчёт можно осуществить несколькими методами.

Метод коэффициента использования светового потока применяется при расчёте общего равномерного освещения горизонтальной поверхности. Возможно использование метода при светильниках любого типа. Коэффициент использования светового потока - справочное значение, которое отлично для различных светильников, параметров помещения (длины, ширины и высоты), коэффициентов отражения потолков, стен и полов помещения. При расчёте освещённости методом коэффициента использования светового потока определяется световой поток лампы, по которому она подбирается из ряда стандартных. Поток принятой лампы должен отличаться от расчётного быть не более чем на +20, -10%. Расчётное уравнение для определения необходимого светового потока имеет вид:

$$F = \frac{(E_{\text{мин}} \cdot S \cdot k_3 \cdot z)}{n \cdot \eta}, \quad (1)$$

где  $F$  - световой поток светильника (т.е. лампы), лм;  
 $E_{\text{мин}}$  - нормируемая освещенность, лк;  
 $k_3$  - коэффициент запаса (в зависимости от типа ламп и степени загрязненности помещения);  
 $z$  - поправочный коэффициент, учитывающий, что средняя освещенность в помещении больше, чем нормируемая, минимальная;  
 $n$  - число светильников (ламп);  
 $\eta$  - коэффициент использования светового потока.

Метод удельной мощности позволяет предварительно определить установленную мощность осветительной установки. Удельная мощность является справочным значением, зависящим от таких факторов как: тип светильника, нормированная освещенность, коэффициент запаса, коэффициент отражения поверхностей помещения, параметров помещения. Удельную установленную мощность можно определить по формуле:

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{л}} \cdot n}{S}, \quad (2)$$

где  $P_{\text{уд}}$  - удельная установленная мощность, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $P_{\text{л}}$  - мощность лампы, Вт;  
 $n$  - число ламп в помещении;  
 $S$  — площадь помещения, м<sup>2</sup>.

Вышеописанные методы расчёта освещенности подходят для определения освещенности закрытых помещений. Для расчёта уличного освещения используется точечный метод. Точечный метод используется для определения общего равномерного и локализованного освещения. Метод позволяет производить расчёт освещенности независимо от расположения освещаемой поверхности и любом распределении освещенности. Отражение от поверхности при данном методе расчёта учитывается приближенно [31].

Подробнее рассмотрим расчёт освещённости игровой площадки, обозначенной на рисунке 5 как зона П5. Зону П5 освещает светильник №5. Также рядом расположены светильники №2, №3, освещающие зоны П4, П2, и светильник №6, освещающий одну из аллей парка. Необходимо определить действительную расчётную освещённость от перечисленных ранее светильников в точке А, гипотетически принятой нами как наиболее удалённую от источников света. Расстояния от учитываемых светильников до точки А представлены на рисунке 8.

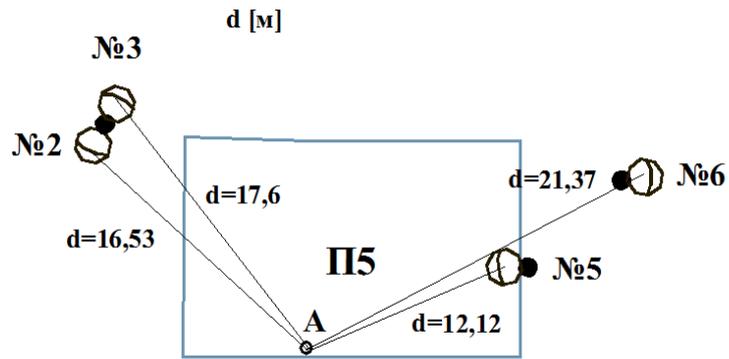


Рисунок 8 - Расстояния от учитываемых светильников до точки А

Освещённость от светильника №5 в расчётной точке А выражается законом квадратов расстояний, значения, используемые в расчёте представлены на рисунках 9, 10.

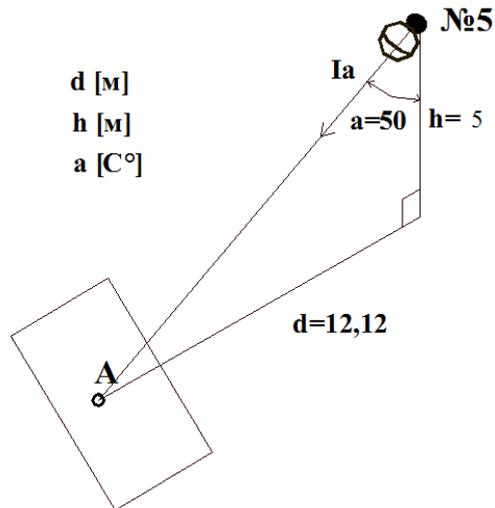
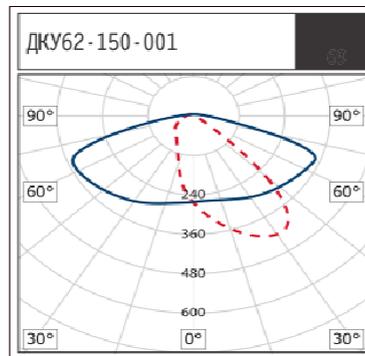


Рисунок 9 – Положение светильника №5, относительно точки А



- С0°-С180° I<sub>аmax</sub>=250 кд
- С90°-С270° I<sub>аmax</sub>=370 кд

Рисунок 10 – Фотометрическая диаграмма светильника

$$E_{№5} = \frac{I_a \cos^3 a}{h^2}; \quad (3)$$

где  $I_a=250$  кд – сила света, согласно фотометрической диаграмме, рисунок 10, по каталожным данным светильника [30];

$a=50^\circ$  – согласно [32] при  $h=5$  м,  $d=12,12$  м;

$$E_{№5} = \frac{250 \cdot 0,899}{5^2} = 8,99 \text{ лк.}$$

Аналогичным образом определяется освещённость в расчётной точке А от остальных светильников. Используя метод наложения освещённости, получаем:

$$\sum E_A = 11 \text{ лк.}$$

Определим действительную расчётную освещённость в рассматриваемой точке А:

$$E_A = \mu \cdot \sum E_A \cdot K; \quad (4)$$

где  $\mu=1,05$  - коэффициент добавочной освещённости;

$K=1,1$  - коэффициент запаса для светодиодных светильников;

$$E_A = 1,05 \cdot 10 \cdot 1,1 = 12,7 \text{ лк.}$$

Полученный результат больше 10 лк, что удовлетворяет требования [8, 9]. Аналогичным образом была определена освещённость в других расчётных точках зоны П5, результаты представлены на рисунке 11. Для проверки полученных результатов был выполнен расчёт освещённости данной площадки посредством программы DIALux, результаты представлены на рисунке 11.

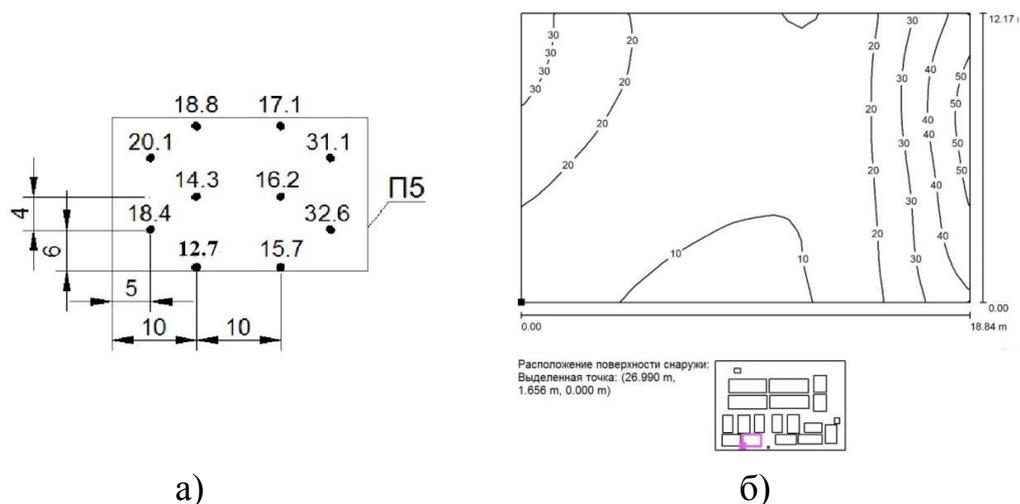


Рисунок 11 - Результаты расчёта площадки П5:  
а) точечным методом, б) посредством программы DIALux

Как видно из рисунка 11, результаты, полученные точечным методом и посредством программы DIALux, совпадают, небольшое расхождение связано с отсутствием учёта в DIALux коэффициента запаса светильников.

### 2.1.3 Проектирование схемы расположения светильников наружного освещения

Согласно точечному методу расчета, освещённость считается для каждой точки рассчитываемой поверхности, относительно всех источников освещения. Точность расчёта напрямую связана с количеством определённых точек, в связи с чем, для повышения точности расчёта воспользуемся программой для проектирования освещения интерьеров и улиц DIALux.

Места установки светильников выбраны, опираясь на необходимость освещения всех центральных и боковых аллей парка, а также с учетом условия: для освещения одной игровой площадки, используется один светильник. Предварительная расстановка осветительных приборов по территории парковой зоны представлена на рисунке 12.

Основные нормы освещенности для различных зон парковой зоны указаны в пункте 7.34, таблицы 14 СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [8] и пункте 7.75, таблицы 26 СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [9].

Основные освещаемые зоны и нормы освещённости, предъявляемые к ним, представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Основные освещаемые зоны и нормы освещённости

Обозначение	Наименование	СНиП 23	СП 52	Макс. норм. показатели
П1-П13	Игровые площадки	10 лк	10 лк и $E_{\text{мин}}/E_{\text{ср}}=0,3$	10 лк и $E_{\text{мин}}/E_{\text{ср}}=0,3$
В1-В2	Главные входы	4 лк	6 лк и $E_{\text{мин}}/E_{\text{ср}}=0,2$	6 лк и $E_{\text{мин}}/E_{\text{ср}}=0,2$
В3	Вспомогательные вх.	1 лк	1 лк и $E_{\text{мин}}/E_{\text{ср}}=0,1$	1 лк и $E_{\text{мин}}/E_{\text{ср}}=0,1$
	Центральные аллеи	2 лк	-	2 лк
	Боковые аллеи	1 лк	1 лк и $E_{\text{мин}}/E_{\text{ср}}=0,1$	1 лк и $E_{\text{мин}}/E_{\text{ср}}=0,1$

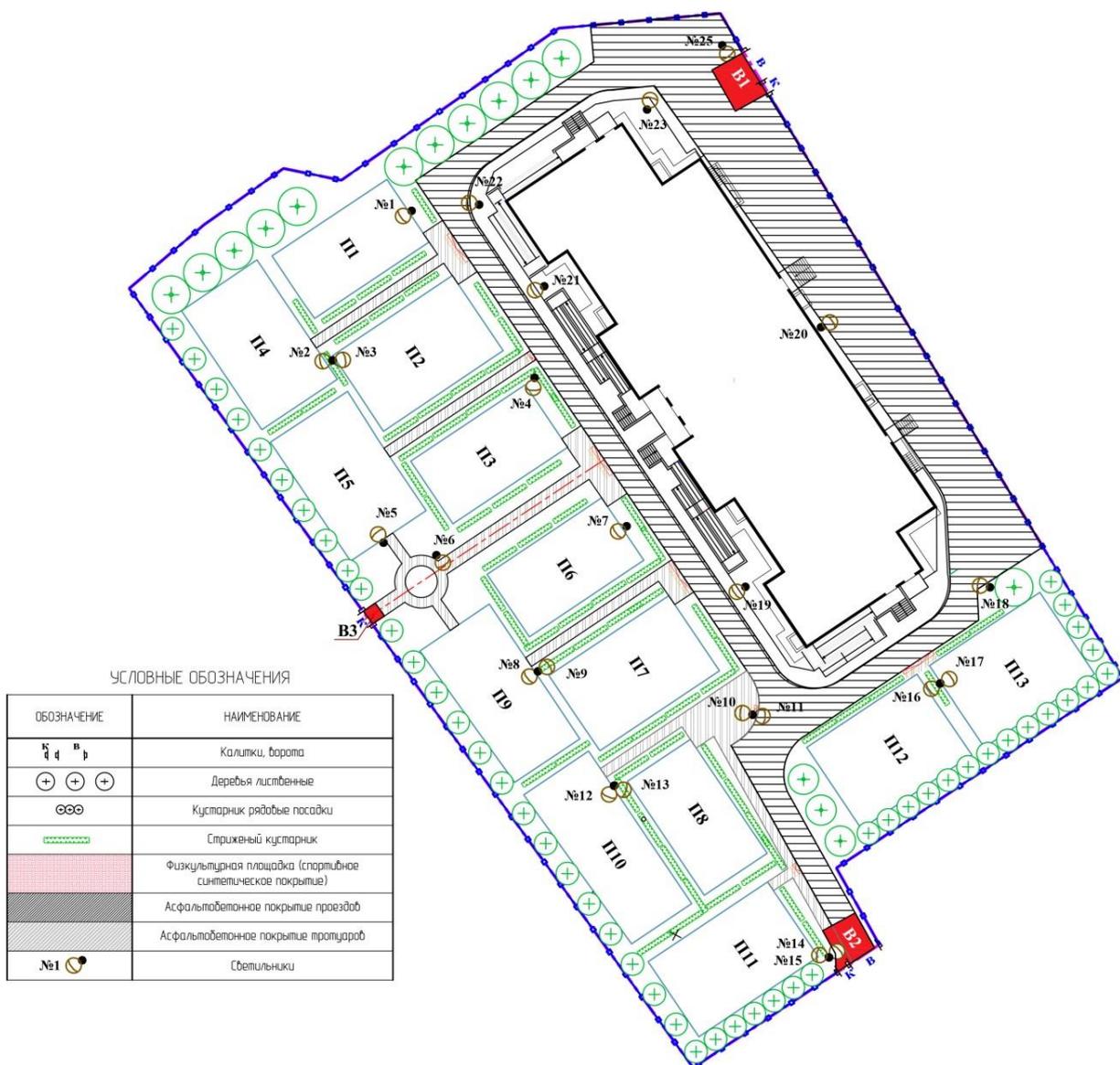
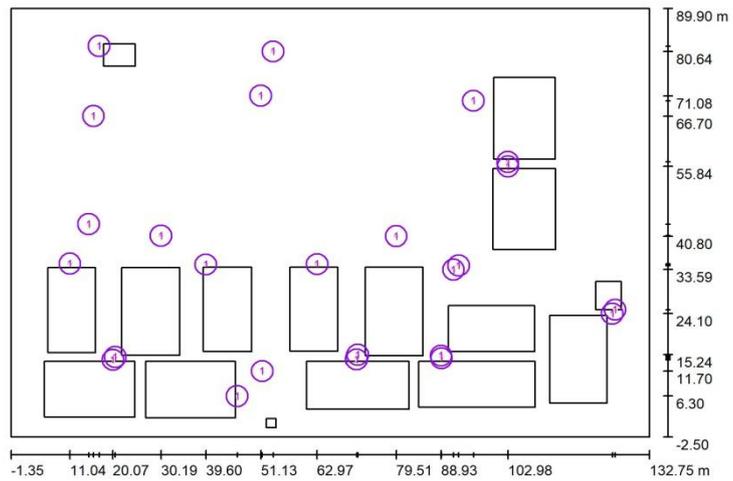


Рисунок 12 - Предварительная расстановка осветительных приборов по территории парка

Посредством программы DIALux была рассчитана освещённость каждой из зон парковой зоны, а также освещённость всей территории парковой зоны в целом.

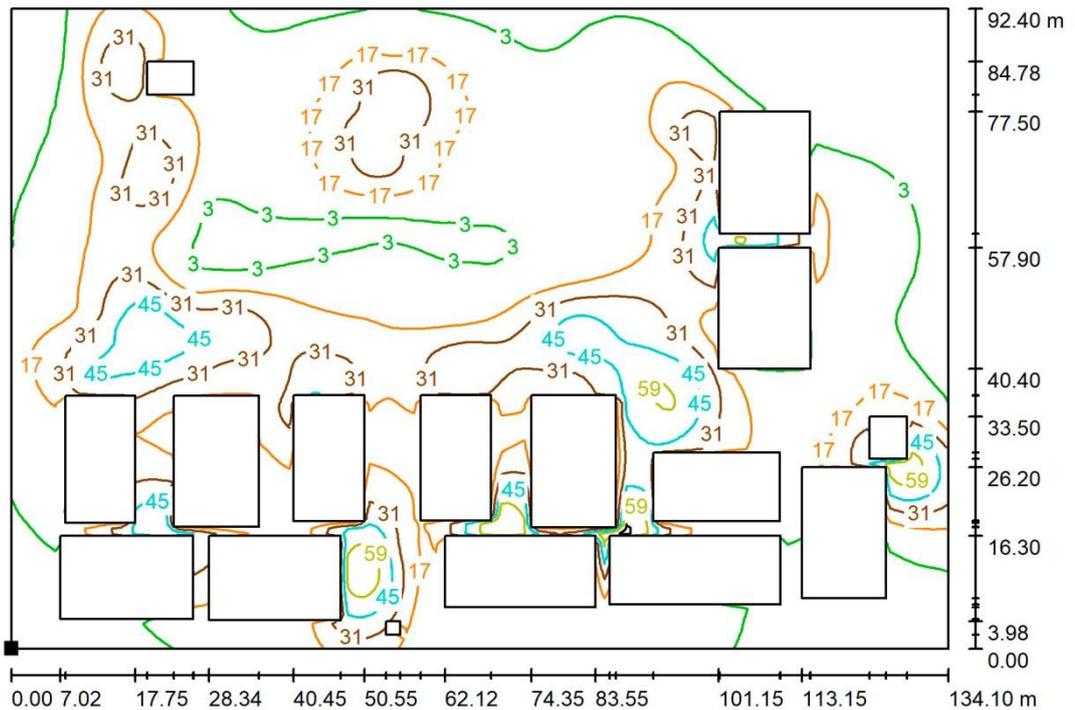
Данные компоновки и план расположения светильников представлен на рисунке 13. Расчёт всей территории парка (изолинии) представлен на рисунке 14. Средняя освещённость площадок и отношение минимальной освещённости к средней сведены в таблицу 4.



**Ведомость светильников**

№	Шт.	Обозначение
1	25	Unilumin 599 DKU62-100-001

Рисунок 13 - Данные компоновки и план расположения светильников



Расположение поверхности  
снаружи:  
Выделенная точка:  
(-1.350 m, -2.500 m, 0.000 m)

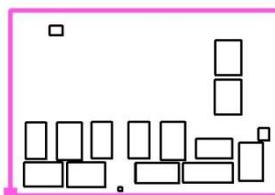


Рисунок 14 - Расчёт всей территории детского парка (изолинии)

Таблица 4 - Освещённость зон

Зона	Еср, лк	E <sub>min</sub> /Еср, лк	Зона	Еср, лк	E <sub>min</sub> /Еср, лк	Еср(норм), лк	E <sub>min</sub> /Еср(норм), лк
П1	22	0,488	П10	31	0,32	10	0,3
П2	21	0,353	П11	20	0,31		
П3	31	0,315	П12	22	0,3		
П4	20	0,3	П13	27	0,3		
П5	19	0,425					
П6	26	0,539					
П7	33	0,497					
П8	21	0,3					
П9	17	0,3					
Зона	Еср, лк	E <sub>min</sub> /Еср, лк	Зона	Еср, лк	E <sub>min</sub> /Еср, лк	Еср(норм), лк	E <sub>min</sub> /Еср(норм), лк
В1	27	0,431	В2	45	0,589	6	0,2
В3	27	0,819				1	0,1

Согласно результатам светотехнического расчёта, посредством точечного метода расчёта и программы DIALux, предварительно выбранные места расположения светильников обеспечивают уровень освещённости, соответствующий нормам по СНиП 23-05-95 [8], СП 52.13330.2016 [9].

## 2.2 Расчет системы электроснабжения светильников наружного освещения.

### 2.2.1 Расчёт осветительной нагрузки парковой зоны

По функциональному назначению электрические сети наружного освещения делят на питающие и распределительные. Распределительная сеть – это электрическая сеть, питающая устройства наружного освещения.

Схема питания СНО должна соответствовать следующим требованиям:

- обеспечивать требуемую степень надёжности питания;
- соответствие нормативным значениям показателей качества электроэнергии;
- регламентированные уровни и постоянство напряжения;
- обеспечивать безопасность от пожара, взрыва, поражения электрическим током людей;
- простота и удобство эксплуатации;
- использование распространённых и легкодоступных монтажных изделий, возможность предварительной заготовки элементов сети;
- экономное использование стальных и полиэтиленовых труб, меди, свинца;
- экономичность осветительных установок;
- удовлетворение эстетическим требованиям.

В начале каждой питающей линии необходима установка аппарата защиты и отключения. В начале групповых линий обязателен аппарат защиты на всех фазных проводниках (предохранитель или автоматический выключатель).

Питающие линии могут выполняться радиальными, радиально-магистральными или магистральными [33].

Наиболее востребованным видом кабельной продукции являются кабели для прокладки в земле. Они используются в сетях электроснабжения зданий, сетях декоративного и уличного освещения. Прокладка кабелей под землей должна производиться в соответствии с требованием ПУЭ [34]. Оптимальным кабелем для прокладки под землей является бронированный кабель, обеспечивающий защиту от механических повреждений. В случае применения небронированного кабеля необходимо произвести его укладку в асбестоцементные или специализированные ПВХ или ПЭ трубы. При прокладке кабеля до 1 кВ в земле, необходимо защищать его кирпичом или железобетонными плитами в местах высокой вероятности механических повреждений.

Срок службы кабеля зависят от его типа изоляции. В современных кабелях для прокладки в земле используется бумажная пропитанная изоляция, а также пластмассовая изоляция (ПВХ, полиэтилен). Бумажная пропитанная изоляция имеет хорошие электрические характеристики, долгий срок службы, высокую допустимую температуру и невысокую стоимость. К недостаткам бумажной пропитанной изоляции относят гигроскопичность, неравномерное распределение пропитывающего состава при разности уровней прокладки.

Пластмассовая изоляция производится из полиэтилена или поливинилхлорида (ПВХ). Кабели с пластмассовой изоляцией обладают высокой сопротивляемостью агрессивной среде, но плохо выдерживают механические воздействия. В связи с чем при прокладке в земле, используют марки, усиленные ленточной броней, например, ВБШв или ПвБШв.

При прокладке кабеля в почве, оказывающей разрушительное воздействие на оболочку кабеля (насыпной строительный материал, солончаки, шлак и т.д.), а также в местах повышенного воздействия электрокоррозии, необходимо применение кабелей со свинцовой оболочкой. В зонах с повышенным риском механических повреждений допустимо применение кабеля с проволочной броней, например, ПвКШп или ПвКаШп.

Таким образом, в грунте с малой коррозионной активностью допустимо применение кабелей марки: ААШв, ААШп, АВВГ, ААП2л, АСБ, ААБл, АСПл, АПсВГ, АПВГ, АПвВГ, ААПл и т.д.

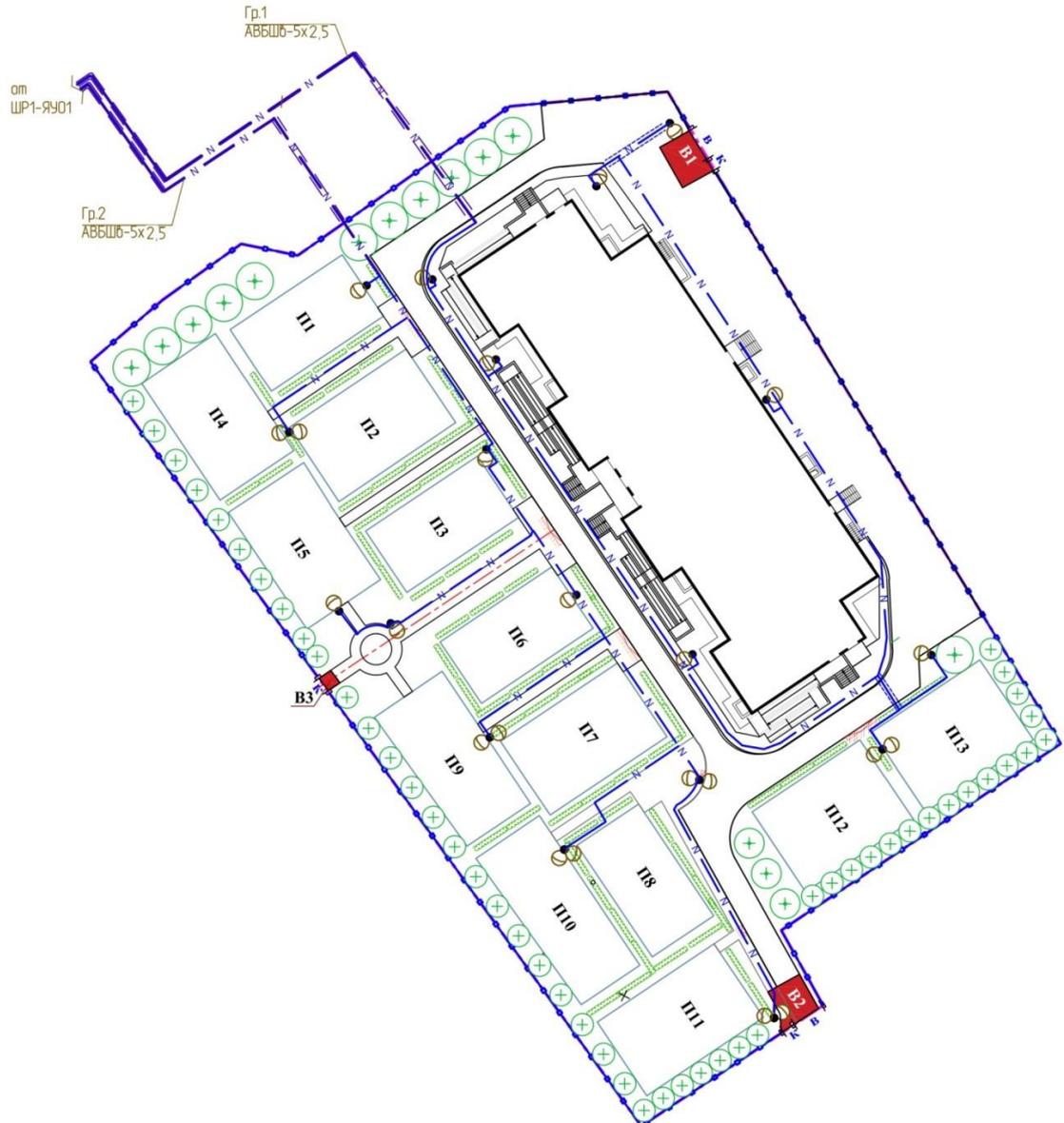
В грунте со средней коррозионной активностью: ААБл, ААШв, ААБ2л, ААШп, ААП2л, АСБ, ААПл, АСПл, АПвБШв, АВБШп, АВБШв и т.д.

В качестве проводников рассматриваемой СНО парковой зоны принят кабель марки АВБШв. Кабель состоит из пяти однопроволочных круглых токопроводящих алюминиевых жил, соответствующих 1 классу по ГОСТ 22483-2012 [35]. Изоляция жил выполнена из ПВХ пластика номинальной толщиной 0,6 мм. Сердечник выполнен из ПВХ пластика, изолированные жилы

скручены вокруг него. Поясная изоляция состоит из поливинилхлоридных лент толщиной не менее 0,9 мм. Защитный покров типа «ББШв» по ГОСТ 7006-72 [36]: броня из двух стальных оцинкованных лент толщиной не менее 0,3 мм, наружный покров из выпрессованного поливинилхлоридного защитного шланга толщиной не менее 1,8 мм [37].

Питание осветительных установок разрабатываемой СНО осуществляется по двум линиям. Первая линия включает в себя 9 светильников по 100 Вт, вторая линия 15 светильников. Напряжение сети освещения 380В/220В.

План наружных сетей СНО представлен на рисунке 15.



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Наименование	Обозначение
Светодиодные светильники марки ДКУ62-100-001 Champion 750	
Кабель АВБШв 5х2,5	

Рисунок 15 - План наружных сетей СНО

Для отдельных электроприемников в качестве расчётных нагрузок берут их номинальные активные и реактивные мощности. Для группы электроприемников расчётная нагрузка всегда будет меньше установленной мощности. Установленная мощность освещения будет складываться из мощности всех светильников в линии [38]. Расчётную нагрузку линии освещения можно определить по формуле:

$$P_{\text{расч}} = P_{\text{у}} \cdot K_{\text{со}}, \quad (4)$$

где  $K_{\text{со}}$  – коэффициент спроса, для мощности меньше 5 кВт равен 1 [33].

Расчётная нагрузка линии освещения 1:

$$P_{\text{расч}} = 100 \cdot 9 \cdot 1 = 900 \text{ Вт.}$$

Расчётная нагрузка линии освещения 2:

$$P_{\text{расч}} = 100 \cdot 15 \cdot 1 = 1500 \text{ Вт.}$$

### 2.2.2 Выбор сечения проводов осветительной сети

Подбору сечения проводников посвящена глава 1.3 ПУЭ [34] «Выбор проводников по нагреву, экономической плотности тока и по условиям короны». Неправильно выбранная площадь поперечного сечения проводника чревата негативными последствиями. При выборе слишком малого значения сечения проводника возникает вероятность большой токовой нагрузки на кабель, провод, что ведёт к перегреву. Перегрев проводников может стать причиной аварийной ситуации и повлечь за собой повреждение электрооборудования. Повышение сечения увеличивает безопасность электросетей, но является экономически невыгодным из-за перерасхода средств. В связи, с чем важной задачей является выбор оптимального сечения проводника.

Действующие на данный момент нормативные документы, опирающиеся на международный стандарт МЭК 364 «Электрические установки зданий», включают в себя требования по выбору сечений нулевых рабочих (N), совмещённых нулевых рабочих и защитных (PEN) и защитных (PE) проводников. Правильный выбор этих проводников обеспечивает пожарную, электрическую безопасность электроустановок.

Для однофазных сетей и трёхфазных сетей, по которым осуществляется питание однофазных нагрузок, сечение нулевого рабочего проводника (N) должно равняться сечению фазных проводников, если они имеют сечение до 16 мм<sup>2</sup> по меди и 25 мм<sup>2</sup> по алюминию.

Сечение защитного проводника (РЕ) должно быть равным сечению фазных проводников при сечении их до 16 мм<sup>2</sup>.

Выбор сечения кабеля сводится к расчёту длительно допустимых токов, т.е. принимает такое сечение кабеля, которое сможет выдержать длительно расчётные токи данного участка. Значения допустимых длительно токов определены в таблица 1.3.4-1.3.30 ПУЭ [34].

Расчётный ток линий:

$$I_{\text{расч}} = \frac{P_{\text{расч}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}, \quad (5)$$

где  $\cos\varphi = 0,95$  – для выбранной марки светильников.

$$I_{\text{расчл1}} = \frac{0,9}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,95} = 1,44 \text{ А};$$

$$I_{\text{расчл2}} = \frac{1,5}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,95} = 2,4 \text{ А}.$$

Осуществим проверку выбранного сечения кабеля по методу наибольшего длительно допустимого тока. При выборе сечения кабеля необходимо учесть поправочные коэффициенты на землю и воздух при прокладке кабеля (ПУЭ таблицы 1.3.3, 1.3.23, 1.3.26 [34]).

$$I_{\text{расч}} \leq I_{\text{длит.доп.}} \cdot K_1 \cdot K_2; \quad (6)$$

где  $K_1=1$ , температурный коэффициент при прокладке кабеля в земле (температура +15 °С),

$K_2=1$ , коэффициент учитывающий число параллельных линий, при максимальном количестве линий – 3.

Примем кабель АВБШв 5х2,5, согласно таблице 1.3.7. ПУЭ [34] при прокладке выбранного кабеля в земле  $I_{\text{длит.доп.}} = 29 \text{ А}$ . Тогда для линий 1,2:

$$1,44 \text{ А} \leq 29 \text{ А};$$

$$2,4 \text{ А} \leq 29 \text{ А}.$$

Неравенство  $I_{\text{расч}} \leq I_{\text{длит.доп.}}$  справедливо для всех линий. Кабель выбранной марки проходит по проверке по наибольшему длительно допустимого току.

Главная сложность расчёта сети освещения, имеющей ответвления – это распределение между участками потерь напряжения для создания оптимальной

сети. На практике принято считать, что минимальное значение приведённых затрат будет при таком распределении потерь напряжения по звеньям сети, при котором расход проводникового материала минимален.

Определим потери напряжения в линиях. Расчёт ведётся по методу минимума проводникового материала. Данные для расчёта представлены на рисунке 16.

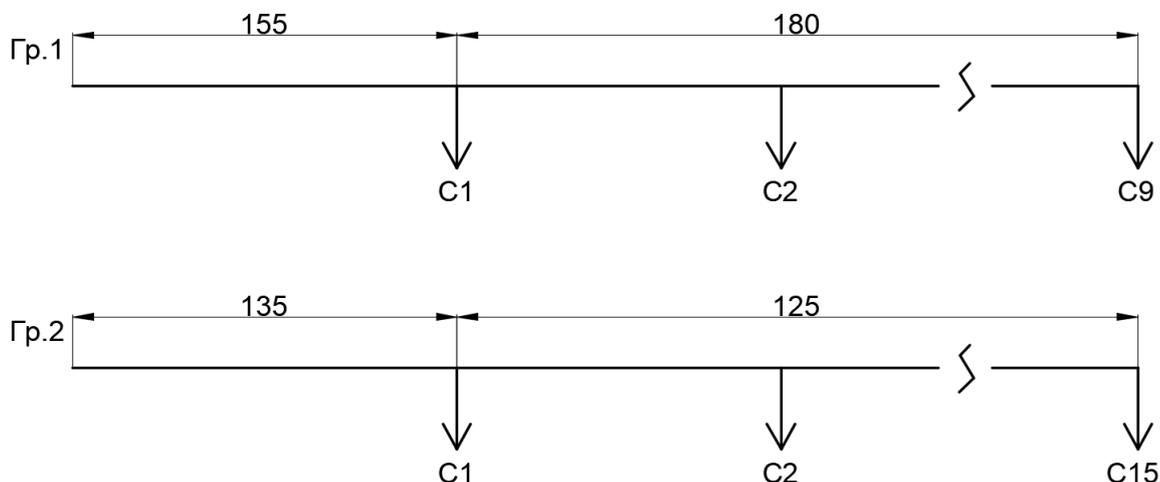


Рисунок 16 - Данные для расчёта потерь в линиях освещения.

Моменты линий [56]:

$$M = P \cdot n \cdot \left( l_0 + \frac{l_1}{2} \right) = P_{\text{расч}} \cdot \left( l_0 + \frac{l_1}{2} \right), \quad (7)$$

где  $l_0$ , м – расстояние до первого светильника в линии,  
 $l_1$ , м – участок линии с равномерным распределением нагрузки (от первого до последнего светильника);  
 $P$  – мощность отдельного светильника;  
 $n$  – количество светильников.

$$M_1 = 100 \cdot 9 \cdot \left( 155 + \frac{180}{2} \right) = 220,5 \text{ кВт} \cdot \text{м}.$$

$$M_2 = 100 \cdot 15 \cdot \left( 135 + \frac{125}{2} \right) = 296,25 \text{ кВт} \cdot \text{м}.$$

Потери напряжения в линиях:

$$\Delta U = \frac{M}{S \cdot C}, \quad (8)$$

где  $S$ , мм<sup>2</sup> – сечения линии,

$C=46$  - коэффициент, зависящий от схемы питания и марки материала проводника [39],

$$\Delta U_1 = \frac{220,5}{2,5 \cdot 46} = 1,92\%;$$

$$\Delta U_2 = \frac{296,25}{2,5 \cdot 46} = 2,58\%.$$

Подключение светильников наружного освещения выполнено кабелем ВВГ-3х2.5, проложенным скрыто в опоре освещения. В связи с незначительной длиной кабеля пренебрежём потерями в нём.

Таким образом, потери напряжения на самом удалённом светильнике не превышают 7,5%, что удовлетворяет требованиям СП 31-110-2003 [40]. Кабель выбранной марки проходит проверку на потерю напряжения в линиях.

### 2.2.3 Проверка трансформаторов на перегрузку

Подключение светильников наружного освещения, осуществляется от ящика управления освещением (ЯУО) марки ЯУО9601-3474У1 IP54, установленного в трансформаторной подстанции. В ЯУО предусмотрено твёрдотелое реле, посредством которого автоматизированная система управления освещением может отключать питание сети освещения. Питание ЯУО осуществляется от одного из трансформаторов трансформаторной подстанции (ТП) с двумя силовыми трансформаторами 10/0,4кВ.

Также от данного ТП предусматривается электроснабжение здания на территории парковой зоны. В отношении обеспечения надежности электроснабжения электроприемники здания относятся к I и II категории. Питание электроприемников I категории выполнено от двух независимых источников с устройством АВР в ВРУ. Питание электроприемников II категории выполнено от двух независимых источников, переключение между которыми осуществляется с помощью перекидного рубильника в ВРУ здания. Для электроприемников II категории проектом предусмотрено ВРУ1 типа ВРУ9-11-10УХЛ4 (напольного исполнения).

Для электроприемников I категории предусмотрено ВРУ с АВР — ВРУ2 типа ШУ-К-8203Р-1-42741-31У3 (напольного исполнения).

Однолинейная расчётная схема трансформаторной подстанции представлена на рисунке 17. Однолинейная расчётная схема ЯУО представлена на рисунке 18. Мощности электроприёмников взяты из существующего объекта - здания на территории парковой зоны, расположенного в 18 микрорайоне города Оренбурга.

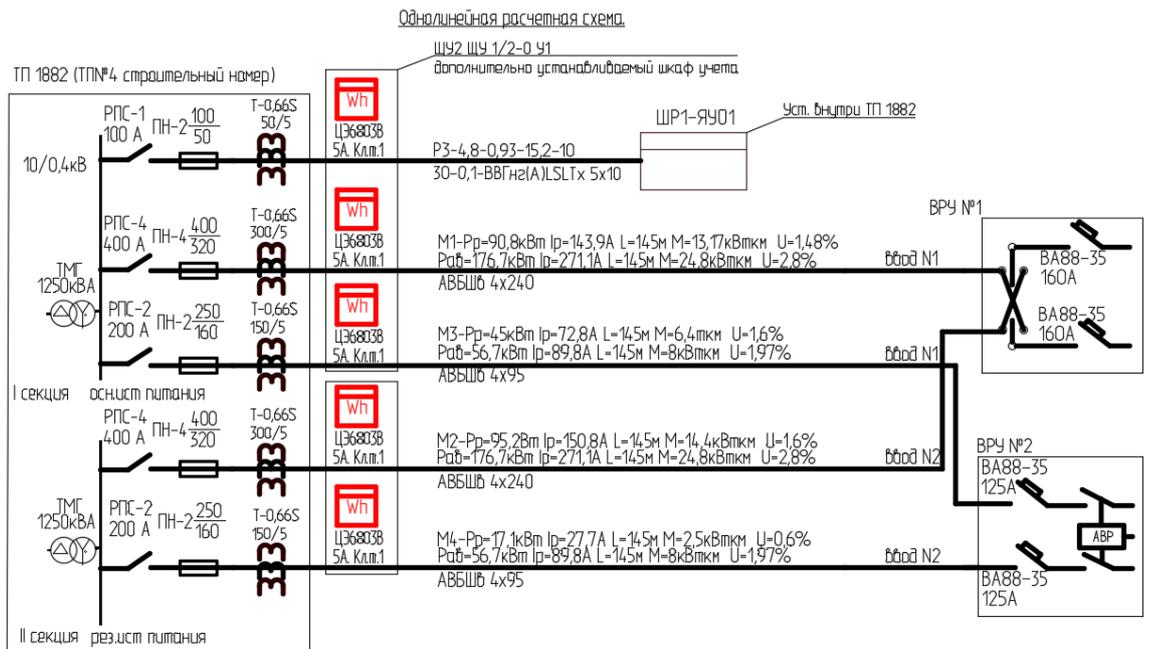


Рисунок 17 - Однолинейная расчётная схема трансформаторной подстанции

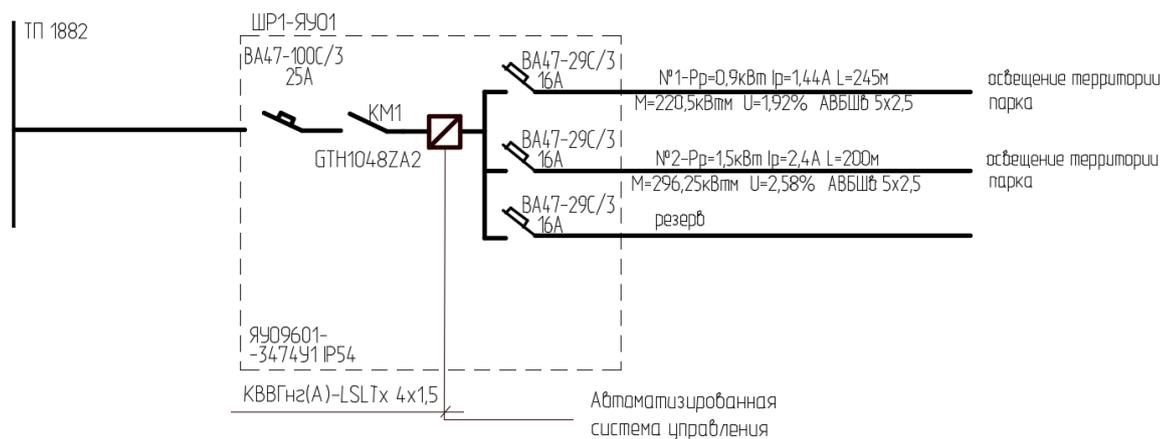


Рисунок 18 - Однолинейная расчётная схема ЯУО

Проведём проверку трансформаторов подстанции на перегрузку. Так как подстанция двухтрансформаторная, то в проверке на систематическую перегрузку нет необходимости. Проведём проверку на аварийную перегрузку в случае отключения одного из трансформаторов.

Полная расчётная мощность аварийного режима:

$$S_p = \frac{P_{ВРУ1ав} + P_{ВРУ2ав}}{\cos\varphi_1} + \frac{P_{осв}}{\cos\varphi_2}, \quad (9)$$

где для здания с пищеблоком согласно таблице 6.12 СП 31-110-2003 [40]; для ДКУ62-100-001.

$$S_p = \frac{176,7 + 56,7}{0,98} + \frac{4,8}{0,98} = 243 \text{ кВА.}$$

Коэффициент перегрузки в аварийном режиме:

$$K_{\text{нтав}} = \frac{S_{\text{нт}}}{S_p}; \quad (10)$$

$$K_{\text{нтав}} = \frac{1250}{243} = 5,14.$$

$K_{\text{нтав}} > 1$ , трансформаторы не испытывают перегрузки в аварийном режиме. Трансформаторная подстанция спроектирована с учётом присоединения в будущем дополнительной нагрузки.

## Выводы по 2-й главе.

По результатам светотехнического расчёта СНО и расчёта системы электроснабжения светильников наружного освещения нами были сделаны следующие выводы:

1. Выбранные для рассматриваемой СНО места расположения и мощность светильников, обеспечивают уровень освещённости, соответствующий нормам по СНиП 23-05-95, СП 52.13330.2016, что подтверждает расчёт посредством программы DIALux.

2. Для выбранного кабеля СНО марки АВБШв 5х2,5, неравенство  $I_{расч} \leq I_{длит.доп.}$  справедливо для всех линий. Кабель выбранной марки проходит по проверке наибольшего длительно допустимого тока.

3. Расчёт потерь напряжения в линиях освещения методом минимума проводникового материала показал, что потери напряжения на самом удалённом светильнике не превышают 7,5%, что удовлетворяет требованиям СП 31-110-2003. Кабель выбранной марки проходит проверку на потерю напряжения в линиях.

4. Коэффициент перегрузки в аварийном режиме трансформаторов питающих СНО и здание, расположенное в парковой зоне,  $K_{нтав} > 1$ . Трансформаторы не испытывает перегрузки в аварийном режиме.

## Глава 3 Разработка энергоэффективной системы автоматизированного управления электроснабжением наружного освещения.

### 3.1 Разработка структурной схемы автоматизированной системы управления электроснабжением светильников наружного освещения

Ранее нами были сделаны следующие выводы в отношении управления СНО:

- Автоматизированные системы управления наружным освещением парковой зоны с использованием методов искусственного интеллекта и светодиодных светильников в настоящее время являются наиболее перспективными;

- Согласно СП 52.13330.2016 [9] допустимо при уменьшении интенсивности движения до 1/5 максимальной величины снижать уровень наружного освещения городских площадей на 50 %.

Таким образом, автоматизированная система управления электроснабжением светильниками наружного освещения должна включать в себя следующие элементы: датчики для получения информации об уровне наружного освещения и наличие посетителей в парковой зоне, микроконтроллер с возможностью программирования, светодиодные светильники. Также необходимо предусмотреть возможность диммирования светильников.

Опираясь на данные требования, была составлена структурная схема автоматизированной системы управления СНО (рисунок 19). На рисунке 19 введены следующие обозначения: Д – датчики освещённости, движения; ИСПР - интеллектуальная система принятия решений; МК – микроконтроллер; Рл- реле.

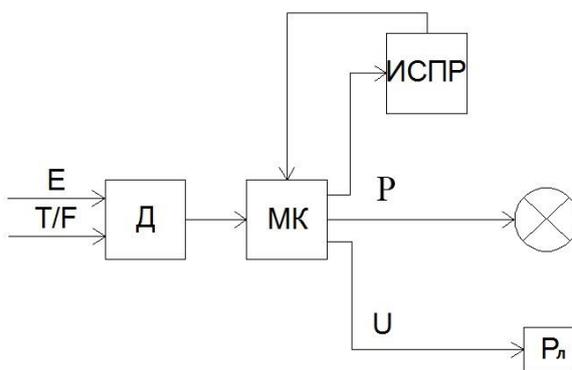


Рисунок 19 – Структурная схема автоматизированной системы управления СНО

Рассмотрим работу автоматизированной системы управления, опираясь на представленную структурную схему. Входными значениями для микроконтроллера являются данные собранные с датчиков. Интеллектуальная

система принятия решений на основе входных данных от микроконтроллера (данные датчиков, информация о состоянии управляемых устройств и других) и согласно алгоритму функционирования СНО осуществляет управление. Выходными данными микроконтроллера является величина мощности питающей сети светильников СНО и решение о включение/отключение питания линий СНО.

Рассмотрим один из вариантов технической реализации структурной схемы автоматизированной системы управления СНО представленной на рисунке 19. Автоматизированная система управления выполнена на основе интегрированной системы охраны «Орион» (Болид), представляющей собой совокупность аппаратных и программных средств для создания систем контроля и диспетчеризации объектов. Система состоит из пульта управления С2000-Т исп.1 (средний уровень) и приборов нижнего уровня: контроллера двухпроводной линии связи С2000-КДЛ, блока сигнально-пускового С2000-СП1. Связь между пультом управления и приборами нижнего уровня осуществляется по интерфейсу RS-485. Пульт управления с приборами нижнего уровня осуществляют сбор информации с датчиков и управляют световым потоком светильников, питающей сетью.

С2000-КДЛ по двухпроводной линии связи осуществляет контроль состояния адресных датчиков движения С2000-ПИРОН. Подключение неадресного дискретного датчика освещенности House-Sensor AL02-R [41] к двухпроводной линии С2000-КДЛ осуществляется через адресный расширитель С2000-АР1. С целью изолирования короткозамкнутых участков в двухпроводной линии С2000-КДЛ устанавливается блок разветвительно-изолирующий БРИЗ.

Автоматическое включение, отключение линий СНО осуществляется с помощью трехфазного твердотелого реле GTN1048ZA2 [42], управление которым осуществляет блок сигнально-пусковой С2000-СП1.

Датчики движения устанавливаются на опорах освещения на высоте 2 - 3 метра, что обеспечивает зону обнаружения до 12 метров, угол обзора в горизонтальной плоскости 90°. Для каждой игровой площадки устанавливается собственный датчик движения, зона обнаружения которого покрывает большую часть площадки. Датчик освещенности устанавливается на теневой стороне здания на высоте 3 метров.

Выбранные ранее светильники ДКУ62-100-011 Champion 750 [30] включают в свою конструкцию встроенный регулируемый драйвер 1-10 В. Протокол управления 1-10 В осуществляет управление светильниками посредством постоянного напряжения. Напряжение 1 В соответствует минимальному уровню освещения, 5 В — 50% светового потока и 100 В — 100% светового потока. Линии управления регулируемые драйверами светильников подключаются к аналоговым выходам С2000-Т. Контроллер С2000-Т имеет два аналоговых выхода, что позволяет создать всего две линии управления. В связи с чем используется дополнительный контроллер С2000-Т, который находится в подчинение основного пульта управления. Деление светильников парковой зоны на группы управления, на примере

рассматриваемой ранее парковой зоны, расположенной в 18 микрорайоне города Оренбурга, представлено на рисунке 20.

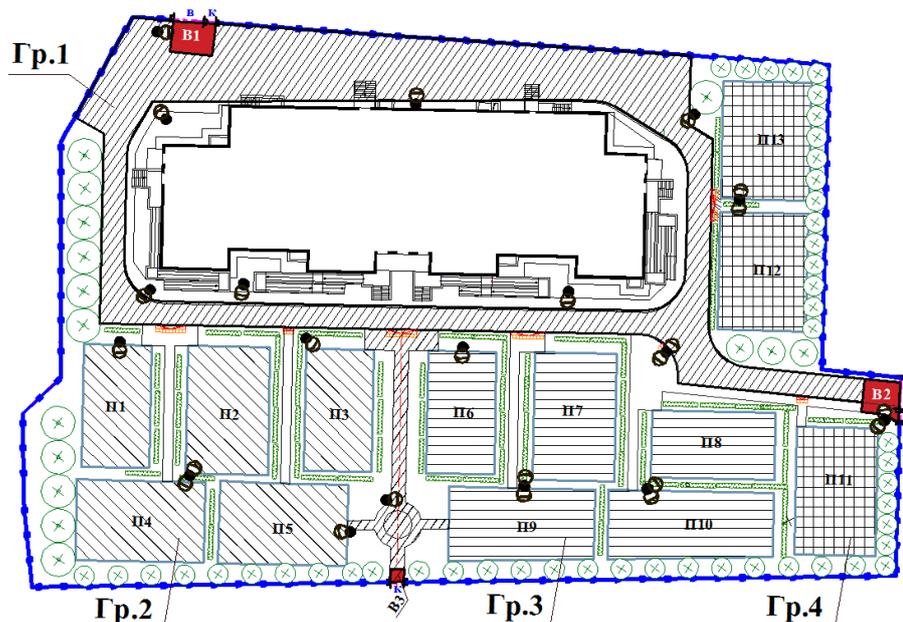


Рисунок 20 - Группы управления световым потоком светильников

В качестве источника питания для приборов автоматики используется резервированный источник питания РИП-24. [43]

Функциональная схема автоматизированной системы управления СНО представлена на рисунке 21, условные обозначения представлены в таблице 5.

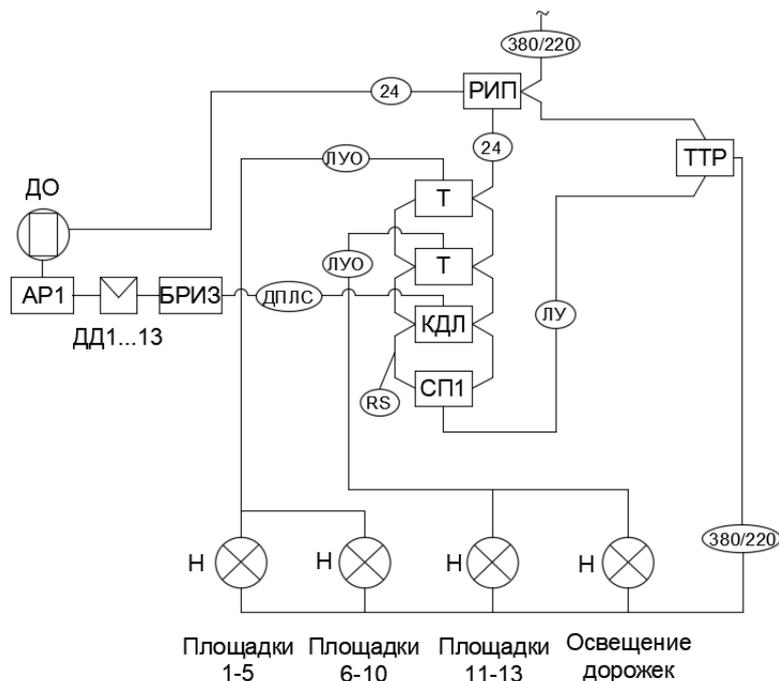


Рисунок 21 - Функциональная схема автоматизированной системы управления СНО

Таблица 5 – Условные обозначения функциональной схемы

Обозначение	Наименование
Т	Контроллер технологический С2000-Т
СП1	Блок сигнально-пусковой С2000-СП1
КДЛ	Контроллер двухпроводной линии связи С2000-КДЛ
ТТР	Трехфазное твердотелое реле GTN1048ZA2
РИП	Резервированный источник питания РИП-24
БРИЗ	Блок разветвительно-изолирующий БРИЗ
АР1	Адресный расширитель С2000-АР1
ДД	Датчик движения С2000-ПИРОН
ДО	Датчик освещенности House-Sensor AL02-R
Н	Светильники ДКУ62-100-011 Champion 750
ЛУ	Линия управления. Кабель КПСнг(А)-FRLS 1x2x0.5
ЛУО	Л. уп. освещением. Кабель КПСВВ 1x2x0,75 (в гофр. ПВХ тр.)
RS	Линия интерфейса RS-485. Кабель КСБнг(А)-FRLS 1x2x0.64
ДПЛС	Адресный шлейф. Кабель КПСВВ1x2x0,75 (в гофр. ПВХ тр.)
24	Линия питания 24 В. Кабель ВВГнг(А)-FRLS 2x1.5
380/220	Линия питания 380/200 В. Кабель АВБШв 5x10

Разработанная структурная схема автоматизированной системы управления электроснабжением светильников наружного освещения позволяет осуществлять управление СНО по данным датчика освещённости, датчиков движения с использованием методов искусственного интеллекта и светодиодных светильников. Что, в соответствии со сделанными нами ранее выводами, позволяет осуществлять наиболее энергоэффективное управление СНО. Также разработанная структурная схема технически реализуема.

### **3.2 Разработка математической модели и алгоритма управления системой электроснабжения светильников наружного освещения**

Алгоритм управления системой электроснабжения светильников наружного освещения основан на теории нечёткого вывода (алгоритм Mamdani). Математическая модель управления системой электроснабжения светильников наружного освещения представляет собой описание данного алгоритма с помощью математической символики [44].

Система нечеткого вывода представляет собой процесс формирования нечетких заключений об управляемом объекте, основанный на нечетких условиях или предпосылках, которые представляют из себя информацию о текущем состоянии объекта.

В настоящее время одним из наиболее применяемых алгоритмов нечеткого вывода является алгоритм Mamdani. Алгоритм был разработан английским математиком Е. Мамдани в 1975 и использовался для управления паровыми двигателями [45].

Данный алгоритм включает в себя несколько последовательно следующих друг за другом этапов, представленных на рисунке 22. При этом входные значения последующего этапа являются выходными значениями предыдущего.



Рисунок 22 – Алгоритм Mamdani

Кратко охарактеризуем каждый этап представленного алгоритма.

*1. Определение входных и выходных переменных.*

В качестве входных значений алгоритма СНО парковой зоны, нами приняты значения естественной освещенности и данные по присутствию (перемещению) посетителей парка, снимаемые с датчиков освещенности и движения, соответственно.

Входные переменные в алгоритме нечеткого вывода представлены в виде следующих терм-множеств:

- «Уровень естественной освещенности»:  $E = \{\text{высокий; средний; низкий}\}$ ;
- «Наличие посетителей»:  $B = \{\text{датчики движения неактивны; датчики движения активны}\}$ .

Входные нечеткие множества  $A_1$  и  $A_2$ , определены следующим образом:

$$A_1 = \{E, \mu_{A_1}(E); E \in X_1\}; \quad (11)$$

$$A_2 = \{B, \mu_{A_2}(B); B \in X_2\},$$

где  $E$  – входная переменная «Уровень естественной освещённости»;  
 $\mu_{A_1}(E)$  – функция принадлежности  $E$  к нечеткому множеству  $A_1$ ;  
 $X_1$  – множество значений переменной «Уровень естественной освещённости»;

$B$  – входная переменная «Наличие посетителей»;

$\mu_{A_2}(B)$  – функция принадлежности  $B$  к нечеткому множеству  $A_2$ ;

$X_2$  – множество значений переменной «Наличие посетителей».

Графики функций принадлежности значений лингвистической переменной «Уровень естественной освещённости» представлены на рисунке 23. В качестве функции принадлежности выбран тип функция Гаусса. Графики функций принадлежности значений лингвистической переменной «Наличие посетителей» представлены на рисунке 24 (тип функции принадлежности - Z-линейная, сигмоидная).

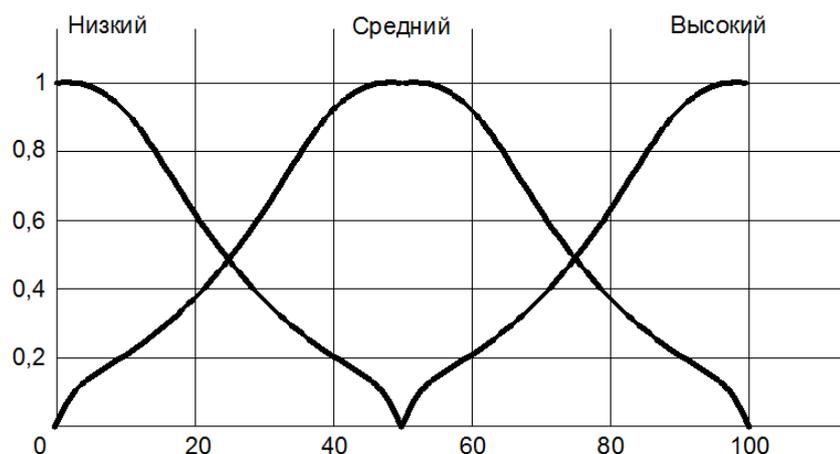


Рисунок 23 - Графики функций принадлежности значений лингвистической переменной «Уровень естественной освещённости»

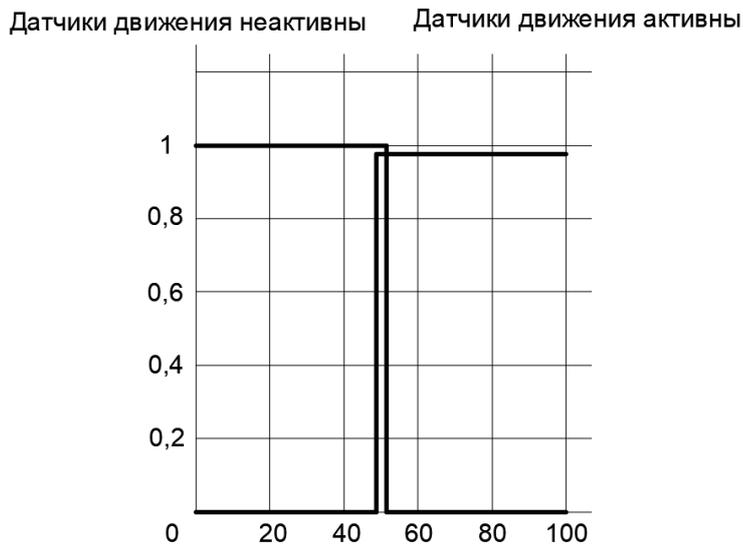


Рисунок 24 - Графики функций принадлежности значений лингвистической переменной «Наличие посетителей»

Выходной переменной алгоритма СНО является минимальная мощность потребления электрической энергии светильниками, представленная в виде терм-множества:

- «Минимальная мощность питающей системы»:  $P = \{ \text{высокая; средняя; низкая} \}$ .

Выходным нечетким множеством  $A_3$  является:

$$A_3 = \{ P, \mu_{A_3}(P); P \in X_3 \}, \quad (12)$$

где  $P$  – выходная переменная «Минимальная мощность питающей системы»;

$\mu_{A_3}(P)$  – функция принадлежности  $P$  к нечеткому множеству  $A_3$ ;

$X_3$  – множество значений переменной «Минимальная мощность питающей системы» [46].

Графики функций принадлежности значений лингвистической переменной «Минимальная мощность питающей системы» представлены на рисунке 25.

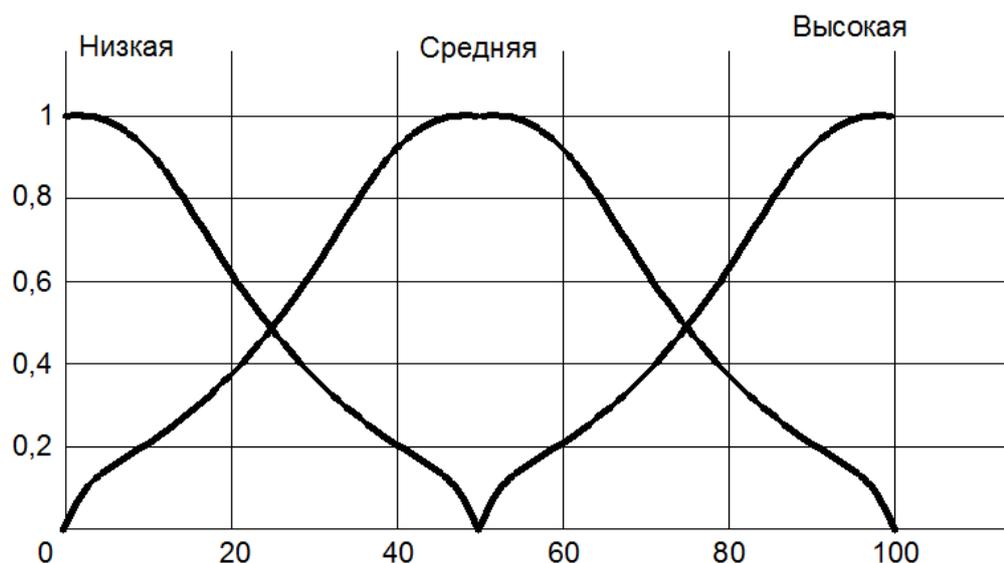


Рисунок 25 - Графики функций принадлежности значений лингвистической переменной «Минимальная мощность питающей системы»

## 2. Формирование базы правил.

База правил нечетких продукций представляет собой конечное множество правил нечетких продукций, согласованных относительно используемых в них лингвистических переменных.

СНО должна обеспечивать на площадках парковой зоны уровень освещённости равный или больший уровню нормативный освещенности, согласно СНиП 23-05-95, СП 52.13330.2016. [9, 10]. Величина искусственного освещения зависит от величины текущей естественной освещенности площадок парковой зоны, однако при отсутствии в парковой зоне посетителей, допустимо поддержание на площадках минимального уровня освещения, требуемого нормами.

В связи с чем, для заданных входных и выходной переменных нами было сформирована база лингвистических правил, основные из которых представлены ниже:

1. ЕСЛИ Уровень естественной освещённости ЕСТЬ Высокий И Наличие посетителей ЕСТЬ Датчики движения неактивны ТОГДА Минимальная мощность питающей сети осветительных установок ЕСТЬ Низкая.

2. ЕСЛИ Уровень естественной освещённости ЕСТЬ Низкий И Наличие посетителей ЕСТЬ Датчики движения активны ТОГДА Минимальная мощность питающей сети осветительных установок ЕСТЬ Высокая.

ЕСЛИ Уровень естественной освещённости ЕСТЬ Средний И Наличие посетителей ЕСТЬ Датчики движения активны ТОГДА Минимальная мощность питающей сети осветительных установок ЕСТЬ Средняя.

Основываясь на работах Леоненкова А.В., Штовбы С.Д. [47, 48], нами были реализованы этапы алгоритма Mamdani. Исходный код реализации алгоритма Mamdani представлен на языке программирования Java.

База правил может быть представлена в следующем виде:

RULE\_1: IF «Condition\_1» THEN «Conclusion\_1» ( $F_1$ ) AND «Conclusion\_2» ( $F_2$ );  
 RULE\_2: IF «Condition\_2» AND «Condition\_3» THEN «Conclusion\_3» ( $F_3$ );  
 ...  
 RULE<sub>n</sub>: IF «Condition<sub>k</sub>» THEN «Conclusion<sub>q-1</sub>» ( $F_{q-1}$ ) AND «Conclusion<sub>q</sub>» ( $F_q$ ),

где  $F_i$  — весовые коэффициенты, указывающие степень уверенности в истинности полученного подзаключения ( $i = 1..q$ ), по умолчанию равен 1;  
 $n$  - число правил нечетких продукций (numberOfRules);  
 $m$  - количество входных переменных (numberOfInputVariables);  
 $s$  - количество выходных переменных (numberOfOutputVariables);  
 $k$  - общее число подусловий в базе правил (numberOfConditions);  
 $q$  - общее число подзаключений в базе правил (numberOfConclusions).

### 3. Фаззификация входных переменных.

Во время данного этапа осуществляется приведение к нечёткости. Входными данными является сформированная ранее база правил и массив входных данных  $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ , включающий в себя значения всех входных переменных. Итогом этапа является определение значений истинности для всех подусловий базы правил. Для каждого из подусловий находится значение  $b_i = \mu(a_i)$  и получается множество значений  $b_i$  ( $i = 1..k$ ). Пример реализации этапа фаззификации представлен на рисунке 26.

```
private double[] fuzzification(double[] inputData) {
    int i = 0;
    double[] b = new double[numberOfConditions];
    for (Rule rule : rules) {
        for (Condition condition : rule.getConditions()) {
            int j = condition.getVariable().getId();
            FuzzySet term = condition.getTerm();
            b[i] = term.getValue(inputData[j]);
            i++;
        }
    }
    return b;
}
```

Рисунок 26 – Реализация этапа фаззификации

### 4. Агрегирование подусловий.

Правила, представленные в базе правил, могут быть составными, т.е. состоять из подусловий объединённых логической операцией «AND». Итогом этапа является определение степени истинности условий каждого правила системы нечёткого вывода. Таким образом, для каждого условия определяется минимальное значение истинности каждого его подусловия.

где  $j=1..n$ ;

$i$  - число из множества номеров подусловий в которых участвует  $j$ -ая входная переменная.

Пример реализации этапа агрегирования подусловий представлен на рисунке 27.

```
private double[] aggregation(double[] b) {
    int i = 0;
    int j = 0;
    double[] c = new double[numberOfInputVariables];
    for (Rule rule : rules) {
        double truthOfConditions = 1.0;
        for (Condition condition : rule.getConditions()) {
            truthOfConditions = Math.min(truthOfConditions, b[i]);
            i++;
        }
        c[j] = truthOfConditions;
        j++;
    }
    return c;
}
```

Рисунок 27 – Реализация этапа агрегирования подусловий

### 5. Активизация подзаключений.

Этап характеризуется переходом от условий к подзаключениям. Для каждого подзаключения определяется степень истинности  $d_i = c_i * F_i$  ( $i = 1..q$ ). Далее каждому  $i$ -му подзаключению, определяют множество  $D_i$  с новой функцией принадлежности. Значение данной функции принадлежности находится как минимум из  $d_i$  и значения функции принадлежности терма из подзаключения.

$$\mu'_i(x) = \min\{d_i, \mu_i(x)\}, \quad (14)$$

где  $\mu'_i(x)$  - «активизированная» функция принадлежности;

$\mu_i(x)$  - функция принадлежности терма;

$d_i$  - степень истинности  $i$ -го подзаключения.

Пример реализации этапа активизации подзаключений представлен на рисунке 28.

```

private List<ActivatedFuzzySet> activation(double[] c) {
    int i = 0;
    List<ActivatedFuzzySet> activatedFuzzySets = new ArrayList<ActivatedFuzzySet>();
    double[] d = new double[numberOfConclusions];
    for (Rule rule : rules) {
        for (Conclusion conclusion : rule.getConclusions()) {
            d[i] = c[i]*conclusion.getWeight();
            ActivatedFuzzySet activatedFuzzySet = (ActivatedFuzzySet) conclusion.getTerm();
            activatedFuzzySet.setTruthDegree(d[i]);
            activatedFuzzySets.add(activatedFuzzySet);
            i++;
        }
    }
    return activatedFuzzySets;
}

private double getActivatedValue(double x) {
    return Math.min(super.getValue(x), truthDegree);
}
}

```

Рисунок 28 – Реализация этапа активизации подзаключений

*б. Аккумуляция заключений.*

Цель данного этапа получение нечёткого множества (или объединения нечётких множеств) каждой выходной переменной.  $i$ -ой выходной переменной сопоставляется объединение множеств  $E_i = \cup D_j$  ( $j$  - номера подзаключений в которых участвует данная выходная переменная).

Объединение двух нечётких множеств представляет собой третье нечёткое множества, функция принадлежности которого имеет вид :

$$\mu'_i(x) = \max\{\mu_1(x_1), \mu_2(x_2)\}, \quad (15)$$

где  $\mu_1(x)$ ,  $\mu_2(x)$  — функции принадлежности объединяемых множеств.

Пример реализации этапа аккумуляции заключений представлен на рисунке 29.

```

private List<UnionOfFuzzySets> accumulation(List<ActivatedFuzzySet> activatedFuzzySets) {
    List<UnionOfFuzzySets> unionsOfFuzzySets =
        new ArrayList<UnionOfFuzzySets>(numberOfOutputVariables);
    for (Rule rule : rules) {
        for (Conclusion conclusion : rule.getConclusions()) {
            int id = conclusion.getVariable().getId();
            unionsOfFuzzySets.get(id).addFuzzySet(activatedFuzzySets.get(id));
        }
    }
    return unionsOfFuzzySets;
}

private double getMaxValue(double x) {
    double result = 0.0;
    for (FuzzySet fuzzySet : fuzzySets) {
        result = Math.max(result, fuzzySet.getValue(x));
    }
    return result;
}

```

Рисунок 29 – Реализация этапа аккумуляции заключений

### 7. Дефаззификация выходных переменных.

Цель данного этапа – получение количественного значения для каждой выходной лингвистической переменной. Выделяют несколько методов дефаззификации, рассмотрим метод центра тяжести. Для данного метода значение  $i$ -ой выходной переменной можно определить по формуле:

$$y_i = \frac{\int_{\min}^{\max} x \cdot \mu_i(x) dx}{\int_{\min}^{\max} \mu_i(x) dx}, \quad (16)$$

где  $\mu_i(x)$  — функция принадлежности соответствующего нечеткого множества  $E_i$ ;

$\min$  и  $\max$  — границы универсума нечетких переменных.

Пример реализации этапа дефаззификации представлен на рисунке 30.

```

private double[] defuzzification(List<UnionOfFuzzySets> unionsOfFuzzySets) {
    double[] y = new double[numberOfOutputVariables];
    for(int i = 0; i < numberOfOutputVariables; i++) {
        double i1 = integral(unionsOfFuzzySets.get(i), true);
        double i2 = integral(unionsOfFuzzySets.get(i), false);
        y[i] = i1 / i2;
    }
    return y;
}

```

Рисунок 30 – Реализация этапа дефаззификации

Представленные этапы алгоритма нечёткого вывода Mamdani реализованы в программном средстве "Нечёткое моделирование" [49].

### 3.3 Программная реализация алгоритма управления системы электроснабжения светильников наружного освещения

Программное средство "Нечеткое моделирование" позволяет осуществить нечёткий логический вывод решаемой задачи с помощью описания рассматриваемых характеристик в виде нечётких лингвистических переменных, объединённых системой правил-продукций. Вывод решения осуществляется на основе алгоритма Mamdani [49].

В программном средстве "Нечёткое моделирование" задаются две входные переменные. Это «Уровень естественной освещённости» и «Наличие посетителей», а также выходная переменная «Минимальная мощность питающей сети осветительных установок». Каждый терм задаётся своим диапазоном значений, типом функции (Гаусса, Z-линейной, сигмоидной) и параметрами. Редактор переменных для каждой входной переменной и выходной представлен на рисунках 31, 32, 33.



Рисунок 31 – Переменная «Уровень естественной освещённости»

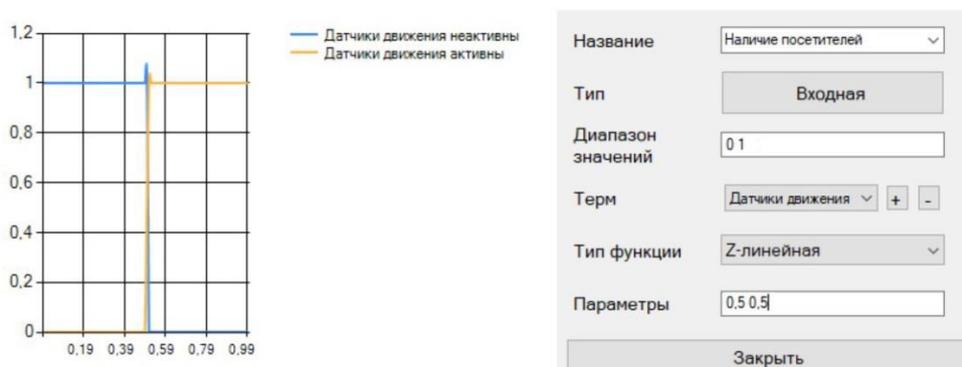


Рисунок 32 – Переменная «Наличие посетителей»



Рисунок 33 – Переменная «Минимальная мощность питающей сети осветительных установок»

Сформированная архитектура программы-реализатор «Нечеткое моделирование» для решаемой задачи представлена на рисунке 34.

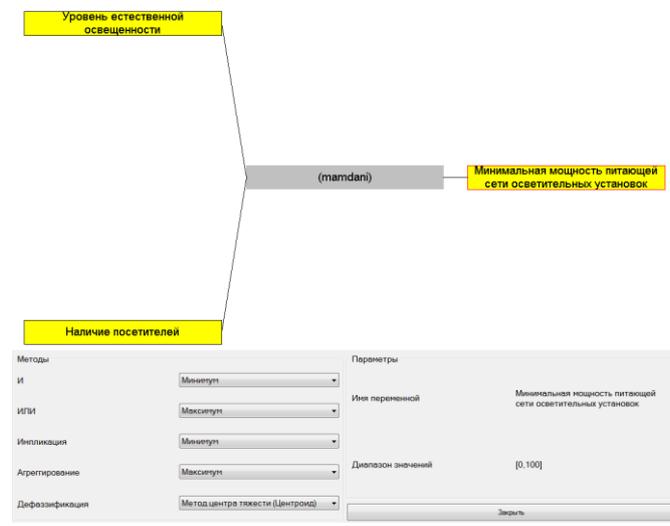


Рисунок 34 – Архитектура программы «Нечеткое моделирование» для выбора оптимальной мощности СНО

В редакторе правил введены правила, описанные выше, рисунок 35.

Рисунок 35 – База правил

Алгоритм позволяет, при разных комбинациях входных значений, определять наименьшую мощность питающей сети осветительных установок. Доминантной входной переменной является наличие посетителей, в случае отсутствия посетителей, программа выбирает, в соответствии с базой правил, оптимальное значение мощности питающей сети, необходимое для создания минимально допустимой освещённости площадок парковой зоны согласно [8, 9]. При наличии посетителей значение мощности питающей сети зависит от корректирующей входной переменной - уровня естественной освещённости. В связи с этим, апробация разработанного алгоритма СНО парковой зоны была произведена для ситуаций наличия и отсутствия посетителей, для которых функция принадлежности принимает значения 1 или 0, соответственно. Для обозначенных ситуаций входное значение «Уровень естественной освещённости» было принято равным  $80 \cdot 10^2$  Лк (освещённость в солнечный день). Результаты апробации адаптированного алгоритма Mamdani для ситуаций наличия и отсутствия посетителей представлены на рисунках 36, 37, соответственно. Как видно из представленных графиков при наличии посетителей в парке и значении естественной освещённости, равному  $80 \cdot 10^2$  Лк, потребление электрической энергии светильниками должно составлять 65,71% от номинального потребления, а при отсутствии посетителей и аналогичном значении естественной освещённости, - 13,39% от номинального потребления.

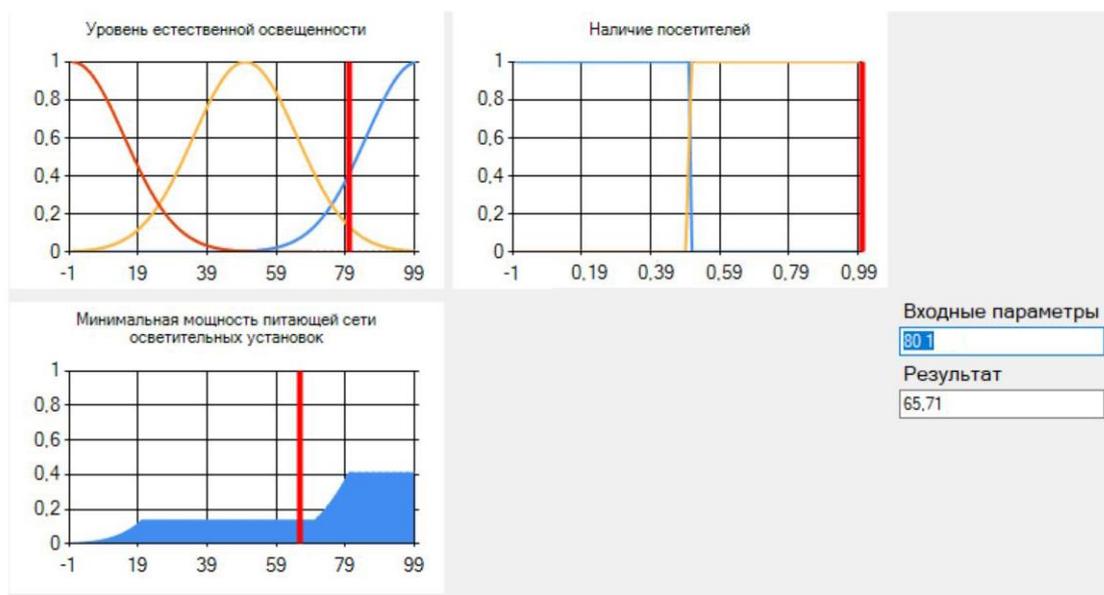


Рисунок 36 - Скриншот окна программы с результатом для ситуации наличия посетителей и значения естественной освещённости  $80 \cdot 10^2$  Лк

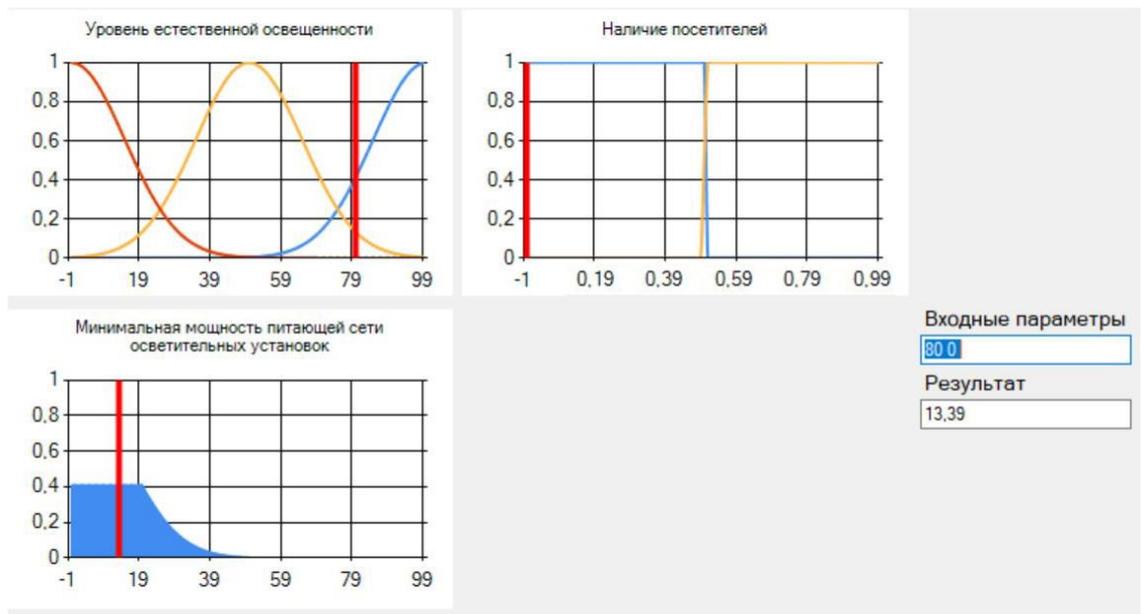


Рисунок 37 - Скриншот окна программы с результатом для ситуации отсутствия посетителей и значения естественной освещённости  $80 \cdot 10^2$  Лк

### **Выводы по 3-й главе.**

По результатам разработки энергоэффективной системы автоматизированного управления электроснабжением наружного освещения нами были сделаны следующие выводы:

1. Разработана структурная схема управления освещением парковой зоны, позволяющая осуществлять энергоэффективное управление СНО, содержащая: датчики освещенности и движения, интеллектуальную систему принятия решений, микроконтроллер, реле, светодиодные светильники.

2. Разработана математическая модель управления освещением парковой зоны на основе нечеткого вывода по двум входным переменным: естественной освещенности, присутствию посетителей парка; и одной выходной переменной - мощность питающей сети осветительных установок. Разработаны: термножества входных и выходной переменных, для каждой из которых выбраны функции принадлежности; составлена база лингвистических правил.

3. Адаптирован алгоритм управления наружным освещением парковой зоны на основе классического алгоритма Mamdani. Адекватность полученного алгоритма СНО была подтверждена тестированием программы и достоверностью полученных результатов.

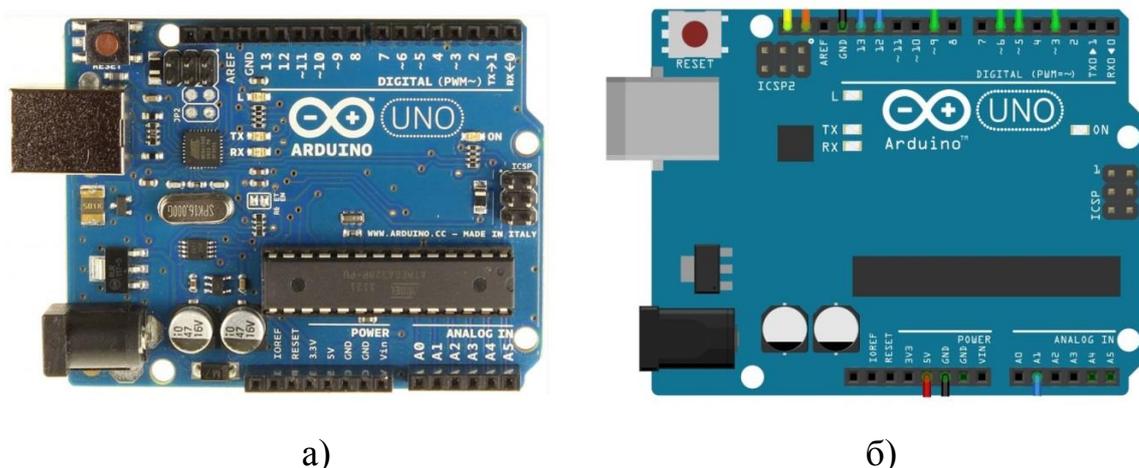
# Глава 4 Экспериментальное исследование энергоэффективной системы электроснабжения светильников наружного освещения

## 4.1 Элементная база макета «Освещение парковой зоны»

Экспериментальное тестирование системы управления электроснабжением светильников наружного освещения было осуществлено на разработанном аппаратно-программном макете «Освещение парковой зоны». Основной элементной базой макета являются: микроконтроллер Arduino Uno, ультразвуковой датчик HC-SR04, модульный датчик света LM393, светодиодные светильники, LCD-дисплея 1602A.

В роли управляющего устройства выбран микроконтроллер Arduino Uno. Микроконтроллер имеет невысокую стоимость, небольшие размеры платы, гибкие возможности программирования, а также обладает совместимостью с большим количеством датчиков и устройств [50].

Внешний вид микроконтроллера Arduino Uno, модель в программной среде Fritzing представлены на рисунке 38.



а) микроконтроллер Arduino Uno;  
б) модель микроконтроллера в программной среде Fritzing

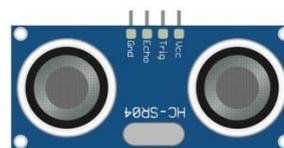
В качестве датчика движения выбран ультразвуковой датчик – HC-SR04, так как он обладает малой потребляемой мощностью и диапазоном измерения от 2 до 400 см.

Способность ультразвукового датчика определять расстояние до объекта опирается на принцип сонара – посылая пучок ультразвука, и получая его отражение с задержкой, устройство определяет наличие объектов и расстояние до них. Ультразвуковые сигналы, генерируемые приемником, отражаясь от препятствия, возвращаются к нему через определенный промежуток времени. Именно этот временной интервал становится характеристикой, помогающей определить расстояние до объекта.

Внешний вид ультразвукового датчика HC-SR04, модель в программной среде Fritzing представлены на рисунке 39.



а)



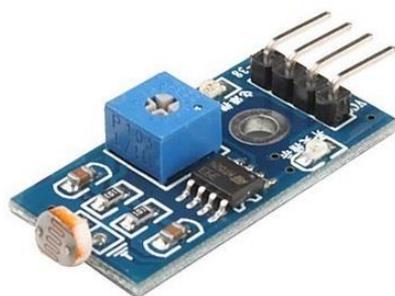
б)

Рисунок 39 – Датчик движения

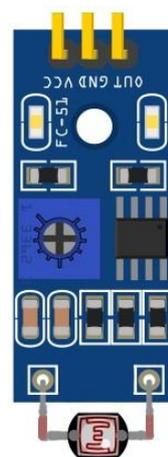
а) ультразвуковой датчик HC-SR04;

б) модель датчика в программной среде Fritzing.

Для определения уровня естественной освещённости, выбран модульный датчик света LM393. Датчик способен определять освещенность в диапазоне от 1 до 70000 люксов. Принцип работы датчика основан на способности фоторезистора (GL5528) менять своё сопротивление от сотен Ом до нескольких мега Ом при изменении освещенности. Внешний вид модульного датчика света LM393, модель в программной среде Fritzing представлены на рисунке 40.



а)



б)

Рисунок 40 - Датчик освещенности

а) модульный датчик света LM393

б) модель датчика в программной среде Fritzing

В качестве источников света используются светодиодные светильники. Световой поток одного светодиода составляет 6,5-7,5 лм, напряжение питания изменяется в диапазоне 2,8-3,4 В. Светодиодные светильники представлены на рисунке 41.

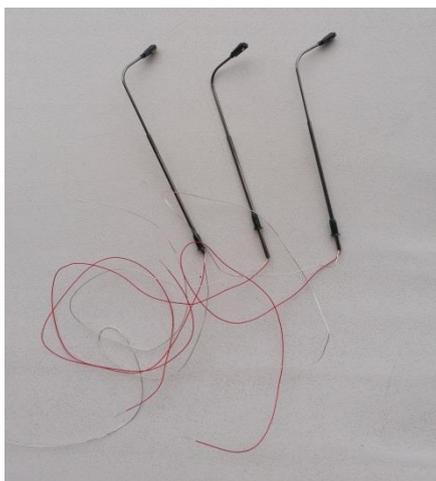


Рисунок 41 – Светодиодные светильники

Для мониторинга значений входных и выходной переменных при работе контроллера автономно (без подключения к персональному компьютеру) предусмотрен LCD-дисплей 1602А. Дисплей имеет низкую стоимость. Может отображать ASCII символы в 2 строки (16 знаков в 1 строке), каждый символ в виде матрицы 5x7 пикселей. Встроенный I2C /IС переходник позволяет подключать дисплей к микроконтроллеру всего лишь при помощи 4 пинов. Внешний вид LCD-дисплея 1602А, модель в программной среде Fritzing представлены на рисунке 42.

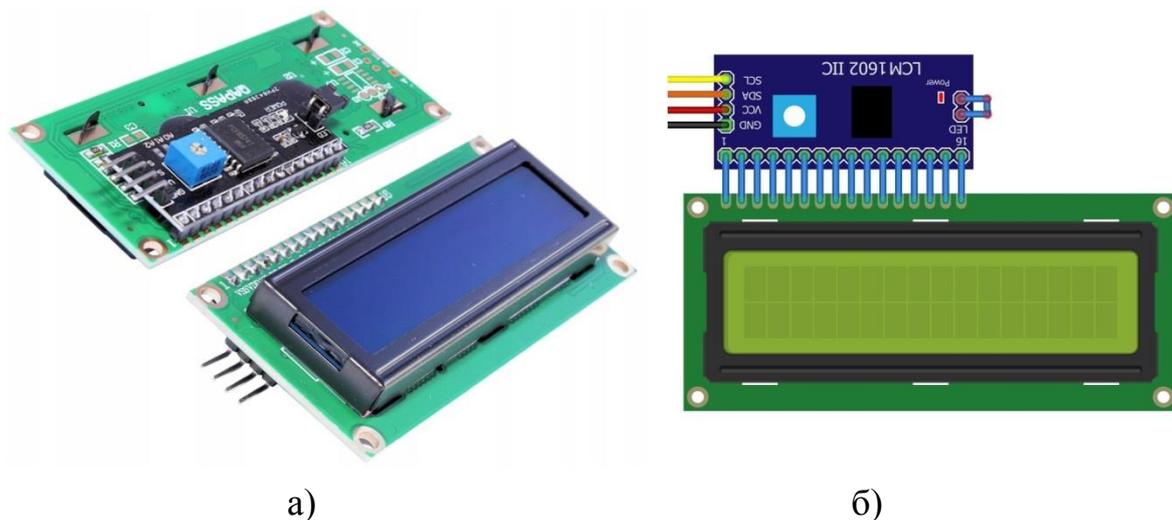


Рисунок 42 – Дисплей

а) LCD-дисплей 1602А;

б) модель дисплея в программной среде Fritzing.

## 4.2 Подключение устройств к микроконтроллеру

Подключение любых устройств к плате осуществляется путем присоединения к контактам, расположенным на плате контроллера: одному из цифровых или аналоговых пинов или пинам питания. Простой светодиод

можно присоединить, используя два контакта: землю (GND) и сигнальный (или контакт питания). Самый простой датчик потребует задействовать минимум три контакта: два для питания, один для сигнала.

Подключение к пинам микроконтроллера выполняется через штыревые линейки, распаянные по обе стороны платы, что позволяет связываться с внешними устройствами при помощи макетных проводов. Это значительно ускоряет процесс создания макета и облегчает восстановление в случае поломки.

Arduino Uno имеет 14 цифровых и 6 аналоговых доступных выводов. Цифровые выводы имеют нумерацию от 0 до 13 и работают в двух направлениях, т.е. могут быть использованы как входы, так и выходы. Направление определяется функцией `pinMode()`. В том числе для каждого цифрового пина имеется возможность программно включить подтягивающий резистор, соединённый с плюсом питания микроконтроллера. Номинал подтягивающего резистора лежит в диапазоне 20-50 кОм. Выходное напряжение одного вывода составляет 5В, а максимальный ток - 40мА. Аналоговые выводы обозначены как А0-А5. Каждый из аналоговых выходов соединяется со встроенным 10-битным АЦП микроконтроллера. Это позволяет одновременно измерять 6 напряжений и получать по 1024 значения для каждого канала. Диапазон измеряемого напряжения равняется 0-5 В, т.е. при 0 В значение АЦП будет равно 0, а при 5 В значение АЦП станет равным 1023. Если в аналоговых выводах нет надобности, они могут использоваться как цифровые.

Помимо первичных функций, некоторые выводы Arduino Uno имеют дополнительные:

- выводы 3, 5, 6, 9, 10 и 11 способны формировать широтно-импульсную модуляцию (ШИМ) с помощью функции `analogWrite()`;
- выводы А4(SDA) и А5(SCL) представляют интерфейс связи по протоколу I2C;
- выводы 10(SS), 11(MOSI), 12(MISO), 13(SCK) обеспечивают связь по SPI-интерфейсу;
- выводы 0(RX) и 1(TX) - обеспечивают последовательный интерфейс передачи данных;
- к выводу 13 подключён smd-светодиод, расположенный на плате;
- RESET – подача низкого уровня на этот вывод приведёт к сбросу микроконтроллера.

Управление яркостью светодиода можно осуществить с помощью функции `analogWrite()`. Функция `AnalogWrite()` позволяет осуществлять широтно-импульсную модуляцию. Широтно-импульсная модуляция, или ШИМ, это операция получения изменяющегося аналогового значения посредством цифровых устройств. Устройства используются для получения прямоугольных импульсов - сигнала, который постоянно переключается между максимальным и минимальным значениями. Данный сигнал моделирует напряжение между максимальным значением (5 В) и



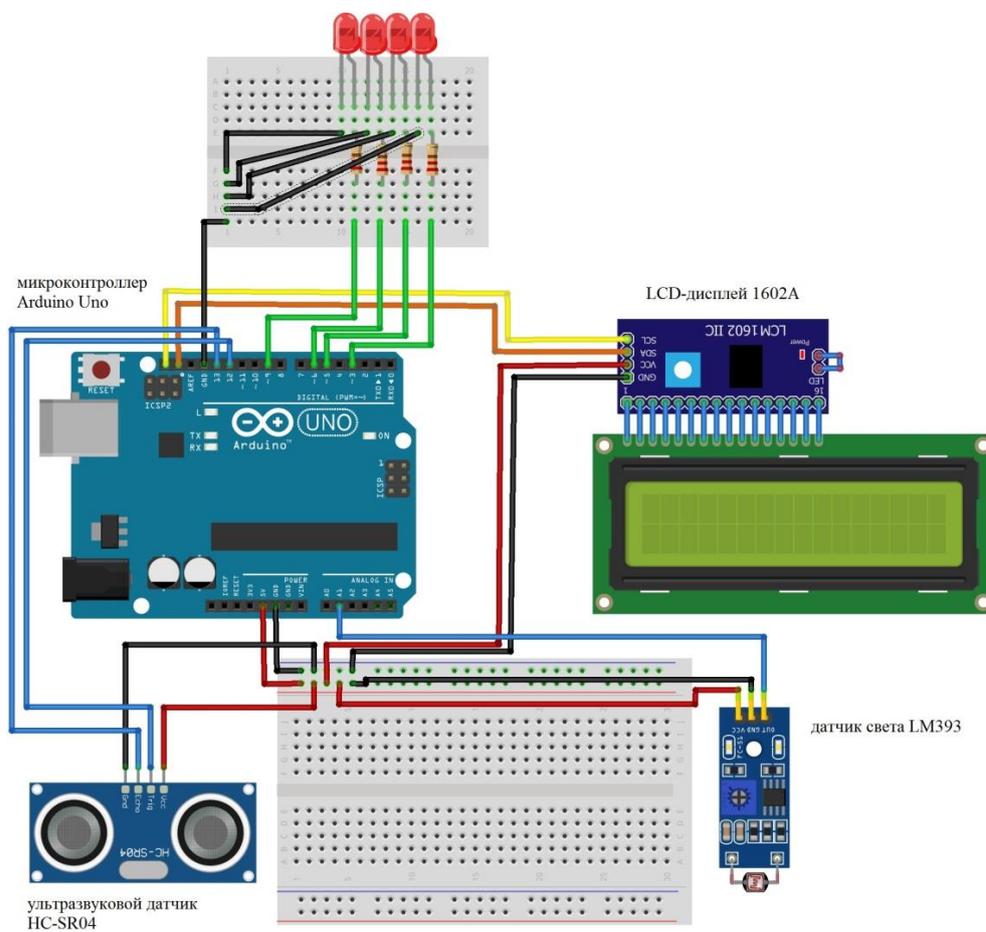


Рисунок 44 –Функциональная схема подключения элементной базы к микроконтроллеру

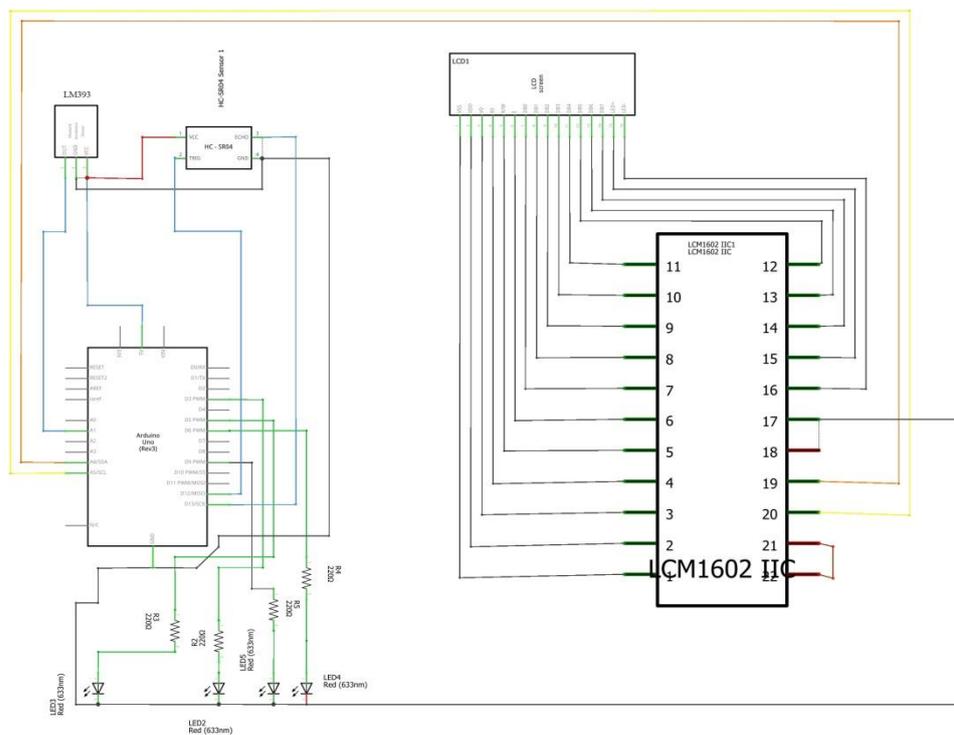


Рисунок 45 - Схема внешних соединений

### 4.3 Тестирование системы управления электроснабжением светильников наружного освещения на разработанном макете парковой зоны

Внешний вид макета парковой зоны и соединение элементной базы с микроконтроллером представлено на рисунках 46,47.



Рисунок 46 – Макет парковой зоны

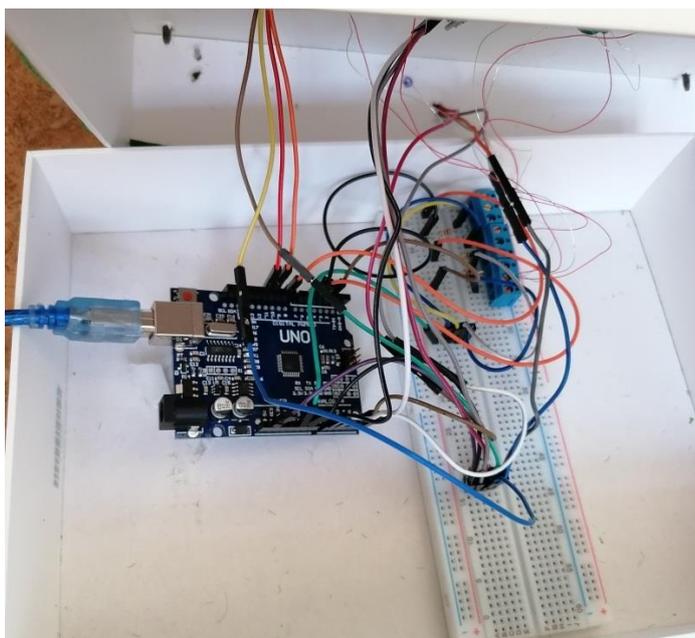


Рисунок 47 - Соединение элементной базы с микроконтроллером

Рассматриваемая в ходе эксперимента парковая зона в 18 микрорайоне города Оренбурга, относится к типу парковых зон спальных районов.

Согласно отчёту о реализации муниципальной программы «Развитие парков, парковых зон и скверов города Оренбурга» за 2019 год в зимний, осенний, весенний периоды наличие посетителей в парковых зонах спальных районов в ночное время (с 23.00 до 6.30) близко к полному отсутствию посетителей. При наличии посетителей игровые площадки парковой зоны должны иметь освещенность не менее 10 лк [8,9], в случае отсутствия посетителей игровые площадки могут рассматриваться как центральные и боковые аллеи с освещенностью 1, 2 лк. Таким образом, управление освещением по данным датчиков движения способно существенно увеличить экономию электроэнергии. В ходе эксперимента осуществлялась активация датчика движения с частотой, идентичной статистической частоте появления посетителей в реальных парковых зонах.

В летний период количество посетителей парковых зон спальных районов в ночное время остаётся высоким и доминирующей переменной управления является уровень естественного освещения. В связи с чем принято допущение, что в ходе эксперимента для летнего периода датчик движения остаётся активным постоянно.

В ходе эксперимента с заданной периодичностью происходило считывание информации с датчиков, сохранение значений входных и выходных переменных. Входная переменная «наличие посетителей» принимает значение «1» в случае активности датчика движения или «0» при неактивности датчика. Входная переменная «Уровень естественной освещённости» представляет собой величину в люксах. Выходная переменная «Минимальная мощность питающей сети осветительных установок» принимает значения от 0 до 255, что соответствует подаваемому на светодиоды напряжению от 0 В до 5В, а также может быть выражена в процентном отношении к максимально возможной мощности питающей сети осветительных установок.

В случае, если работа микроконтролера происходит с одновременным подключением к компьютеру, полученные входные, выходная переменные сохраняются в текстовом файле. В реальном времени значения переменных отображаются в окне «монитор порта» среды разработки arduino (рисунок 48).

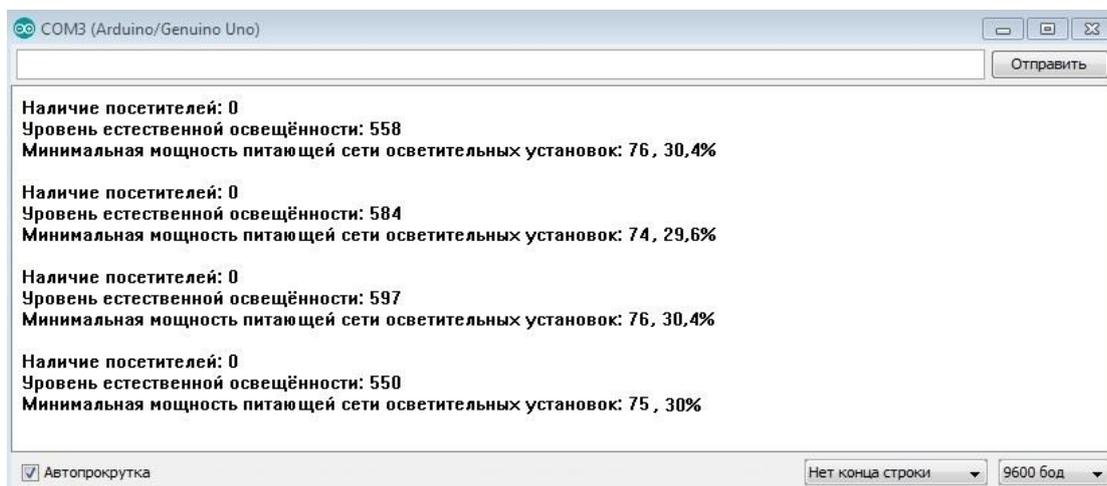


Рисунок 48 - Окно «монитор порта» среды разработки Arduino

При автономной работе микроконтроллера для мониторинга значений входных переменных используется LCD-дисплей (рисунок 49).



Рисунок 49 – Отображение значений входных переменных на LCD-дисплее

Результаты эксперимента с допущениями принятыми для работы системы управления электроснабжением СНО парковой зоны в зимний, осенний, весенний периоды представлены в таблице 6, а для летнего периода - представлены в таблице 7.

Таблица 6 - Результаты эксперимента (зимний, осенний, весенний периоды)

Показатели	18.00	20.00	22.00	24.00	02.00	04.00
Наличие посетителей, среднее за 2 часа	1	1	1	0	0	0
Уровень естественной освещенности, Лк ср. за 2 часа	475	120	54	67	52	71
Минимальная мощность питающей сети осветительных установок, ср. за 2 часа	121/ 48,4%	214/ 85,6%	231/ 92,4%	75/ 30%	76/ 30,4%	76/ 30,4%

Продолжение таблицы 6.

	<b>06.00</b>	<b>08.00</b>	<b>10.00</b>	<b>12.00</b>	<b>14.00</b>	<b>16.00</b>
Наличие посетителей, среднее за 2 часа	0	1	1	1	1	1
Уровень естественной освещенности, Лк ср. за 2 часа	204	475	845	896	723	647
Минимальная мощность питающей сети осветительных установок, ср. за 2 часа	73/ 29,2%	122/ 48,8%	0/ 0%	0/ 0%	0/ 0%	87/ 34,8%

Таблица 7 - Результаты эксперимента (летний период)

<b>Показатели</b>	<b>18.00</b>	<b>20.00</b>	<b>22.00</b>	<b>24.00</b>	<b>02.00</b>	<b>04.00</b>
Наличие посетителей, среднее за 2 часа	1	1	1	1	1	1
Уровень естественной освещенности, Лк ср. за 2 часа	854	612	421	204	69	120
Минимальная мощность питающей сети осветительных установок, ср. за 2 часа	0/ 0%	93/ 37,0%	134/ 53,6%	175/ 70%	221/ 88,4%	189/ 75,6%
	<b>06.00</b>	<b>08.00</b>	<b>10.00</b>	<b>12.00</b>	<b>14.00</b>	<b>16.00</b>
Наличие посетителей, среднее за 2 часа	1	1	1	1	1	1
Уровень естественной освещенности, Лк ср. за 2 часа	345	645	861	914	954	923
Мин. мощность питающей сети осветительных установок, ср. за 2 часа	157/ 62,8%	83/ 33,2%	0/ 0%	0/ 0%	0/ 0%	0/ 0%

Апробация в течении суток разработанной системы управления электроснабжения СНО на созданном макете показала, что она позволяет уменьшить энергопотребление на величину до 20,33 % в зимний, осенний, весенний периоды и до 16,87 % в летний период по сравнению с работой системы наружного освещения, работающей по заранее заданному графику «включено», «выключено». Разница в графиках нагрузок в зимний, осенний, весенний периоды представлена на рисунке 50, в летний период на рисунке 51.



Рисунок 50 – Разница в графиках нагрузки в зимний, осенний, весенний периоды

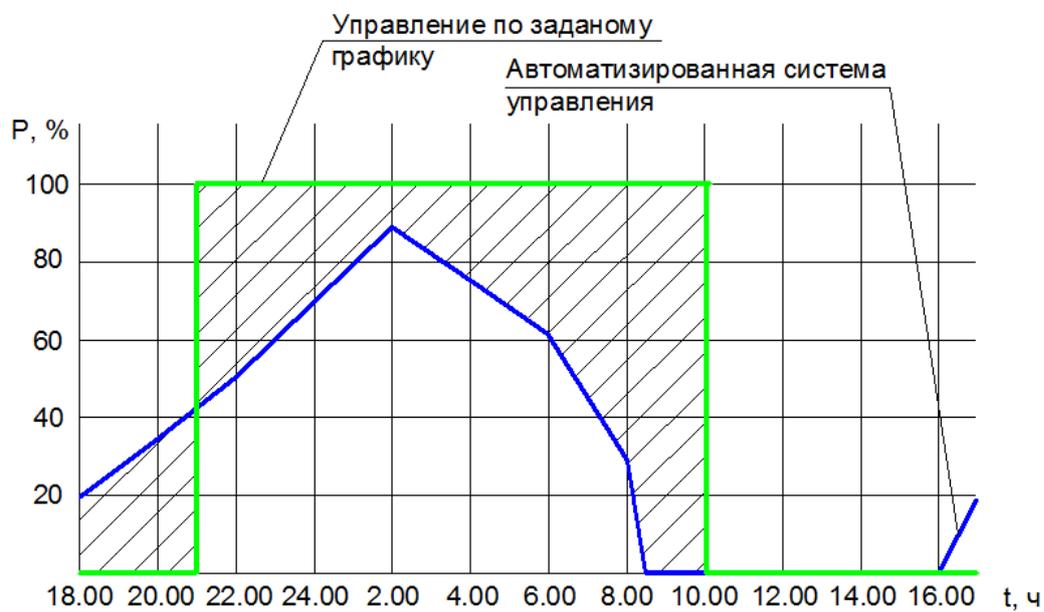


Рисунок 51 – Разница в графиках нагрузки в летний период

## Выводы по 4-й главе

1. В качестве элементной базы программно-аппаратного макета «Освещение парковой зоны» выбраны: микроконтроллер Arduino Uno, ультразвуковой датчик HC-SR04, модульный датчик света LM393, светодиодные светильники, LCD-дисплея 1602А.

2. Авторами разработана схема подключения элементной базы к микроконтроллеру Arduino Uno

3. Апробация разработанной системы управления электроснабжением СНО парковой зоны показала её энергоэффективность по сравнению с традиционными системами управления (по заданному графику). Снижение энергопотребления светильниками составляет:

- для зимнего, осеннего, весеннего периодов - до 20,33%;
- для летнего периода – до 16,87 %.

## Заключение

В данной работе нами была рассмотрена проблема разработки энергоэффективной системы управления наружным освещением парковой зоны. Получены следующие основные результаты.

1. Проведенный анализ научно-технической литературы в области разработки систем управления наружным освещением позволил заключить, что автоматизированные системы управления наружным освещением парковой зоны с использованием методов искусственного интеллекта и светодиодных светильников в настоящее время являются наиболее перспективными.

2. Спроектирована система электроснабжения парковой зоны, в том числе выполнен светотехнический расчёт СНО и расчёт системы электроснабжения светильников наружного освещения. По результатам решения данной задачи были сделаны выводы о соответствии выбранного оборудования и технических характеристик питающей сети системы электроснабжения парковой зоны требованиям нормативной документации.

3. Разработана структурная схема управления освещением парковой зоны, позволяющая осуществлять энергоэффективное управление СНО, содержащая: датчики освещенности и движения, интеллектуальную систему принятия решений, микроконтроллер, реле, светодиодные светильники.

4. Разработана математическая модель управления освещением парковой зоны на основе нечеткого вывода по двум входным переменным: естественной освещенности, присутствию посетителей парка; и одной выходной переменной - мощность питающей сети осветительных установок. Разработаны: термножества входных и выходной переменных, для каждой из которых выбраны функции принадлежности; составлена база лингвистических правил.

5. Адаптирован алгоритм управления наружным освещением парковой зоны на основе классического алгоритма Mamdani. Адекватность полученного алгоритма СНО была подтверждена тестированием программы и достоверностью полученных результатов.

6. Проведено тестирование системы управления электроснабжением светильников наружного освещения на разработанном макете «Освещение парковой зоны». Энергоэффективность разработанной системы управления по сравнению с традиционными системами управления (по заданному графику) составила:

- для зимнего, осеннего, весеннего периодов - до 20,33%;
- для летнего периода – до 16,87 %.

Таким образом, разработанная в исследовании автоматизированная система управления светодиодными светильниками на основе алгоритма нечеткого вывода Mamdani по двум входным переменным является новым и энергоэффективным решением в области управления наружным освещением парковой зоны.

## Список использованных источников

1. Энергосбережение. Световые решения для всех сфер применения. Philips. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <https://shop220.ru/pdf/?id=742>
2. Энергоэффективная система управления муниципальным освещением, Сапронов А.А., Никуличев А.Ю., [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://www.energsovet.ru/stat573.html> (дата обращения: 30.04.2020)
3. Федеральный закон №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», от 23.11.2009.
4. Валиуллин, К. Р. Анализ способов управления уличным освещением по различным критериям [Электронный ресурс] / К. Р. Валиуллин // Электроэнергетика глазами молодежи : науч. тр. V междунар. науч.-техн. конф., 10-14 нояб. 2014 г., Томск / Мин-во науки и образования РФ, Томск. политехн. ун-т. - Электрон. дан. - Томск, 2014. - Т. 2. - С. 275-279. . - 5 с.
5. О. Т. Зотин, Н. О. Морозова. Анализ эффективности управления энергосбережением в наружном освещении // Современная светотехника. 2010. № 2.
6. АО КОМПЭЛ. Статья. Наружное освещение: светодиоды против традиционных источников света. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <https://www.compel.ru/lib/53653> (дата обращения: 10.05.2020)
7. Rea MS (ed.). 2000. IESNA Справочник по Освещению: Справочник применения, 9-е изд. Нью-Йорк: Светотехническое общество Северной Америки. Knau H. 2000. Пороговые значения для обнаружения медленно изменяющейся яркости. J Opt Soc Am A 17(8): 1382-1387.
8. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение» [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://docs.cntd.ru/document/871001026> (дата обращения: 10.05.2020)
9. СП 52.13330.2016 «Естественное и искусственное освещение» [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://docs.cntd.ru/document/1200084092> (дата обращения: 10.05.2020)
10. Валиуллин К. Р., Семенова Н. Г. Анализ существующих систем управления уличным освещением. Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: сборник трудов Российской молодежной научной конференции. В 2 т. Т. 2 / Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ООО «СКАН», 2013. – с 64-69.
11. Интеллектуальная система управления уличным и внутренним освещением на основе диммирования. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://www.energsovet.ru/entech.php?idd=149>. (дата обращения: 25.05.2020)
12. Turing A. Computing machinery and intelligence // Mind: журнал. — Oxford: Oxford University Press, 1950. — No. 59. — P. 433-460.
13. Братко И. Алгоритмы искусственного интеллекта на языке PROLOG = Prolog Programming For Artificial Intelligence. — М.: «Вильямс», 2004. — С. 640. — ISBN 0-201-40375-7.

14. Marcus G. F. (2001). The Algebraic Mind: Integrating Connectionism and Cognitive Science (Learning, Development, and Conceptual Change), Cambridge, MA: MIT Press.

15. Емельянов В. В., Курейчик В. В., Курейчик В. М. Теория и практика эволюционного моделирования. — М.: Физматлит, 2003. — 432 с. — ISBN 5-9221-0337-7.

16. Зайцев И. М., Федяев О. И. Агентно-ориентированный подход к моделированию интеллектуальных распределённых систем : Сб. — Донецк: ДонНТУ, 2008. — С. 337-338.

17. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы = Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. — 2-е изд. — М: Горячая линия-Телеком, 2008. — 452 с. — ISBN 5-93517-103-1.

18. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA) = Artificial Intelligence: A Modern Approach (AIMA). — 2-е изд. — М.: «Вильямс», 2007. — 1424 с. — 3000 экз. — ISBN 0-13-790395-2.

19. Соловьев В.В., Шадрина В.В. Моделирование нечетких систем управления: Лабораторный практикум. - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010.- 125 с.

20. Zade L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part 1, 2, 3 // Information Sciences. – N 8. – P. 199 – 249; 301 – 357; N 9. – P. 43 – 80.

21. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений // Пер. с англ. Н. И. Ринго / под ред. Н. Н. Моисеева и С. А. Орловского. – М. : Мир, 1976. – 165 с.

22. Крюков О. В., Применение теории нечётких множеств при прогнозировании и обработке данных // Журнал "Вопросы электромеханики. Труды «ВНИИЭМ» – 20016. – № 2. – С. 18 – 26

23. Крюков О. В., Серебряков А. В. Система оперативной диагностики технического состояния ветроэнергетических установок // Электротехника. – 2015. – № 4. –С. 49 – 53.

24. Бабичев С. А., Бычков Е. В., Крюков О. В. Анализ технического состояния и безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. –2010. – № 9. – С. 30 – 36.

25. О. Зотин. Управление освещением открытых пространств // Полупроводниковая светотехника. 2014. № 1–3.

26. Статья. Алексей Васильев. Диммирование «непокорных» ламп. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <https://alb.ru/articles/dimmirovanie-nepokornykh-lamp/>. (дата обращения: 30.05.2020)

27. Статья. Универсальный светодиодный светильник Универсальный светодиодный светильник LuxON UniLED. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <https://boster.ru/news/15-03-16-19.html>. (дата обращения: 31.05.2020)

28. Кнорринг Г. М. и др. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г. М. Кнорринг, И. М. Фадин, В. Н. Сидоров 2-е

изд., перераб. и доп. —СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1992. — 448 с.

29. Статья. Правильный выбор осветительных опор. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <https://svetpro.ru/uchebnik-svetotekhniki/oporyi-osveshheniya/pravilnyij-vyibor-osvetitelnyix-opor.html>. (дата обращения: 31.05.2020)

30. Светодиодный светильник ДКУ62-100-001 Champion 750, технические характеристики. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://www.astz.ru/ru-production/svetodiodnyiy-svetilnyik-serii-dku62-Champion/dku62-100-001-Champion-750/>. (дата обращения: 31.05.2020)

31. Государственная поддержка альтернативной энергетики: отечественный и зарубежный опыт// Журнал «Электротехнический рынок» – 2020. – № 2. – С. 23 – 27

32. Ю. Б. Айзенберг. Справочная книга по светотехнике: Справочные материалы. – М.: Энергоатомиздат, 1983.-472 с., ил.

33. Колесник, Г. П. Электрическое освещение : основы проектирования : учеб. пособие / Г. П. Колесник ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2006. – 127 с.

34. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы 6 и 7 изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 января 2020г. – М.: КНОРУС, 2020г. – 488с.

35. ГОСТ 22483-2012 «Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров» [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://docs.cntd.ru/document/1200100953> (дата обращения: 1.06.2020)

36. ГОСТ 7006-72 «Покровы защитные кабелей. Конструкция и типы, технические требования и методы испытаний» [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://docs.cntd.ru/document/1200004989> (дата обращения: 1.06.2020)

37. Кабель АВБШв 5х2,5 - 0,66/1 кВ, техническая информация. [Электронный ресурс] – Режим доступа - [https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-pvx-izolyacziej-\(0,66;-1kv\)/avbbshv/avbbshv-5x2,5/](https://k-ps.ru/spravochnik/kabeli-silovye/s-pvx-izolyacziej-(0,66;-1kv)/avbbshv/avbbshv-5x2,5/) (дата обращения: 1.06.2020)

38. Радкевич, В. Н. Расчет электрических нагрузок промышленных предприятий: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» / В. Н. Радкевич, В. Б. Козловская, И. В. Колосова. - Минск: БНТУ, 2013. - 124 с.

39. Кабышев А.В. Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учебное пособие/ А.В. Кабышев. –Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 185с.

40. СП 31-110-2003 «проектирование и монтаж электроустановок жилых и общественных зданий» [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://docs.cntd.ru/document/1200035252> (дата обращения: 1.06.2020)

41. Руководство по эксплуатации датчиков освещённости проекта House-Sensor. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://house-sensor.ru/images/docs/svet-1.pdf> (дата обращения: 2.06.2020)

42. Техническая характеристика трехфазных твердотельных реле GTH1048ZA2. [Электронный ресурс] – Режим доступа - <http://deltser.ru/tverdotelnye-rele-gth1048za2-10a-480v-ac-80280v-ac> (дата обращения: 2.06.2020)

43. Техническая характеристика оборудования (НВП) "Болид". [Электронный ресурс] – Режим доступа - <https://bolid.ru/> (дата обращения: 4.06.2020)

44. Бурулько Л.К. Математическое моделирование электромеханических систем: учебное пособие. Часть 1. Математическое моделирование преобразователей электрической энергии переменного тока / Л.К. Бурулько; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 104 с.

45. Чернов, В. Г. Основы теории нечетких множеств. Решение задач многокритериального выбора альтернатив: учеб. пособие / В. Г. Чернов ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2005. – 100 с.

46. Белов А.А., Гвоздева Е.В. Основы теории нечеткости: Учебное пособие /А.А. Белов, Е.В. Гвоздева. – М.: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2001. – 119с.

47. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

48. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Штовба. – М: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.

49. Семенов, А.М. Программное средство для нечеткого моделирования экспертных и/или управляющих систем [Электронный ресурс] : прикладная программа / А.М. Семенов, Р.Р. Мулюков. – Зарегистрировано в УФЭР ОГУ, № 955 от 10.04.2014. – Оренбург: ОГУ, 2014. – Режим доступа: [http://ufer.osu.ru/index.php?option=com\\_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer\\_id=955](http://ufer.osu.ru/index.php?option=com_uferdbsearch&view=uferdbsearch&action=details&ufer_id=955). (дата обращения: 4.06.2020)

50. Петин В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino. — СПб.: БХВ-Петербург, 2014. — 400 с.: ил. — (Электроника) ISBN 978-5-9775-3337-9

51. Сабитов, Р. М. Энергоэффективная система управления наружным освещением парковой зоны [Электронный ресурс] / Сабитов Р. М., Семенова Н. Г. // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всерос. науч.-метод. конф. (с междунар. участием), 23-25 янв. 2019 г., Оренбург / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Федер. гос. бюджет. образоват. учреждение высш. образования "Оренбургский гос. ун-т". - Электрон. дан. - Оренбург : ОГУ, 2019. - . - С. 3532-3536. - - 5 с.

52. Сабитов, Р.М. Система освещения парковой зоны детского сада / Н.Г. Семенова, Р.М. Сабитов// Автоматизированные системы управления и информационные технологии/ Всероссийская научно-техническая конференция

молодых ученых, аспирантов и студентов.-электротехнический факультет ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». [Электронный ресурс] : офиц. Сайт /«ПНИПУ». – Режим доступа: <https://pstu.ru/activity/scientifical/seminars/news/archive/> (дата обращения: 4.06.2020)

53. Сабитов, Р.М. Автоматизированная система управления сети наружного освещения парковой зоны/ Н.Г. Семенова, Р.М. Сабитов// X Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы». [Электронный ресурс] : офиц. Сайт /«ОГУ». – Режим доступа:

[https://conference.osu.ru/registration/about\\_members/extra\\_info.html?id=1262](https://conference.osu.ru/registration/about_members/extra_info.html?id=1262) (дата обращения: 4.06.2020)

54. Сабитов, Р.М. Алгоритм управления освещением парковой зоны на основе теории нечёткого вывода/ Н.Г. Семенова, Р.М. Сабитов// Кумертауский филиал ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» III Всероссийскую научно-практическую конференцию с международным участием «Достижения вузовской науки: от теории к практике». -2020

55. Сабитов, Р. М. Энергоэффективная система управления наружным освещением парковой зоны [Электронный ресурс] / Сабитов Р. М., Семенова Н. Г. // Шаг в науку - 2020. - №3.

56. Справочная книга для проектирования электрического освещения. Под. Ред. Г.М. Кнорринга. Л., - издательство «Энергия», 1976. – 384 с.