

# Новая энергоэффективная система управления освещением с учётом изменения естественной освещённости в помещении: проектирование и внедрение<sup>1</sup>

М. АЯЗ<sup>1</sup>, У. ЮСЕЛ<sup>2</sup>, К. ЭРХАН<sup>3</sup>, Э. ОЗДЕМИР<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Университет Коджаэли, факультет электротехники и энергетики, Коджаэли, Турция

<sup>2</sup>Университет Коджаэли, факультет механики, Коджаэли, Турция

<sup>3</sup>Международный центр исследований и разработок Альвади, Стамбул, Турция

<sup>4</sup>Университет Коджаэли, факультет проектирования энергетических систем, Коджаэли, Турция  
E-mail: <sup>1</sup>murat.ayaz@kocaeli.edu.tr

## Аннотация

В этом исследовании предлагается проектирование и внедрение новой рентабельной системы управления освещением с учётом естественной освещённости для обеспечения энергосбережения в общественном здании, в котором уже установлена обычная система управления освещением. Для анализа энергопотребления были измерены коэффициенты использования естественной освещённости во всех внутренних помещениях, в которых планировалось применение предлагаемой в исследовании системы управления освещением. Плотность потока солнечного излучения непрерывно передаётся в систему управления через пиранометр, размещённый снаружи, и потребность в искусственном освещении рассчитывается с использованием секционных коэффициентов использования естественного освещения. Таким образом, обеспечивается максимальный вклад солнечного света в освещённость внутри помещения при сокращении избыточного энергопотребления искусственного освещения. Результаты экспериментальных измерений показывают, что предлагаемая система управления освещением с учётом естественной освещённости обеспечивает среднюю энергоэффективность здания на уровне 60 %. В статье также подробно обсуждаются необходимые инвестиции, в которые входят как эксплуатационные затраты, так и сроки окупаемости для модернизации существующей осветительной установки и системы управления освещением в рекомендуемые. Анализ расчёта сроков окупаемости показал, что рекомендуемая система освещения имеет срок окупаемости на 5 лет меньше, чем обычная.

**Ключевые слова:** энергоэффективные здания, управление естественным освещением, система управления освещением, энергоэффективность, энергосбережение, рентабельные системы, проектирование систем автоматизации.

## 1. Введение

Повышение качества жизни требует охраны окружающей среды и эффективного использования природных ресурсов. Достижение энергоэффективности путём применения новых технологий в освещении имеет важное значение не только для снижения энергопотребления, но и для обеспечения экологической и экономической устойчивости [1, 2]. Энергия, затрачиваемая на освещение зданий, составляет значительную часть энергопотребления. Электрическое освещение покрывает 19 % от общего объёма производства электроэнергии в мире [3]. Коммерческие и офисные здания относятся к группе зданий с высоким энергопотреблением. При этом 14 % от общего потребления электроэнергии в коммерческих зданиях расходуется на освещение, а 11 % энергии используется для освещения и мелкой бытовой техники в домах [4, 5]. В абсолютных величинах энергопотребление на цели освещения ежегодно составляет от 100 до 1000 кВт·ч/м<sup>2</sup> в зависимости от расположения офисных зданий, используемого оборудования, рабочего времени, использования вентиляции и типа освещения. Примерно 40 % от общего объёма электроэнергии, потребляемой в офисных зданиях, используется для освещения [6–8].

Новые материалы и системы необходимы для достижения комфортного и эффективного с точки зрения по-

требления энергии освещения [9, 10]. При использовании энергосберегающих ламп 40 % экономии энергии достигается за счёт использования комбинации искусственного освещения с датчиками присутствия и отсутствия, а также при учёте естественной освещённости [11–13]. Быстрое развитие технологий обнаружения и микроконтроллеров позволило разработать и использовать эффективные энергосберегающие системы управления освещением, построенные на новых интеллектуальных платформах. Управление искусственным освещением стандартизирует уровень комфортного освещения для пользователя при одновременном снижении энергопотребления [14–19]. В качестве инструмента управления можно использовать открытую или замкнутую систему управления освещением [20]. В исследовании, проведённом Чиу и др., была создана замкнутая система управления освещением с осветительной установкой со светодиодами, которая работала автономно на основе данных, полученных от датчиков освещённости. Световой поток светильника регулировался за счёт амплитудной модуляции в зависимости от полученных данных об освещённости с датчика. Система сэкономила 55 % энергии при непрерывном использовании в условиях испытаний. Кроме того, рассмотренная система управления экономически более выгодна на 31,52 % по сравнению с системой с ручным управлением вкл./выкл. [14]. В другом исследовании коллектив под руководством Сахана разработал систему управления с учётом естественной освещённости с использованием датчика светозависимого сопротивления и пассивным инфракрасным датчиком. В разработанной системе, когда ни в одном помещении нет пользователя или если уровень освещённости при естественном освещении достаточен, искусственное освещение отключается и потребление электроэнергии, таким образом, снижается. Управление искусственным освещением осуществлялось путём определения различных уровней опорного напряжения для диапазона времени работы естественного освещения в зависимости от сезонных изменений. Недорогой контроллер с интегрированными обоими датчиками был установлен в небольшом помещении для управления освеще-

<sup>1</sup> Перевод с англ. Т.В. Мешковой



Рис. 1. Объект исследования

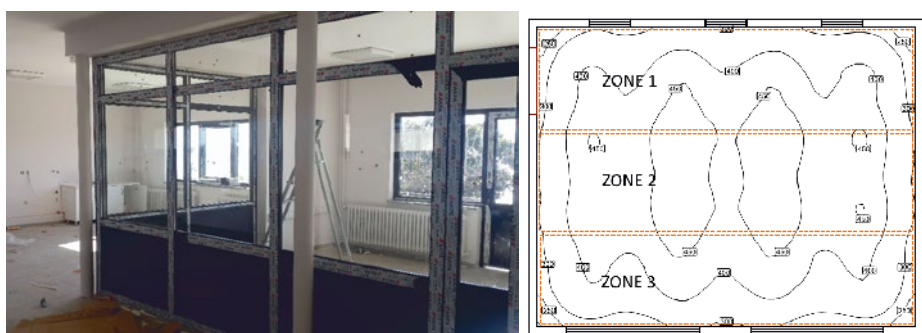


Рис. 2. Общий вид лаборатории материалов (а) и изолинии освещённости на рабочей плоскости (б)

нием, где система показала высокую эффективность работы [16]. Как и во всех вышеупомянутых работах, Дун провёл исследование, направленное на оптимизацию системы интеллектуального управления освещением и снижение энергопотребления в университетском классе. В исследовании использовался алгоритм управления эталонной адаптивной системой нечёткой модели. Было обнаружено, что этот алгоритм обладает лучшими характеристиками управления, более высокой точностью установившегося режима, более низкой частотой перегрузок и более высокой скоростью отклика, чем типичные нечёткие контроллеры, используемые в настоящее время [18]. В другом исследовании, посвящённом управлению освещением в таких же классах, для повышения энергоэффективности была предложена система управления освещением, основанная на технологии машинного зрения. Было обнаружено, что различное количество сигналов позволяет комплексно контролировать уровень освещённости, создаваемой светильниками в классе, и при этом экономить электроэнергию, расходуемую на работу осветительной установки [19].

За счёт использования естественного освещения можно сэкономить общее энергопотребление, расходуемое на освещение, а также обеспечить высокий световой поток, низкое тепловыделение по сравнению с высоким уровнем освещённости, защитить окружающую среду, улучшить качество визуального восприятия объектов по сравнению с искусственным освещением, снизить стресс и повысить эффективность работы сотрудников на местах [15, 21–24]. Согласно литературному обзору, можно сделать вывод, что от 20 до 60 % энергопотребления, затрачиваемого на цели освещения, можно сэкономить при использовании систем управления, которые учитывают естественное освещение [25]. Исследование, проведённое Пандхарипанде и др., направлено на обеспечение комфортного освещения при энергосбережении в офисе за счёт оптимизации работы искусственных источников света с учётом изменения естественного освещения. В работе также предлагается использовать датчики, которые будут ориентированы на сбор информации об освещении конкретного места пользователя, вместо тех, которые использовались

вместе с осветительной установкой. Если датчики расположены на уровне пользователя, то уровень освещённости измеряется на 10 % ниже и, следовательно, энергопотребление возрастает. Если вклад естественной освещённости в офисных помещениях превышает 25 %, то видно, что система управления должна отключить осветительную установку для снижения избыточного уровня освещённости рабочих поверхностей [26]. В исследовании, проведённом Тангом и др., система управления на основе учёта естественного освещения интегрируется в систему умного дома и управляется с помощью смартфона. Уровень освещённости помещения с тремя светильниками измеряется с помощью приложения в смартфоне, световой поток светильников управляется амплитудной модуляцией с помощью процессора *Ардуино*, а *Raspberry Pi* используется для подключения системы к редактору мобильных приложений. Таким образом, 54,7 % экономии энергопотребления достигается в солнечные дни [27]. В другом исследовании системы управления с учётом естественного освещения Мейкайвил и др. используют датчик освещённости, который выдаёт информацию о локальном уровне освещённости под каждым светильником в открытом пространстве офиса, и датчик присутствия. Для регулировки уровня диммирования светильников используется управляющее устройство. Согласно показаниям датчиков освещённости, система запрограммирована на достижение нормируемого уровня освещённости для рабочих зон и неиспользуемых зон с помощью ПИ-контроля. Применяются два сценария. В первом сценарии каждый контроллер работает независимо, и оказывается, что желаемое нормируемое значение не может быть достигнуто в каждом конкретном случае. Контрольное значение освещения фиксируется через ПИ-контроллеры в сети, при этом достигается высокая экономия потребляемой энергии [28]. В данном исследовании рассматривается экономия энергии, которая может быть достигнута с помощью системы управления, основанной на использовании естественного освещения для здания с обычной системой управления, а также сроки окупаемости стоимости новой установки. Секции (зоны освещения) и коэффициенты использования естественной

освещённости определяются путём измерений естественной освещённости во всех внутренних помещениях здания в течение указанного времени. Рекомендуемая осветительная установка, составляющие системы управления и алгоритм управления были сформированы на основе анализа выделенных зон освещения. Результаты, полученные в ходе экспериментальных измерений и анализа полученных данных, подробно описаны в заключении.

## 2. Экспериментальные методы

### 2.1. Объект исследования

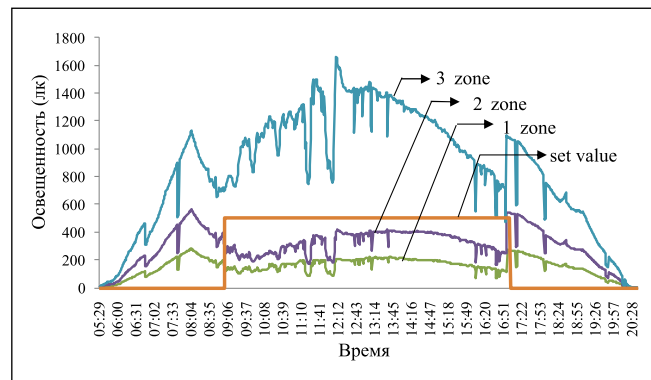
Здание, в котором будет установлена система управления на основе учёта естественного освещения, состоит из 10 независимых лабораторий и офисов. Его общая крытая площадь составляет 641 м<sup>2</sup>. В здании, представленном на рис. 1, лаборатории расположены в подвальном помещении, а офисы – на первом этаже. Осветительная установка для офисов и лабораторий состоит из 75 светильников (4×18 Вт) с люминесцентными лампами, используемыми с управлением вкл./выкл. Мгновенная потребляемая мощность составляет 5,4 кВт, а расход энергии на освещение за 8-часовую смену – 43,2 кВт·ч.

### 2.2. Измерение естественного освещения

Измерения проводятся в течение трёх месяцев для определения коэффициентов использования естественной освещённости в рабочее время во всех внутренних помещениях здания. Далее на основе полученных измерений были выделены зоны освещения в каждом из обследуемых помещений. Для 10 внутренних помещений были определены 26 зон освещения. Ниже подробно описаны измерения для лаборатории материалов.

В лаборатории материалов, представленной на рис. 2, осветительная установка состоит из 16 растровых светильников с люминесцентными лампами (4×18 Вт). Кроме того, лаборатория имеет площадь окна 7,56 м<sup>2</sup>, благодаря чему естественное освещение может дать значительный вклад в освещённость рабочих поверхностей. Площадь разделена на 3 зоны, учитывая расположение све-

Рис. 3. Вклад естественной освещённости в освещённость рабочей плоскости в лаборатории материалов в рабочее время



тильников и распределение естественной освещённости. Первая зона самая дальняя от окон, в ней установлены 4 светильника общей мощностью 288 Вт. Третья зона находится ближе всего к окну, а общая мощность осветительной установки в этой зоне составляет 288 Вт. Во второй зоне установлено 8 светильников, потребляемая мощность которых составляет 576 Вт.

Влияние естественной освещённости на общую освещённость в трёх рассматриваемых зонах лаборатории материалов в период с 09:00 до 17:00 часов работы представлено на рис. 3. Нормируемый уровень освещённости на рабочей плоскости в лаборатории составляет 500 лк, поэтому это значение в исследовании берётся за контрольное. В связи с этим коэффициент использования естественной освещённости и потребность в искусственном освещении уточняются путём сравнения значения естественной освещённости в зонах без искусственного освещения с контрольным значением. Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что естественное освещение создаёт освещённость на уровне 36 % от контрольного значения в первой зоне, на уровне 64 % во второй зоне и на уровне 100 % в третьей зоне. Общее энергопотребление на цели освещения в первой зоне в рабочее время составляет 2304 Вт·ч. При этом 830 Вт·ч из этой величины может быть покрыто естественным освещением, а 1474 Вт·ч энергопотребления должно обеспечиваться с помощью подачи электроэнергии через сеть. Во второй зоне 3000 Вт·ч из общего энергопотребления 4608 Вт·ч обеспечиваются естественным освещением, а 1608 Вт·ч – через сеть. В третьей зоне искусственное освещение не требуется вовсе из-за высокого уровня естественной освещённости в указанное время.

## 3. Система управления освещением с учётом изменения естественной освещённости

### 3.1. Автоматическая система управления на основе учёта изменения естественного освещения

В системах управления освещением, основанных на использовании естественного освещения, правильное измерение или расчёт его влияния на общую освещённость в помещении имеет большое значение для управления искусственным освещением. В этом контексте наиболее часто используется метод замкнутых управляемых структур. В таких системах датчики размещаются в каждом специально отведённом помещении для мгновенной передачи уровня освещённости в систему управления. Хотя использование нескольких датчиков позволяет осуществлять более простое и корректное управление, возникает серьёзный недостаток в виде стоимости такой установки. Кроме того, необходимость проведения регулярной проверки и калибровки каждого датчика приводит к увеличению эксплуатационных расходов. Так срок окупаемости подобного мероприятия может быть сокращён за счёт снижения монтажных и эксплуатационных затрат при установке разомкнутой регулируемой системы управления освещением. Кроме того, преобразование обычных систем управления освещением в систему управления, автоматически настроенную в зависимости от изменения естественного освещения, может быть достигнуто с меньшим количеством компонентов с помощью управления с разомкнутым контуром.

В этом исследовании предлагаемая система управления на основе изменения естественного освещения состоит



**Напряжение, применяемое для достижения контрольного значения освещённости на рабочей поверхности в лаборатории «Индустрия 4.0»**

Ест. осв-ть снаружи здания (клк)	Ест. осв-ть в зонах осв. (лк)			Необходимая осв-ть от иск. осв. (лк)		
	1 зона	2 зона	3 зона	1 зона	2 зона	3 зона
0–0,2	0	0	0	500	500	500
0,2–0,9	8	15	50	492	485	450
0,9–1,9	31	55	141	469	445	359
1,9–2,9	39	75	220	461	425	280
2,9–3,9	66	124	310	434	376	190
3,9–4,8	80	151	353	420	349	147
4,8–5,7	125	236	499	375	264	1
5,7–6,9	140	271	602	360	229	0
6,9–8,8	165	295	850	335	205	0
8,8–9,7	171	308	974	329	192	0
9,7–10,9	183	328	1136	317	172	0
10,9–11,9	197	357	1220	303	143	0
11,9–19,0	298	519	1410	202	0	0
19,0–55,4	310	535	1500	190	0	0
55,4–69,7	325	597	1623	175	0	0
69,7–78,7	338	622	1652	162	0	0
78,7–83,7	383	710	1826	117	0	0
83,7–100,0	444	820	1948	56	0	0
100,0–120,0	490	944	2183	10	0	0

из разомкнутой структуры управления, а блок-схема управления приведена на рис. 4. В рекомендуемой системе управления значение солнечного излучения передаётся в систему управления мгновенно с помощью пирометра, расположенного снаружи. Коэффициент использования естественной освещённости (процентное соотношение вклада естественного освещения в общую освещённость рабочей плоскости) в каждой обозначенной внутренней зоне определяется с помощью экспериментальных измерений. Потребность в искусственном освещении рассчитывается для каждой зоны путём оценки мгновенного значения естественной освещённости.

Контроллер рассчитывает количество искусственного освещения для зон, в которых недостаточно естественной освещённости для достижения контрольного значения. Требуемое номинальное напряжение в светильниках определяется из расчёта достижения

контрольного значения освещённости при естественном и искусственном освещении. Рекомендуемая система управления освещением установлена в лаборатории «Индустрия 4.0». Существующая осветительная установка состоит из 6 светильников с люминесцентными лампами типа T8 (4×18 Вт), которая демонтируется, и вместо неё устанавливаются также 6 светильников со светодиодами фирмы *Ledova* 35 Вт. Светильники имеют групповое попарное включение в зависимости от удаления от окон, являющихся источником естественного освещения. Таким образом, формируются три параллельных окнам линии светильников с групповым включением на месте существующих. Значение аналогового напряжения (0–5) В, полученное от пирометра, передаётся в систему через интеллектуальный шкаф управления по *PLC S7-1200*, который представлен на рис. 5. Для измерения солнечного излучения используется один

пиранометр. *PLC* управление светильниками осуществляется в диапазоне (0–10) В в соответствии с созданным алгоритмом путём расчёта количества необходимого искусственного освещения, исходя из вклада естественного освещения. С помощью анализатора измеряются суммарные значения тока, напряжения и мощности сети в каждой линии. Измеренные значения передаются от анализатора к *PLC*-контроллеру через *Ethernet*. Все измеренные значения также представлены на панели шкафа и могут быть сохранены на карте памяти. Кроме того, к системе можно получить доступ и внести изменения через интернет.

Измерения должны проводиться как можно более линейно для получения коэффициентов использования естественной освещённости в каждой зоне освещения лаборатории «Индустрии 4.0». Зональные коэффициенты могут быть рассчитаны исходя из времени, а также рассчитаны с учётом

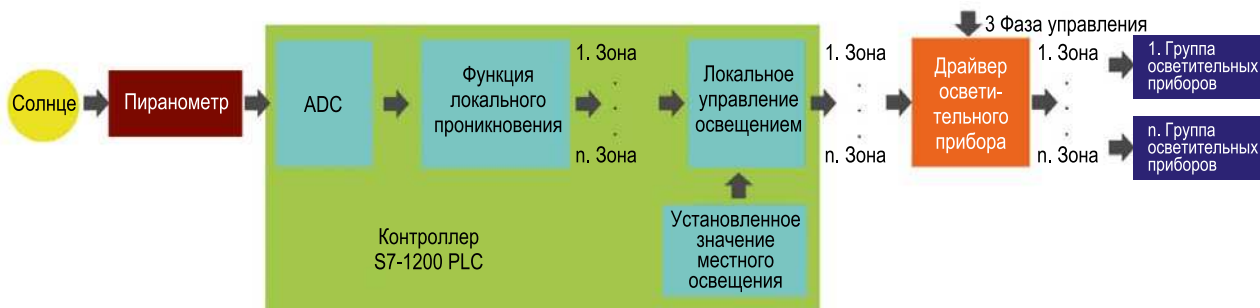


Рис. 4. Блок-схема автоматической системы управления освещением

Рис. 5. Панель управления шкафа S7-1200 и общий вид лаборатории «Индустрия 4.0»

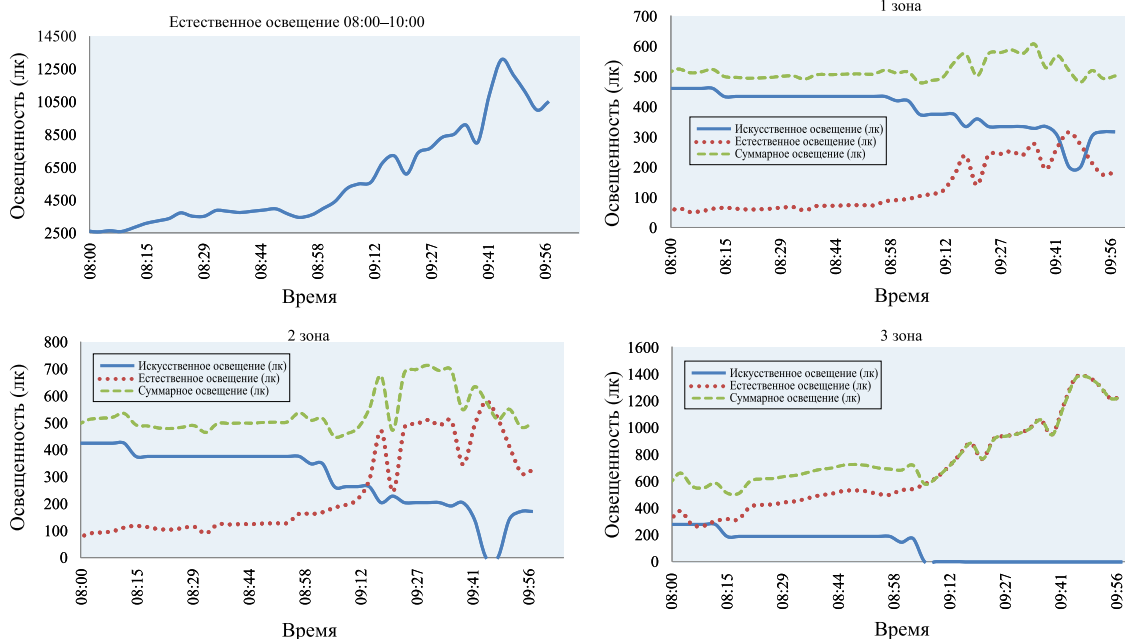
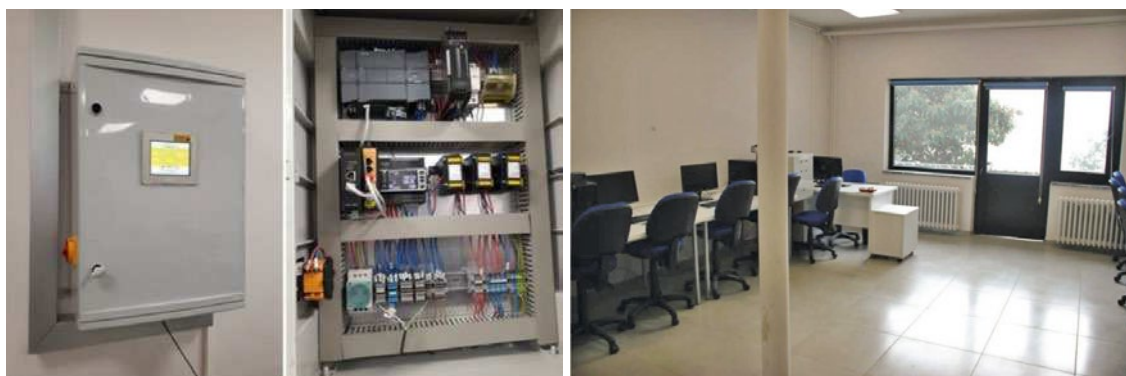


Рис. 6. Освещённость с 08:00 до 10:00

вклада естественной освещённости. В данном исследовании коэффициенты определяются с учётом влияния естественного освещения на освещённость в зонах освещения. Измеренные значения классифицируются в соответствии с первой зоной, где естественное освещение оказывает наименьшее влияние, и определяются номинальные напряжения светильников в соответствии с потребностями в искусственном освещении зон. Количество уровней напряжения получилось большим для того, чтобы как

можно более плавно изменять уровень освещённости для предотвращения резких перепадов и снижения зрительной утомляемости. Плавное диммирование используется как для повышения освещённости, так и для снижения уровня освещённости, создаваемого искусственными источниками света. В табл. 1 приведены выделенные группы уровней освещённости, количество зон в зависимости от вклада естественной освещённости, количество искусственного освещения, необходимого для этих зон и номинальное аналого-

вое напряжение, которое контроллер должен подать на светильники для достижения контрольного значения.

### 3.2. Экспериментальные характеристики автоматизированной системы управления естественным освещением

Рекомендуемая система управления освещением работает в соответствии с коэффициентами использования естественного освещения, указанными

**Сравнение разработанной системы, основанной на использовании естественного освещения с системой управления вкл./выкл.**

№	Системы	1 зона Энергопотребление (Вт·ч)	2 зона Энергопотребление (Вт·ч)	3 зона Энергопотребление (Вт·ч)	Всего Энергопотребление (Вт·ч)
1	Система вкл./выкл. с люминесцентными лампами	1152	1152	1152	3456
2	Система вкл./выкл. со светильниками со светодиодами	560	560	560	1680
3	Система управления на основе учёта ест. осв. со светильниками со светодиодами	375	218	95	688
4	Сравнение существующей системы вкл./выкл. со светильниками с люминесцентными лампами и со светодиодами	48 %	48 %	48 %	48 %
5	Сравнение системы вкл./выкл. со светильниками со светодиодами и системы на основе естественного освещения	33 %	61 %	83 %	59 %

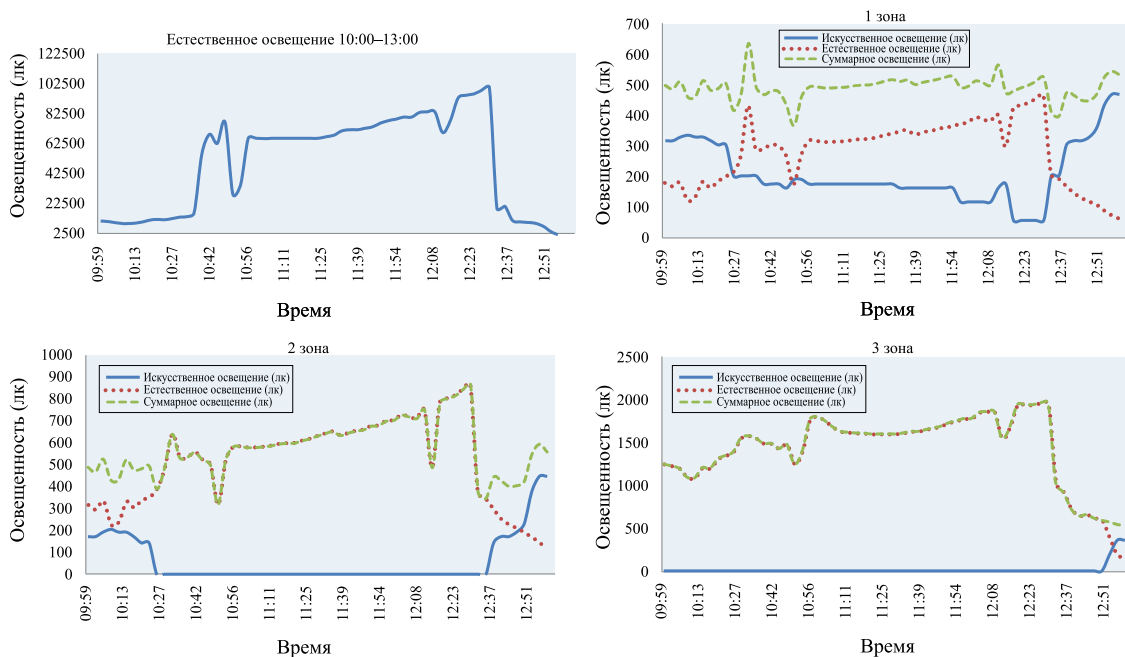


Рис. 7. Освещённость с 10:00 до 13:00

в предыдущем разделе. Измерения освещённости проводятся с помощью люксметров в каждой зоне, чтобы система могла достичь контрольного уровня освещённости на рабочих плоскостях. Измерения освещённости от естественного и искусственного освещения снаружи здания и в каждой из рассматриваемых зон освещения представлены на рис. 6 и рис. 7. Измерения проводились в дневные часы (08:00–10:00) и (10:00–13:00). Сегментация производится в зависимости от изменения естественного освещения. В утреннее время с 08:00 до 10:00 естественная освещённость увеличива-

ется, но резкий скачок приходится на время с 10:00 до 13:00.

Уровень освещённости в зоне 1 берётся между (8:00–10:00). Недостаточный уровень естественной освещённости увеличивает потребность в искусственных источниках света. В систему добавляется задержка из-за негативного влияния внезапных изменений освещённости на зрение, таким образом, общий уровень контрольной освещённости увеличивается до 590 лк. Естественное освещение оказывает более сильное влияние на зону 2, и потребность в искусственном освещении уменьшается. Третья

зона – это область, которая наиболее эффективно использует естественное освещение, так как она расположена рядом с окном, здесь потребность в искусственном освещении минимальна. Необходимое искусственное освещение уменьшается с увеличением естественного освещения. Видно, что энергопотребление уменьшается в зависимости от времени по зонам. Так, например, к 09:05 потребляемая мощность в зоне 3 составляла 0 Вт.

При установке светильников со светодиодами вместо существующих 6 светильников с люминесцентными лампами (4×18 Вт) в лаборато-

## Вклад естественного освещения в освещённость рабочих поверхностей во всех помещениях обследуемого здания

Наименование помещения	Мощность (Вт)	Энерго-е (Вт·ч)	Мощность ОП с СД (Вт)	Энерго-е ОП с СД (Вт·ч)	Среднее значение вклада ест. осв. (%)	Вклад ест. осв. (Вт·ч)	ЦИЭО* с учётом ест. осв. (Вт·ч)/м <sup>2</sup>
Лаборатория материалов	1000	9000	560	4000	70 %	2500	26,1
Лаборатория литья	864	6912	420	3360	63 %	2128	28,4
Лаборатория электрических двигателей	864	6912	420	3360	63 %	2128	31,4
Лаборатория «Индустрия 4.0»	432	3456	210	1680	60 %	1008	3,1
Лаборатория робототехники	432	3456	210	1680	64 %	1087	23,4
Комната профессорско-преподавательского состава	432	3456	210	1680	56 %	936	26,7
Главное управление по делам студентов	168	4032	245	1960	61 %	1196	26,5
Офис документооборота	432	3456	210	1680	40 %	663	17,6
Офис управления	288	2304	140	1120	80 %	896	44,8
Отдел поддержки	288	2304	140	1120	22,5 %	252	12,6
Всего	5688	45504	2765	22120	59 %	13228	

\*Примечание научного редактора: метод цифровой индикации энергии освещения (*Lighting Energy Numerical Indicator, LENI*) обеспечивает альтернативный способ расчёта энергетической эффективности освещения здания. В то время как каждый светильник обычно оценивается по его энергетической эффективности (например, светильник без управления должен иметь минимальный КПД 60 лм светильника на Вт цепи), метод ЦИЭО вычисляет фактическую энергию, используемую в кВт·ч на квадратный метр в год. Затем этот показатель сравнивается с максимальным эталонным значением в зависимости от освещённости, необходимой в помещении.

Таблица 4

## Анализ затрат

Компоненты		Система вкл./выкл. (ЛЛ)	Система вкл./выкл. (СД)	Обычная система на основе ест. осв.	Рекомендуемая система на основе ест. осв.
1	Светильники	2756 \$	3635 \$	9042 \$	9042 \$
2	Датчики освещённости	–	–	4500 \$	450 \$
3	Контроллеры и шкаф управления	–	–	5350 \$	4919 \$
4	Кабель	615 \$	615 \$	1285 \$	1117 \$
5	Монтажные работы	513 \$	513 \$	1010 \$	945 \$
Всего			4763 \$	21187 \$	16473 \$

рии «Индустрия 4.0» установленная мощность осветительной установки снижается с 432 Вт до 210 Вт. Табл. 2 показывает, что потребление энергии в течение 8-часового рабочего дня снизилось с 3456 Вт·ч до 1680 Вт·ч. Использование светильников со светодиодами вместо светильников с люминесцентными лампами сэкономило 48 % потребления энергии.

Полученные результаты исследования в лаборатории «Индустрии 4.0»

аппроксимируются для определения установленной мощности осветительной установки в остальных рабочих помещениях, в которые входят 10 лабораторий и офисов, и энергопотребления, затрачиваемого на 8-часовую смену, а также влияния естественного освещения на зоны. В табл. 3 приведены эксплуатационные и процентные значения установленной мощности в рабочих помещениях с естественным освещением, энергопотребление

с 09:00 часов до 17:00 часов и вклад естественного освещения. Всего используется 79 светильников с люминесцентными лампами Т8 (4×18 Вт), а установленная мощность составляет 5688 Вт. Если светильники непрерывно включены и управляются по алгоритму вкл./выкл. в течение 8-часовой смены, то потребляемая энергия составляет 45504 Вт·ч.

Значения мощности и энергопотребления определяются при замене 79



существующих светильников во всех рабочих помещениях на встроенные панельные светильники со светодиодами (600×600 мм Ledova PL1400125 Olea 35 Вт), которые были применены в лаборатории «Индустрия 4.0» и управляются в зависимости от естественного освещения. Если светильники со светодиодами работают в режиме вкл./выкл., то потребление через 8 часов составит 22120 Вт·ч, в то время как при использовании системы управления, основанной на использовании естественного освещения эта величина может сократиться до 13228 Вт·ч.

#### 4. Анализ Затрат

Система разработана для использования в 10 независимых зонах в центральных лабораториях и студенческих корпусах, и может быть применена для повышения энергоэффективности зданий за счёт управления освещением. В данном исследовании не рассматривалась система управления в коридорах, складских помещениях, архивах и туалетах. Анализ необходимых затрат проводится для тех помещений, в которых была установлена рекомендуемая система управления освещением. Всего в рассматриваемых зонах установлено 79 светильников с люминесцентными лампами (4×18 Вт).

В обычных системах управление светильниками осуществляется с помощью переключателей вкл./выкл. В табл. 4 приведены инвестиционные затраты на необходимое оборудование для лабораторий. Стоимость монтажа составляет 3884 \$. Светильники со светодиодами используются с обычной системой управления на основе учёта изменения естественной освещённости, и есть датчик, который измеряет уровень освещённости в каждом помещении. Требования к компонентам рекомендуемой системы управления, следующие:

- использование контроллера обязательно для обработки информации и управления светильниками;
- контроллер должен обеспечивать мониторинг данных и удалённый доступ к системе;
- необходимо использование анализатора, который позволяет измерять экономию энергии на объекте;
- светильники должны иметь свойство диммирования (рекомендуемые

светильники со светодиодами подходят под эти требования);

– система должна иметь датчик, способный измерять уровень освещённости 10 обособленных зон освещения, и управляющую структуру, которая будет управлять 26 светильниками в этих зонах.

В случае использования обычной системы управления, основанной на учёте естественного освещения, затраты будут составлять 21187 \$. При этом рекомендуемая система управления с одним датчиком, соответствующая вышеуказанным требованиям, суммарно будет стоить 16473 \$. Её главное отличие – в использовании одного датчика освещённости для всех зон освещения, благодаря чему происходит сокращение входных данных контроллера.

Согласно тарифу 2019 года, применяемому в школах Турции, стоимость 1 кВт·ч электроэнергии составляет 14,89 С [29]. Если вместо светильника с люминесцентными лампами Т8 используется светильник со светодиодами, то к стоимости установки будет добавлено ещё 879 \$. В случае использования светильника со светодиодами вместо светильника с люминесцентными лампами избыточная стоимость может быть компенсирована в течение 1 года. Если вместе со светильниками с люминесцентными лампами Т8 установлена обычная (датчик в каждой рабочей зоне) система управления на основе учёта изменения естественного освещения, то требуются дополнительные инвестиции в размере 17303 \$.

#### 5. Заключение

В качестве альтернативы обычным системам управления на основе учёта изменения естественного освещения в исследовании используется разомкнутая система управления с единственным датчиком. Уровни естественной освещённости фиксируются в разные периоды времени для полного представления характера изменения естественного освещения в помещениях, где будет применяться система управления. Соответственно определяются коэффициенты использования естественного освещения в этих помещениях. Экспериментальная система была установлена в лаборатории «Индустрия 4.0». Существующие светильники были за-

менены на светильники со светодиодами с функцией диммирования, их рабочий режим настраивался в зависимости от изменения измеренной естественной освещённости. Сравнились характеристики существующих традиционных светильников, светильников со светодиодами и системы управления с учётом естественного освещения со светильниками со светодиодами. Когда светильники со светодиодами работают в режиме вкл./выкл., оказывается, что они на 48 % эффективнее осветительных установок с традиционными источниками света. Значение естественной освещённости измерялось с помощью одного датчика, расположенного вне помещения, а светильники диммировались в зависимости от изменения естественного освещения. Опытным путём было достигнуто 59 % экономии энергии. Анализ стоимости системы управления был выполнен для здания целиком, а не для одного рассматриваемого помещения лаборатории. Из анализа расходов видно, что пуско-наладочные расходы обычных систем управления освещением ниже, чем систем управления на основе учёта естественного освещения. Однако, наиболее эффективной из рассмотренных систем была определена система управления на основе учёта естественного освещения с разомкнутым контуром с одним датчиком освещённости. Несмотря на свою высокую стоимость, системы учёта естественного освещения поддерживают фиксированный уровень освещённости при низких значениях естественного освещения и обеспечивают комфортное освещение для пользователей. Поскольку целью исследования является энергоэффективность, диммирование светильников не выполнялось в тех случаях, когда естественное освещение создавало уровень освещённости выше контрольного. Установлено, что рекомендуемая система управления освещением позволяет сократить срок окупаемости на 5 лет по сравнению с обычными системами управления на основе учёта естественной освещённости. Кроме того, рекомендуемая система обладает рядом преимуществ, таких как 59 % экономия энергии, мгновенный мониторинг данных о токе системы, напряжении, мощности и освещённости, а также дистанционное управление.



## Благодарности

Эта работа была выполнена при поддержке Координационного отдела научно-исследовательских проектов университета Коджаэли в рамках договора № 2018/072.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Paz J.F.D., Bajo J., Rodriguez S., Villarrubia G., Corchado J.M. Intelligent system for lighting control in smart cities // Information Sciences, 2016. V372, pp. 241–255.
2. Radulovic D., Skok S., Kirincic V. Energy efficiency public lighting management in the cities // Energy, 2011. V36, #4, pp. 1908–1915.
3. Zou H., Zhou Y., Jiang H., Chien Z.C., Xie L., Spanos C.J. WinLight: A WiFi-based occupancy-driven lighting control system for smart building // Energy and Buildings, 2018. V158, pp. 924–938.
4. Rosenberg E. Calculation method for electricity end-use for residential lighting // Energy, 2014. V66, pp. 295–304.
5. Yahiaoui A. Experimental study on modelling and control of lighting components in a test-cell building // Solar Energy, 2018. V166, pp. 390–408.
6. Darula S. Review of the current state and future development in standardizing natural lighting in interiors // Light & Engineering, 2018. V26, #4, pp. 5–26.
7. Santamouris M., Dascalaki E. Passive retrofitting of office buildings to improve their energy performance and indoor environment: the office project // Building and Environment, 2002. V37, pp. 575–578.
8. Chi D. A., Moreno D., Navarro J. Correlating daylight availability metric with lighting, heating and cooling energy consumptions // Building and Environment, 2018. V132, pp. 170–180.
9. Doulos L., Tsangrassoulis A., Topalis F.V. Multi-criteria decision analysis to select the optimum position and proper field of view of a photosensor // Energy Conversion and Management, 2014. V86, pp. 1069–1077.
10. Barbón A., Pardellas A. Fernández-Rubiera J.A., Barbón N., New daylight fluctuation control in an optical fiber-based daylighting system // Building and Environment, 2019. V153, pp. 35–45.
11. Ovcharov A.T., Selyanin Y.N., Antsupov Y.V. A hybrid illumination complex for combined illumination systems: concepts, state of the problem, practical experience // Light & Engineering, 2018. V26, #2, pp. 20–28.
12. Dubois M.C., Blomsterberg A. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review // Energy and Buildings, 2011. V43, pp. 2572–2582.
13. Shen E., Hu J., Patel M. Energy and visual comfort analysis of lighting and daylight control strategies // Building and Environment, 2014. V78, pp. 155–170.

14. Chew I., Kalavally V., Oo N.W., Parkkinen J. Design of an energy-saving controller for an intelligent LED lighting system // Energy and Buildings, 2016. V120, pp. 1–9.

15. Yu X., Su Y. Daylight availability assessment and its potential energy saving estimation – A literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. V52, pp. 494–503.

16. Sahana S., Roy B. Development and performance analysis of a cost-effective integrated light controller // Light & Engineering, 2019. V27, #6, pp. 73–81.

17. Alexei K. Soloviev, Nina A. Muraviova, Sergei V. Stetsky. Comfort light environment under natural and combined lighting method of their characteristics definition with subjective expert appraisal using // Light & Engineering, 2018. V26, #3, pp. 124–131.

18. Dun W. Optimization of intelligent illumination in university classroom based on FM-RAS control algorithm // Light & Engineering, 2018. V26, #2, pp. 52–59.

19. Cheng R. Classroom lighting energy-saving control system based on machine vision technology // Light & Engineering, 2018. V26, #4, pp. 143–149.

20. Jain S., Garg V. A review of open loop control strategies for shades, blinds and integrated lighting by use of real-time daylight prediction methods // Building and Environment, 2018. V135, pp. 352–364.

21. Pandharipande A., Caicedo D. Smart indoor lighting systems with luminaire-based sensing: A review of lighting control approaches // Energy and Buildings, 2015. V104, pp. 369–377.

22. Soori P.K., Vishwas M. Lighting control strategy for energy efficient office lighting system design // Energy and Buildings, 2013. V66, pp. 329–337.

23. Nikolaevich A. V. Light desynchronization and health // Light & Engineering, 2019. V27, #3, pp. 14–25.

24. Ihm P., Nemri A., Krarti M. Estimation of lighting energy savings from daylighting // Building and Environment, 2009. V44, #3, pp. 509–514.

25. Gentile N., Dubois M., Laike T. Daylight harvesting control systems design recommendations based on a literature review // Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2015 IEEE15th International Conference on Rome, Italy, 10–13 June, ISBN: 978–1–4799–7994–3, 2015. pp. 632–637.

26. Pandharipande A., Willems F.M.J. Daylight-adaptive lighting control using light sensor calibration prior-information // Energy and Buildings, 2014. V73, pp. 105–114.

27. Tang S., Kalavally V., Ng K.Y., Parkkinen J. Development of a prototype smart home intelligent lighting control architecture using sensors onboard a mobile computing system // Energy and Buildings, 2017. V138, pp. 368–376.

28. Meughevel N.V.D.M., Pandharipande A., Caicedo D., Hof P.P.J.V.D. Distrib-

uted lighting control with daylight and occupancy adaptation // Energy and Buildings, 2014. V75, pp. 321–329.

29. Türkiye Cumhuriyeti Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu [Republic of Turkey Energy Market Regulatory Authority]. URL: <https://www.epdk.org.tr/Detay/Icerik/3-0-1/tarifeler> (reference date: 29.10.2019)



**Мурат Аяз (Murat Ayaz)**, Ph.D., доцент кафедры электротехники и энергетики Университета Коджаэли, Турция. Область научных интересов включает в себя электрические машины, электромеханические системы, гибридные электромобили и системы промышленной автоматизации



**Угур Юсель (Ugur Yucel)**, М. Сс. Аспирант кафедры проектирования энергетических систем Университета Коджаэли, Турция. Область научных интересов включает в себя управления освещением, светодиоды и системы промышленной автоматизации



**Корай Эрхан (Koray Erhan)**, Ph.D. Системный инженер в компании AVL R&D, Турция. Область научных интересов – электрические и гибридные электромобили, фотоэлектрические системы производства электроэнергии, возобновляемые источники энергии, технологии хранения энергии, интеллектуальная сетевая интеграция и системы автоматизации



**Энгин Оздемир (Engin Ozdemir)**, Ph.D. Профессор Университета Коджаэли, технологического факультета инженерного факультета энергетических систем в Коджаэли в Турции. Область научных интересов – силовая электроника, возобновляемые источники энергии, накопление энергии и промышленная автоматизация