

Семенова Н.Г., Валиуллин К.Р.  
Оренбургский государственный университет  
E-mail: tomsk@house.osu.ru, valiullinkamil91@gmail.com

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ УЛИЧНЫМ ОСВЕЩЕНИЕМ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Осветительные сети в современных городах являются сложными энергоемкими объектами, для эффективной работы которых требуется создание энергосберегающих систем управления.

Сравнительный анализ существующих способов управления уличным освещением показывает, что в условиях современных городов они не могут обеспечить принятие наиболее эффективного решения. Приоритетным, значимым и актуальным является разработка интеллектуальных систем управления, позволяющих одновременно измерять, анализировать, диагностировать и снижать потребление электрической энергии, обеспечивая гибкость управления в условиях неопределенности входных данных.

Ввиду наличия множества случайных факторов, таких как погодные условия, изменение продолжительности световых суток, старение светильников, формализация зависимости мощности осветительной установки от внешней освещенности затруднена. Для аппроксимации данной зависимости предлагается использовать математический аппарат нейронных сетей, выбор которого обусловлен его эффективностью в области аппроксимации непрерывных функций.

С использованием нейросетевых технологий впервые разработан и программно реализован алгоритм интеллектуальной системы управления электроснабжением установок уличного освещения с обучением на основе метода обратного распространения ошибки. Разработанная программная часть системы управления функционирующая в двух режимах: обучение нейронной сети; управление осветительной установкой. Особенности программы являются: изменение целевого значения освещенности дорожного покрытия; получение обучающей выборки непосредственно в процессе работы осветительной установки и ее сохранение в табличном виде для дальнейшей обработки при принятии решения.

Программа апробирована на разработанной авторами экспериментальной установке, состоящей из пяти светодиодных модулей – опор уличного освещения. Результаты пилотных экспериментов показали, что энергоэффективность интеллектуальной системы управления уличным освещением по сравнению с традиционной составила 6,3%.

Ключевые слова: уличное освещение, система управления, нейросетевые технологии, энергоэффективность.

Основным направлением развития электроэнергетики страны, исходя из Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года, является модернизация и переход на качественно новый уровень энергетической системы с последующим преобразованием ее в интеллектуальную.

Одной из важнейших составляющих энергетической системы города, обеспечивающих комфортную жизнь жителей города, является система уличного освещения (СУО). При ее неисправностях увеличивается количество как дорожно-транспортных происшествий в темное время суток, так и совершаемых преступлений, что приводит к ухудшению качества жизни людей. СУО крупных городов являются энергоемкими объектами, расход электроэнергии которой может достигать 40% от общего энергопотребления города [1]. Неслучайно, поэтому эффективное управление энергопотреблением системы уличного освещения является одной из наиболее важных задач модернизации энергетической системы города [2].

Выделяют два основных требования, предъявляемых к СУО – энергоэффективность и регламентированность соответствующим нормативным документам (ГОСТ, СНиП) и др.). Основными направлениями мероприятий по повышению энергоэффективности систем уличного освещения, как нами отмечено в работе [3], являются: установка энергоэффективных ламп с высокими светотехническими характеристиками; разработка и внедрение энергоэффективной системы управления уличным освещением. В рамках данной работы авторы не рассматривают энергетическую эффективность самих ламп, а проводят исследование по разработке автоматизированных энергоэффективных систем управления.

Энергоэффективной системой управления уличным освещением будем считать такую систему, которая поддерживает нормативный уровень освещенности дорог и тротуаров при наименьших затратах электроэнергии, обеспечивая при этом качественный уровень жизни людей.

Существующие в настоящее время системы управления уличным освещением по критерию способа управления можно разделить на следующие группы [2]:

1. Системы ручного управления. Включение и отключение осветительных установок в таких системах производится вручную обслуживающим персоналом.

2. Системы управления по заданному временному графику. В таких системах задается график включения/отключения осветительных установок и система автоматически управляет осветительными установками в соответствии с этим графиком. В настоящее время в Российской Федерации в основном используется данный способ управления осветительными установками [4].

3. Системы управления по освещенности. Регулирование мощностью в таких системах осуществляется согласно жесткому алгоритму по показаниям датчика освещенности. Данный способ управления только начали постепенно внедрять в системы управления уличным освещением [5].

Проведем сравнительный анализ перечисленных выше способов управления по следующим критериям:

- энергоэффективность;
- простота. Данный критерий учитывает насколько сложна система при разработке и в процессе управления осветительными установками;
- надежность – критерий, характеризующий вероятность отказа или ошибочной работы системы;
- гибкость. Под данным критерием понимаем возможность совершенствования, модернизации

программно-аппаратной части системы управления, а также интегрированность программного обеспечения с аппаратной частью СУО;

– адаптивность – адаптивной будем считать систему, которая может самонастраиваться в зависимости от изменяющихся условий (погодные условия, непредвиденные, случайные факторы).

Результаты анализа представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, наиболее эффективным методом из рассмотренных, является управление по показаниям датчика освещенности. Однако, существующие в настоящее время системы автоматического управления, использующие информацию с датчиков освещенности работают, как правило, по жестким алгоритмам, заложенным на этапе проектирования системы, в результате чего, эти системы не могут учитывать влияние различных случайных факторов, которым может подвергаться система уличного освещения в процессе работы[6]. Следовательно, в условиях крупных городов, при существенном влиянии случайности и неопределенности внешних факторов они не могут обеспечить принятия наиболее эффективного решения. В связи с этим, возникает необходимость в создании качественно новых систем управления, отвечающих техническим реалиям сегодняшнего дня и соответствующих приоритетному направлению в инновационном развитии электроэнергетики, а именно – применению интеллектуальных технологий в электроэнергетике.

Основной функциональной зависимостью системы управления уличным освещением, является зависимость мощности осветитель-

Таблица 1. Сравнительный анализ существующих систем управления уличным освещением

Критерии	Системы управления уличным освещением		
	Ручное управление	Управление по временному графику	Управление по освещенности
Энергоэффективность	Низкая	Низкая	Средняя
Простота	Простая	Простая	Простая
Надежность	Средняя	Высокая	Средняя
Гибкость	Не зависит от аппаратной части	Не зависит от аппаратной части	Зависит от аппаратной части
Адаптивность	Низкая	Низкая	Средняя

ной установки от естественной освещенности  $P=f(E)$ . Для получения этой зависимости необходимо определить зависимость освещенности, создаваемой на дорожном покрытии осветительной установкой от ее мощности  $E_{\text{осв}}=f(P)$ . На вид этой зависимости будут оказывать влияние кривая силы света светильника, его конструктивные параметры, а также погодные факторы. Освещенность на дорожном покрытии можно представить как сумму освещенности, создаваемой осветительной установкой и естественной освещенности  $E_{\text{д.п}}=E_{\text{осв}}+E$ . Для нахождения каждого из слагаемых этой суммы необходимо знать силу света источника освещения и угол падения его лучей на расчетную плоскость. И если для искусственного источника освещения эти параметры могут быть рассчитаны, то для естественной освещенности они будут зависеть от множества факторов, включая такие случайные факторы как облачность, продолжительность светового дня и место нахождения солнца на небе в данный момент времени. Затем, принимая уровень освещенности на дорожном покрытии равным нормируемому и принимая естественную освещенность за независимую переменную можно найти искомую зависимость  $P=f(E)$ .

В связи с этим формализация задачи по нахождению зависимости  $P=f(E)$  в аналитическом виде становится затруднительной ввиду ее нелинейности и зависимости от случайных факторов. Однако, имея значительный объем экспериментальных данных можно осуществить аппроксимацию этой функции. Одним из наиболее эффективных способов аппроксимации непрерывных нелинейных функций является использование методов искусственной нейронной сети (НС) [7].

Разработанный авторами алгоритм управления уличным освещением на основе нейросетевых технологий программно реализует работу системы управления уличным освещением в двух режимах: обучения НС; управления осветительной установкой. Основными задачами в режиме обучения является экспериментальное определение множества обучающих пар, а в режиме управления осветительной установкой – определение относительной мощности осветительной установки в зависимости от внешней освещенности,

при котором освещенность на дорожном покрытии в текущий момент времени будет равна нормативной.

Для решения этих задач была выбрана архитектура НС в виде трехслойного перцептрона с одним нейроном во входном и выходном слоях и 10 нейронами в скрытом слое. В качестве функции активации использовалась бинарная сигмоидальная функция:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (1)$$

Выбор данной функции обусловлен простотой нахождения ее производной, и как следствие, уменьшением затрат процессорного времени во время обучения НС.

Обучение нейронной сети производилось методом обратного распространения ошибки. Достоинствами данного метода являются его высокая эффективность, а также простота реализации. Для данного метода обучения необходимо иметь совокупность векторов входных значений освещенности  $E=\{E_1, E_2, \dots, E_n\}$  и соответствующих им выходных значений мощности  $P=\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ , при которых работа системы управления будет считаться эффективной. На начальном этапе работы, сведения об элементах обучающей выборки отсутствуют, что затрудняет процесс обучения сети. Поэтому, в разработанном алгоритме предполагается обучение НС в процессе работы системы управления. При разработке алгоритма обучения НС для системы управления уличным освещением нами выделены следующие операционные действия:

#### 1. Инициализация нейронной сети

Система управления считывает с датчика значение естественной освещенности  $E$  и запоминает его как входной сигнал обучающей выборки. Данное значение поступает на вход нейронной сети и в режиме прямого распространения вычисляются значения выходных сигналов каждого из нейронов и сети в целом:

$$Y_i = f\left(\sum_{k=1}^a w_{k,i} \cdot Y_k\right) \quad (2)$$

где  $k$  – номер нейрона в предыдущем слое;

$i$  – номер нейрона в текущем слое;

$w$  – вес соответствующей связи;

$Y$  – значение на выходе нейрона предыдущего слоя;

$a$  – количество нейронов в текущем слое.

В результате на выходе НС формируется относительное значение мощности осветительной установки. На данном этапе относительное значение мощности осветительной установки, при котором достигается нормируемое значение освещенности дорожного покрытия неизвестно, поэтому система переходит к его поиску экспериментальным путем.

2. Поиск элемента обучающей выборки в процессе работы системы управления

Включение осветительной установки происходит при относительном значении мощности, полученным на предыдущем этапе. После этого, происходит считывание значения освещенности  $E_{д.п.}$  с датчика, установленного непосредственно на дорожном покрытии и его сравнение с заранее заданным значением  $E_{норм}$ . Если эти значения не совпадают, то система производит корректировку уровня мощности осветительной установки  $P$  до того момента, пока не будет соблюдаться условие  $0,95 \cdot E_{норм} \leq E_{д.п.} \leq 1,05 \cdot E_{норм}$ . Таким образом, система получает пару: значение внешней освещенности  $E$  и соответствующее этой освещенности значение относительной мощности осветительной установки  $P$ , при котором на дорожном полотне достигается заданный уровень освещенности.

3. Обучение нейронной сети по полученной экспериментальной выборке.

Полученное значение  $E$  подается на вход сети и по формуле (2) вычисляются значения выходов всех нейронов. На выходе нейронной сети формируется некоторое значение  $P_{вых}$ . Для выходного слоя находится значение градиента ошибки:

$$\delta_{вых} = (P_{вых} - P) \cdot \frac{dP_{вых}}{ds} \quad (3)$$

где  $s = \sum w_k$  – взвешенная сумма входных сигналов выходного нейрона.

Рассчитывается значение изменения весов, связывающих нейроны скрытого слоя с выходным нейроном:

$$\Delta \omega_{i,вых} = -\eta \cdot \delta_{вых} \cdot Y_i \quad (4)$$

Далее для всех нейронов скрытого слоя находится значение:

$$\delta_i = (\delta_{вых} \cdot \omega_i) \cdot \frac{dY_i}{ds_i} \quad (5)$$

и рассчитывается значение изменения весов, связывающих входной нейрон с нейронами скрытого слоя:

$$\Delta \omega_{ex,i} = -\eta \cdot \delta_i \cdot Y_{ex} \quad (6)$$

Веса связей нейронов корректируются по формуле:

$$w'_{i,j} = w^{t-1}_{i,j} + \Delta w'_{i,j} \quad (7)$$

где  $t$  – номер итерации обучения.

4. Проверка критерия окончания обучения.

Если ошибка обучения достигает заранее заданной величины, либо не уменьшается в течение заранее заданного количества циклов обучения, то обучение прекращается. В противном случае система переходит к п. 1 и производит следующую итерацию обучения. Стоит отметить, что на следующей итерации обучение происходит в пакетном режиме с учетом полученных ранее пар входных и соответствующих им выходных значений. В данном режиме на вход нейронной сети предъявляются все элементы обучающей выборки и для каждого из них по формулам (4-6) вычисляется значение соответствующей коррекции весов  $\Delta w_{i,j}^{(n)q}$ , где  $n$  – номер слоя нейронной сети,  $q$  – номер примера из обучающей выборки для которого производится расчет. Затем вычисляются суммарные коррекции весов по формуле:

$$\Delta w_{i,j}^n = \sum_{q=1}^p \Delta w_{i,j}^{n(q)} \quad (8)$$

Далее веса связей корректируются по формуле (7) и система вновь проводит проверку критерия окончания обучения.

Следует отметить, что при каждой последующей итерации обучения используются не только вновь полученные данные, но и вся информация, накопленная до этого момента, что существенным образом ускоряет процесс обучения НС в пакетном режиме [8].

Для апробации алгоритма, авторами была произведена его программная реализация. Разработанная программа была зарегистрирована в университетском фонде электронных ресурсов ОГУ [9]. Для разработки программы использовался язык программирования C#. Это современный объектно-ориентированный язык высокого уровня, обладающий широкими возможностями для обработки и хранения информации. В нем наиболее просто реализована возможность общения с СОМ-портами, что является необходимым для интеграции программы с аппаратной частью СУО. Разработан-

ная программа работает согласно описанному выше алгоритму и имеет возможность изменения значения освещенности дорожного покрытия Енорм в процессе работы, что делает систему управления более гибкой, позволяя ей функционировать с различными требованиями к освещенности дорожного покрытия. Также, программа производит запись найденных на втором операционном действии алгоритма пар значений обучающей выборки в табличном виде, для их дальнейшей обработки и анализа эффективности работы системы.

Апробация системы управления уличным освещением, созданной на основе нейронной сети, осуществлялась на разработанной авторами экспериментальной установке, состоящей из пяти светодиодных моделей-опор уличного освещения [10]. В ходе эксперимента было проведено обучение нейронной сети и осуществлено тестирование программы. Обучение проводилось в период с 10 по 12 ноября 2014 года, в результате чего были получены диаграммы изменения естественной освещенности и мощности осветительной установки в утренние и вечерние часы. Время эксперимента было выбрано с учетом времени восходов и закатов, чтобы наиболее адекватно отразить динамику работы системы при изменении естественной освещенности.

После двух дней работы в режиме обучения система управления также была протестирована в режиме управления осветительной установкой. Результаты тестирования представлены на рисунке 1, кривая 1. Как видно из представленной диаграммы, система управления адекватно реагирует на изменение внешней освещенности и может работать в режиме управления осветительной установкой.

Отметим, что городское освещение в этот день было отключено в 8:45, до этого момента времени оно работало на полную мощность – рисунок 1, кривая 2. Энергоэффективность интеллектуальной системы управления определялась как разность площадей фигур, ограниченных соответствующими кривыми изменения относительной мощности, рисунок 1. Результаты расчета по полученным табличным данным показали, что экономия электроэнергии в данный промежуток времени составила 6,3%.

Таким образом, интеллектуальная система управления уличным освещением, работающая по разработанному авторами алгоритму является более энергоэффективной по сравнению с существующими системами. При изменении аппаратной части системы уличного освещения, нейронная сеть может быть переобучена для работы с новым оборудованием, что позволяет обеспечить критерии гибкости, модульности также на более высоком уровне по сравнению с существующими. Использование нейросетевых технологий в программной реализации алгоритма интеллектуальной системы управления электроснабжением установок обеспечивает адаптивность системы, посредством таких возможностей сети как самообучение и самонастройка.

**Выводы:**

1. Разработанный новый способ управления уличным освещением, основанный на интеграции способа управления по освещенности и метода искусственного интеллекта, отличается от существующих ранее:

- адаптивностью, полученной за счет применения технологии нейронных сетей, позволяющей системе уличного освещения самонастраиваться в зависимости от изменяющихся условий внешней среды (погодные условия, непредвиденные, случайные факторы);

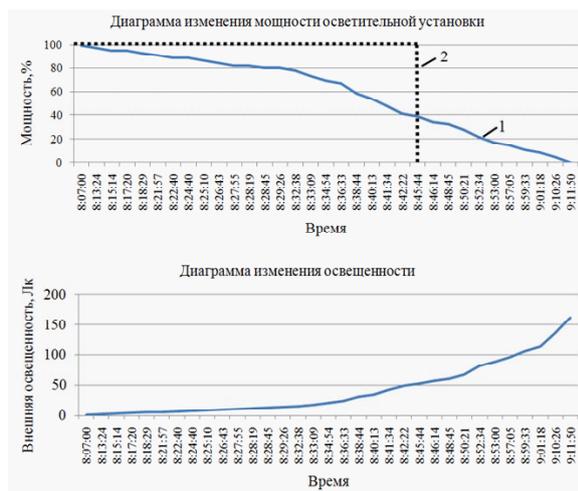


Рисунок 1. Результаты проверки работы системы управления уличным освещением. 1 – кривая изменения мощности осветительной установки при интеллектуальном регулировании, 2 – кривая изменения мощности при регулировании по заданному графику

– гибкостью, за счет возможности совершенствования, модернизации системы уличного освещения и ее применения с различными типами светильников на улицах с различными требованиями к освещенности;

– точностью (достоверностью), обеспечиваемой в процессе обучения нейронной сети;

– энергоэффективностью за счет того, что система реагирует на изменения внешних факторов в режиме реального времени.

2. Представленная новая методология и математическая модель функционирования алгоритма управления уличным освещением на основе нейросетевых технологий, включает в себя следующие операционные

действия: инициализация нейронной сети, поиск элемента обучающей выборки в процессе работы системы управления, обучение нейронной сети по полученной экспериментальной выборке, проверка критерия окончания обучения.

3. Результаты пилотных экспериментов системы управления освещением на разработанной авторами экспериментальной установке, состоящей из пяти светодиодных моделей-опор уличного освещения показали, что энергоэффективность интеллектуальной системы управления уличным освещением по сравнению с регулированием по заданному графику составляет 6,3%.

28.01.2015

**Список литературы:**

1. Эннс О. Интеллектуальные системы уличного освещения / О. Эннс // Энергосбережение. – 2008. – №1. – С. 58-62.
2. Федеральный закон РФ от 23.11.2009 №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // «Собрание законодательства РФ», 30.11.2009, № 48, ст. 5711.
3. Валиуллин К. Р. Анализ способов управления уличным освещением по различным критериям. Электроэнергетика глазами молодежи: науч. тр. V междунар. техн. конф., Т.2., г. Томск, 10-14 ноября 2014 г./Мин-во образования и науки РФ, Томский политехнический университет. – Томск: 2014, с 275-279.
4. Гурьев А. В. Системы автоматизированного управления наружным освещением / А. В. Гурьев, Е. А. Букварев // Электро-техника. – 2001. – № 5. – С. 4.
5. Киричок А. И. Автоматизация наружного освещения как инструмент энергосбережения/ А. И. Киричок // Мир дорог.-2012.- №63.-С. 38-40.
6. Казаринов Л. С. Разработка проектов энергоэффективных систем уличного освещения на основе инновационного технико-экономического механизма возвратно-целевого усиления бюджетного финансирования / Л. С. Казаринов, Т. А. Барбасова // Вестник ЮУрГУ Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника.– 2011.– Вып. 14. № 23 (240)– С. 92-97
7. Галушкин А. И. Нейронные сети: основы теории / А. И. Галушкин. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2012. – 496 с.
8. Матвеев М. Г. Модели и методы искусственного интеллекта. Применение в экономике: учеб. пособие / М. Г. Матвеев, А. С. Свиридов, Н. А. Алейникова. – М.: Финансы и статистика; ИНФРА-М, 2008. – 448 с.: ил.
9. Валиуллин, К.Р. Программа управления электроснабжением установок уличного освещения на основе нейросетевых технологий / К.Р. Валиуллин, С. Н. Шевченко, Н. В. Гарнова – Св-во о регистрации программного средства: Оренбург: УФАП. – № 1064 ; опубл. 20.01.15.
10. Валиуллин, К.Р. Стенд автоматического регулирования уличного освещения / К.Р. Валиуллин // Труды Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы» – Оренбург: ОООИПК «Университет», 2014. – С. 32-35.

Сведения об авторах:

**Семенова Наталья Геннадьевна**, заведующий кафедрой теоретической и общей электротехники Оренбургского государственного университета, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, доцент, e-mail: tomsk@house.osu.ru

**Валиуллин Камиль Рафкатович**, аспирант электроэнергетического факультета Оренбургского государственного университета, e-mail: valiullinkamil91@gmail.com

460000, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, тел. (3532) 372880