

Снижение энергопотребления в беспроводных сенсорных сетях дорожного освещения¹

М. ЧИБУК

Факультет вычислительной техники, Университет Битлис Эрен, Турция
E-mail: mcibuk@beu.edu.tr

Аннотация

Целью данного исследования является снижение энергопотребления беспроводной сенсорной сети с линейной топологией за счёт предложенных новых методов. Поскольку физическая установка систем дорожного освещения требует финансовых и трудовых затрат, эти методы были отработаны и проанализированы в режиме моделирования. Два метода предлагаются для ускоренного развёртывания системы освещения и повышения быстродействия датчиков, которые подключаются к сети и передают данные со светильников: метод сетевого соединения через прокси и новый метод обработки пакетов данных в общем канале с разграничением доступа по времени. Сравнительный анализ сценариев энергопотребления системами освещения с 50, 100, 150 и 200 светильников проводился во время обмена данными через беспроводные сенсорные сети. Классический метод и предложенный новый метод оценивались в рамках сценариев передачи данных с помощью одно- или многоскачковой радиосвязи. При обмене данными между светильниками по предложенному новому методу с использованием односкачковой радиосвязи общее энергопотребление было по меньшей мере на 80 % эффективнее по сравнению с классическим методом. В рамках того же сценария общее энергопотребление систем освещения с линейной топологией оказалось эффективнее на 58 % при сравнении нового метода с классическим и использовании структуры с тремя скачками.

Ключевые слова: умное освещение, беспроводная сенсорная сеть, энергоэффективность, линейное освещение.

1. Введение

В линейной беспроводной сенсорной сети (*WSN, wireless sensor network*) узлы располагаются один за другим. Данные передаются узлу-координатору от исходного узла через другие узлы. Чем больше узлов, тем существеннее сквозная задержка пакетов данных и насыщеннее трафик в тех узлах, которые расположены поблизости от узла-координатора. Кроме того, чем больше количество узлов в линейной топологии, тем выше вероятность столкновения и заклинивания пакетов. Протоколы, разработанные для идеальных линейных топологий, должны обладать высокой чувствительностью ко времени задержки, обеспечивать стабильное подключение и безошибочную передачу данных в ЦОД.

Что касается энергопотребления, доля освещения в общем потреблении энергии увеличивается с каждым днём. Умные системы обеспечивают устойчивое и бесперебойное освещение [1–5]. Беспроводные сети часто используются для интеллектуального освещения при автоматизации систем удалённого мониторинга и дистанционного управления [6–9].

Узлы являются неотъемлемой частью беспроводных сенсорных сетей, и увеличение их количества замедляет работу таких сетей. Шаблоны соединений и последовательность подключения узлов (топология) оказывают непосредственное влияние на производительность и срок службы сети [10, 11]. Для обеспечения самоорганизации сети, уменьшения вероятности возникновения столкновений пакетов на линиях связи, а также заклиниваний и помех, энергосбережения и продления срока службы сети важно правильно подобрать топологию сети [12, 13]. Но в случае с линейным дорожным освещением речь о выборе топологии не идёт. Для линейного дорожного освещения использование беспроводной сенсорной сети с линей-

ной топологией – обязательное условие [14–16]. Поэтому для нормального функционирования системы дорожного освещения с линейной топологией необходимо устранить причины возникновения заклиниваний и конфликтов между пакетами во время передачи данных внутри беспроводной сенсорной сети, а также уменьшить количество помех. При выполнении этих операций особое внимание уделяется энергосбережению [8, 17].

В данном исследовании предлагается новый эффективный метод для уменьшения энергопотребления беспроводными сенсорными сетями с линейной топологией в системах дорожного освещения. Узел освещения (*LN, lighting node*) в этой работе обозначает светильник. Трансформаторный столб называется узлом-координатором (*CLN, coordinator lighting node*).

Система дистанционного мониторинга и управления, которая является предметом данного исследования, записывает различные параметры: уровень яркости дорожного покрытия от узла освещения (светильника), снижение светового потока светильника на основе анализа яркости дорожного покрытия по сравнению со значением яркости в первый день, туманность, влажность, температура воздуха независимо от того, включён светильник или нет, а также угол наклона светильника по отношению к локации и пр. Таким образом, сбор информации с узлов освещения и сведений об обслуживании системы дорожного освещения происходит автоматически [8, 16, 18–20].

2. Применение беспроводных сенсорных сетей в системах освещения

Принцип работы линейных беспроводных сенсорных сетей, применяющихся в системах освещения, заключается в обмене данными между узлами освещения и узлом-координатором. Узел-координатор организует работу сети и управляет узлами освещения, обеспечивая передачу данных. При небольшом количестве светильников и отсутствии линейной топологии передача данных между светильниками осуществляется с помощью односкачковой радиосвязи. При линейной топологии светильников используется многоскачковая радиосвязь. Узлы освещения, не подклю-

¹ Перевод с англ. Т.В. Мешковой

Рис. 1. Линейные беспроводные сенсорные сети

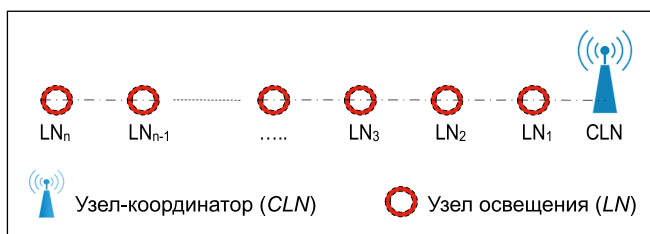
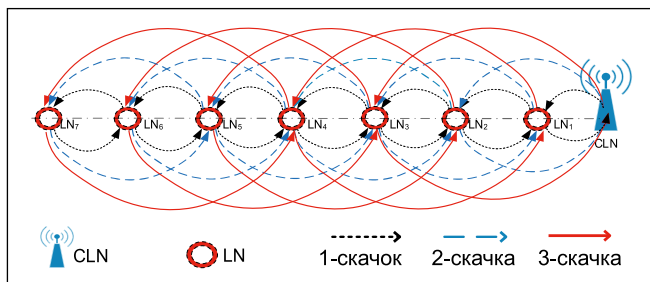


Рис. 2. Линейная структура беспроводной сенсорной сети с передачей данных за один, два или три скачка



чёрные непосредственно к узлу-координатору, связываются с ним через другие узлы из-за большого расстояния [8, 16, 18–20]. На рис. 1 показан образец линейной беспроводной сенсорной сети.

Системы освещения с линейной топологией устанавливаются вдоль дорог, как показано на рис. 1. Такая топология чаще всего используется для освещения дорог и тоннелей. [4, 6, 21, 22].

При линейной топологии узлы освещения направляют узлу-координатору информацию о предыдущем узле. Передача данных осуществляется при помощи одно- или многоскачковой радиосвязи. Количество энергии, потребляемой узлом освещения для передачи пакета данных, растёт по мере увеличения расстояния между светильниками. Помимо этого, на сквозную задержку пакетов при коммутации влияет количество скачков. Чем больше светильников, тем существеннее сквозная задержка пакетов данных. Трафик обмена данными в узлах освещения, расположенных поблизости от узла-координатора, увеличивается прямо пропорционально размеру сети. Как установлено в ходе данного исследования, увеличение количества светильников в системе освещения с линейной топологией ведёт к большей частоте столкновений и заклиниванию пакетов. По этой причине, поскольку решения для дорожного освещения разрабатываются для систем с линейной топологией, следует повысить чувствительность протоколов ко времени задержки, обеспечить стабильное подключение и безошибочную передачу данных в ЦОД [8,

23–25]. В беспроводных сенсорных сетях с линейной топологией передача пакетов данных между светильниками (узлами освещения) и узлом-координатором происходит по схеме, представленной на рис. 2, за один, два или три скачка.

При выборе оптимальных условий для обмена данными в рамках беспроводной сенсорной сети можно ориентироваться на следующие параметры:

- низкое энергопотребление;
- неконфликтующие пакеты данных;
- соединение всех узлов в сеть;
- одновременное подключение к сети;
- отказоустойчивость;
- быстрое восстановление обмена данными после перезапуска при отключении всей системы по какой-либо причине [8, 25, 26].

Модель соединения по односкачковой радиосвязи предусматривает прямой обмен данными между узлами освещения и узлом-координатором. Модель соединения по многоскачковой радиосвязи предусматривает, что узел-координатор обменивается данными с узлами освещения вне зоны покрытия через узлы освещения в зоне покрытия. Соответственно, при работе беспроводной сенсорной сети по многоскачковой радиосвязи узлы освещения имеют совсем другое энергопотребление. Вот почему объём обмена данными индивидуален для каждого узла освещения. Так как узлы освещения, расположенные ближе к узлу-координатору, выполняют функции маршрутизаторов для удалённых узлов освещения, обмен данными в них проходит гораздо ин-

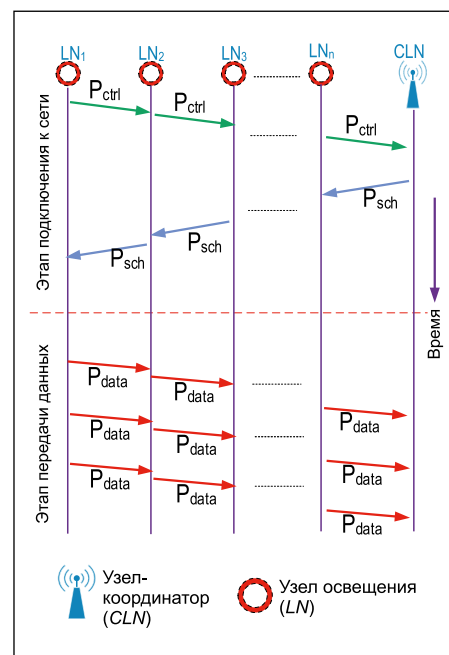


Рис. 3. Классический подход к созданию соединения внутри беспроводной сенсорной сети

тенсивнее, чем в остальных. Поэтому узлы освещения, расположенные ближе к узлу-координатору, потребляют больше энергии. При быстром истощении энергии в узлах освещения ближе к узлу-координатору связь в беспроводной сенсорной сети прерывается. Дальние узлы освещения, подключённые к таким узлам, отключаются от сети, даже если у них ещё есть запас энергии. Передача данных прерывается. В таких случаях лучше применять топологии, использующие энергию эффективно, для оптимальной реализации беспроводных сенсорных сетей. Но для систем дорожного освещения обязательным является использование линейной топологии. Поэтому решения для беспроводных сенсорных сетей в линейных системах дорожного освещения необходимо разрабатывать с учётом особенностей их работы [8].

2.1. Сетевое соединение через прокси

В беспроводных сенсорных сетях с многоскачковой радиосвязью узлы-датчики передают пакеты данных на узел-координатор через другие узлы. Узлы между входом и выходом выполняют свои задачи обнаружения и передают данные от других узлов следующему узлу. На рис. 3 отражён классический подход к созданию сетевого соединения.

В беспроводных сенсорных сетях применяется централизованный подход к распределению каналов и временных интервалов при классических сетевых сценариях. Как показано на рис. 3, вечером становится темнее, светильник отправляет запрос на подключение к сети (P_{ctrl}) при первоначальном включении питания. Получив этот запрос, соседний светильник передаёт его следующему в своём собственном временном интервале. Запрос на подключение к сети передаётся дальше до тех пор, пока не достигнет узла-координатора. Узел-координатор, принимающий запрос на соединение, выделяет под него каналы и временной интервал. Затем он создаёт пакет глобального расписания и пересылает его по маршруту, по которому поступил запрос. Пакет расписания, созданный узлом-координатором, передаётся конечному светильнику, который отправляет запросы через соседние светильники. Если конечный светильник находит свои данные в пакете расписания, он подключается к сети по собственному каналу и с собственным временным интервалом. После этого этап подключения к сети завершён. Соответствующий светильник начинает передавать данные. При использовании таких классических подходов велики временные и энергозатраты. По этой причине организация сети и повторное подключение отключённых от неё узлов энергозатратны и занимают больше времени [8, 27].

В данном исследовании рассматривается создание соединения внутри сети с помощью прокси с целью улучшить энергопотребление и повысить производительность по сравнению с классическим подходом. На рис. 4 отображено создание соединения с сетью с использованием прокси.

Рекомендованный способ подключения к сети через прокси вместо центральной системы с выделением каналов и временных интервалов подразумевает локальный подход. При линейной топологии узлы последовательно передают данные по общему каналу связи [28]. Сетевые узлы используют такой канал как систему с временным разделением. Когда узел пытается подключиться к сети, он отправляет запрос на соединение (P_{ctrl}) соседнему узлу, как показано на рис. 4. Когда соседний узел, подключённый к сети, получает запрос на подключение, то он делится информа-

цией о своём канале и временном интервале с этим узлом, разрешая ему присоединиться к сети при необходимости. На узел-координатор передаётся информация только об узле, который пытается присоединиться к сети. Таким образом, узлу, который пытается подключиться к сети, не требуется принимать пакет расписания (P_{sch}). При использовании этого метода значительно увеличивается скорость подключения узла к сети. Это уменьшает задержку при подключении к сети при сквозной передаче пакетов. Кроме того, пакет запроса (P_{ctrl}) не ретранслируется на другие узлы, снижая энергопотребление.

В данном исследовании суммарное энергопотребление узлов освещения в количестве n и одного узла-координатора в спящем режиме, в режиме прослушивания с низким энергопотреблением и при обмене пакетами были рассчитаны следующим образом [8]. Потребляемая мощность других компонентов сети не учитывается. Количество энергии, необходимое узлу для приёма пакета данных, рассчитывается как представлено ниже:

$$P_R = \frac{L_{pkt}}{R_{ch}} \cdot P_{Rx}, \quad (1)$$

где P_R – мощность, потребляемая при приёме каждого пакета данных, P_{Rx} – мощность, потребляемая приёмником, L_{pkt} – длина пакета в битах, а R_{ch} – значение ёмкости передачи данных (бит/с) канала передачи.

Расчёт энергии, которую любой из узлов освещения, пытающийся отправить данные, использует при передаче пакета, показан ниже:

$$P_T = \frac{L_{pkt}}{R_{ch}} \cdot P_{Tx}, \quad (2)$$

где P_T – это мощность, потребляемая при отправке каждого пакета данных, P_{Tx} – это мощность, затрачиваемая на передачу пакета данных, L_{pkt} – это длина пакета в битах, а R_{ch} – это значение ёмкости передачи данных (бит/с) канала передачи.

Общее количество энергии E_T , затраченное сетью с ($N_C = n + 1$) узлами, состоящими из количества узлов $LN\ n$ ($n > 2$) и, по крайней мере, одного узла-координатора CLN , рассчитывается, как показано ниже:

$$E_T = \sum_{n=1}^{N_C} \left\{ (P_R \cdot N_{Rpkt}) + (P_T \cdot N_{Tpkt}) + \left[P_{SM} + P_{LPL} \right] \right\}, \quad (3)$$

где N_{Rpkt} – количество пакетов, полученных узлами, N_{Tpkt} – количество пакетов, передаваемых узлом, P_{SM} – энергия, которую узел расходует в режиме ожидания, а P_{LPL} – количество энергии, которую узел расходует в режиме прослушивания с низким энергопотреблением.

Как видно на рис. 3, процесс подключения узла к сети при использовании классического подхода не заканчивается до тех пор, пока пакет синхронизации (P_{sch}), отправленный узлу-координатору CLN , не достигнет узла, отправившего запрос на подключение к сети. Если в сети есть по крайней мере два узла освещения LN или более, то данные передают другие узлы между запрашивающим узлом освещения LN и узлом-координатором CLN . Узлы освещения LN в состоянии передачи расходуют столько же энергии, сколько составляет ($P_R + P_T$), чтобы принять пакет, а затем передать его следующему узлу. Таким образом, при классическом подходе общее количество энергии, затраченной при подключении узла к сети, равно результату:

$$P_{classic} = N_C \cdot (P_R + P_T) = (n + 1) \cdot (P_R + P_T), \quad (4)$$

где $P_{classic}$ – это суммарное энергопотребление, затраченное узлом на подключение к сети при использовании классического подхода.

Аналогичным образом, в предлагаемом подходе к созданию сети на основе прокси-соединения (см. рис. 4) под-

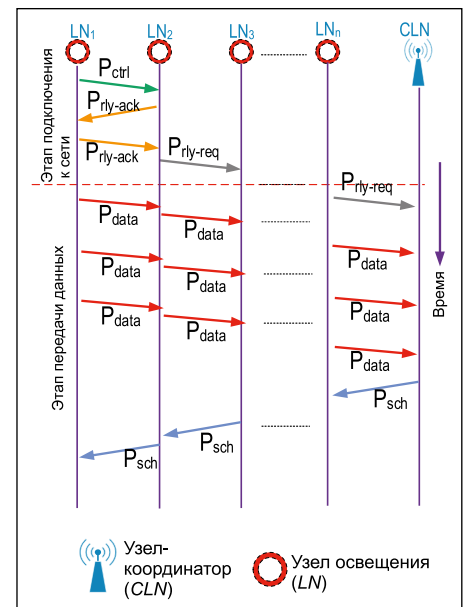


Рис. 4. Сетевое соединение через прокси

Значения энергопотребления для платформы *Nordic*

Пропускная способность, кГц	Скорость передачи данных, бит/с	Тип энергопотребления	Мощность, Вт
100	5,95E+05	P_{Tx}	0,0330
		P_{Rx}	0,0366
200	1,19E+06	P_{Tx}	0,0900
		P_{Rx}	0,0384
Нет сигнала		P_{Sp}	0,0003
		P_{LPL}	3,75E-05

Типы и размеры пакетов данных

Типа пакета	Длина (байт)
Пакет расписания (P_{sch})	Переменная
Контрольный пакет (запроса на подключение) (P_{ctrl})	32
Пакет ретрансляции (P_{rly})	52

ные, принадлежащие ему и соседним узлам. Если направление передачи направлено в сторону узла-координатора CLN , то передача идёт на узел $(n - 1)$, а если направление передачи направлено в обратную сторону от CLN , то она идёт на узел $(n + 1)$. В зоне покрытия каждого светильника есть два светильника: предыдущий и следующий. Схема рекомендованного метода временного разделения приведена на рис. 5.

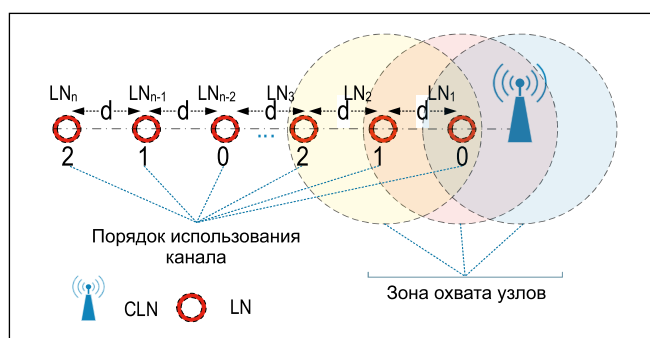
Как показано на рис. 5, метод временного разделения основан на последовательности использования канала узлом, согласованной с соседними узлами. При таком подходе используются два канала: канал управления и канал данных. Канал управления используется светильником для отправки соответствующих пакетов ($ctrl$, sch , $relay$) при запросе на подключение к сети. По мере приближения к узлу-координатору CLN обмен данными в канале увеличивается согласно свойству линейной топологии. В канале данных узлы освещения LN передают пакеты данных узлу-координатору CLN . Каждый узел передаёт как свои собственные данные, так и данные узлов нижнего порядка. Для этого канала используется предложенный метод временного разделения. Столкновения и заклинивание пакетов данных предотвращаются за счёт использования многоканальной структуры. На рис. 6 показаны временные слоты для узлов.

Каждый узел использует общий канал с соседними узлами в последовательности, указанной на рис. 6. Ниже представлено вычисление величины временного разделения [29]:

$$S_d = \left(\frac{T_p}{3} \right) \bmod (O_s, 3), \quad (7)$$

где T_p – период передачи пакета данных, S_d – временной слот узла, а O_s – порядок распределения каналов (0, 1, 2, ..., n).

Рис. 5. Схема рекомендованного метода временного разделения



ключение узла к сети происходит только за счёт обмена пакетом данных с соседним узлом, который присоединился к сети ранее. При первоначальном подключении нет необходимости ждать пакета расписания (P_{sch}), отправленного узлом-координатором CLN . За исключением соседнего узла освещения LN , другие узлы в сети, а также узел-координатор не расходуют энергию на этот процесс. Таким образом, при использовании рекомендованного подхода для подключения к сети через прокси общая энергия, затрачиваемая узлом на такое подключение, равна:

$$P_{proposed} = 3 \cdot (P_R + P_T). \quad (5)$$

Если размеры пакетов запроса на подключение (P_{ctrl}) и передачи (P_{rly}) постоянны (см. табл. 2), ясно, что количество энергии, затрачиваемое узлом на подключение к сети, не зависит от N_C и является постоянной величиной при использовании прокси согласно (5). Следовательно, количество энергии (P_j), затраченное на подключение к сети всеми узлами в структуре с количеством узлов n , соответствует классическому подходу $P_{jclassic} = n \cdot (n + 1) \cdot (P_R + P_T)$, в то время как рекомендованный подход

предусматривает прокси-соединение

$$P_{jproposed} = 3 \cdot n \cdot (P_R + P_T).$$

В результате, когда количество узлов в сети увеличивается, мощность, расходуемая при классическом подходе, растёт по экспоненте в зависимости от количества вовлечённых узлов, тогда как рекомендованный подход предусматривает линейный рост. Поскольку в сети всегда должны быть минимум два узла освещения LN и один узел-координатор CLN , сеть всегда будет $P_{jproposed} < P_{jclassic}$ ($n > 2$).

2.2. Новый метод временного разделения

При классическом подходе потери данных из-за столкновений пакетов происходят при одновременном использовании канала узлами освещения LN . Поэтому был предложен новый способ временного разделения для предотвращения одновременного доступа к каналу узлов освещения LN в зоне охвата других узлов при линейной топологии [29].

Предложенный метод временного разделения также реализован в канале связи, который узлы используют для передачи данных узлу-координатору CLN . При использовании данного метода узел на n -м уровне передаёт дан-

По мере подключения узлов освещения LN к сети определяется последовательность использования канала. Первому пользователю присваивается величина «0». Затем идут 1, 2, 3, ... n по порядку. Узлы освещения LN получают сведения о последовательности использования канала вместе с пакетами синхронизации при первом подключении к сети. При расчёте временных интервалов, как видно из (7), для равномерного распределения временных интервалов между узлами фиксированный период передачи пакета данных делится на 3, а порядок распределения канала умножается на режим работы беспроводной сети (3). Поскольку количество светильников увеличивается в соответствии с режимом использования канала (3), то оно периодически выдаёт результаты 0, 1 и 2. Поэтому светильник (LN) в беспроводной сенсорной сети не использует существующий канал одновременно с соседним светильником на протяжении всего периода работы. Это предотвращает столкновения пакетов и их заклинивание. Потерь данных нет.

3. Анализ параметров и результатов моделирования

При создании беспроводной сенсорной сети нет необходимости предварительно определять местоположение узлов датчиков. Однако в системах освещения расположение светильников известно точно. Для целей освещения используются различные протоколы для беспроводных сенсорных сетей для создания умной системы с дистанционным управлением [6, 21, 22, 30–33]. *Zigbee* и *GPRS* являются наиболее предпочтительным выбором при проведении исследований.

Zigbee повышает энергоэффективность, но обладает низкой пропускной способностью, поэтому его использования недостаточно, если требуется высокая скорость передачи данных. Наиболее распространённым протоколом после *Zigbee* является *GPRS* на основе *GSM*. Во многих исследованиях дистанционное управление в умных системах освещения реализовано с помощью *GPRS-GSM* [34–36].

Из-за неподходящей пропускной способности *Zigbee*, а также по причине высокого энергопотребления протоколов беспроводных сенсорных сетей

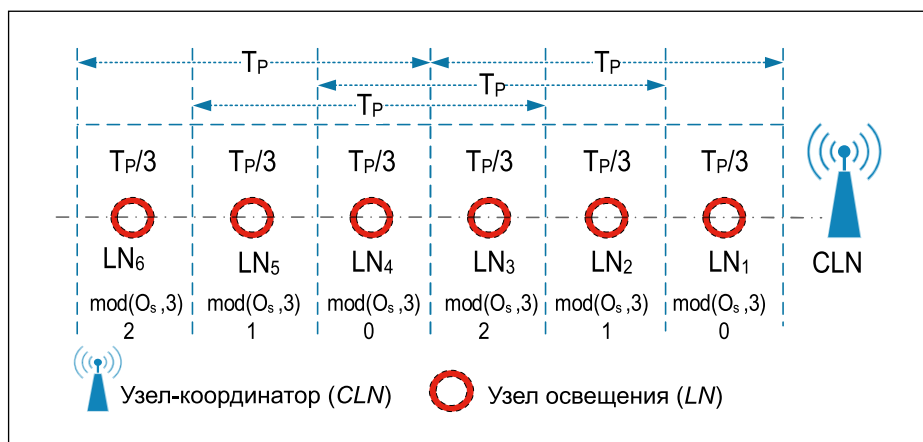


Рис. 6. Временные слоты для узлов

на основе *GPRS-GSM* в настоящем исследовании предпочтение отдаётся однопроцессорному трансиверу *nRF905* [37] с частотой 433/868/915 МГц, который является более современным устройством, прост в использовании и имеет очень низкое энергопотребление при обмене данными. Таким образом, в системе освещения для беспроводной сенсорной сети использовался *nRF905*.

Исследование проводилось для систем с 50, 100, 150 и 200 опорами дорожного освещения с линейной топологией. Моделирование было выбрано с целью более глубокого анализа параметров. Физическая реализация беспроводной сенсорной сети требует временных и трудозатрат. В этом случае от моделирования ожидаются реалистичные результаты.

Разработанная беспроводная сенсорная сеть была смоделирована в симуляторе *Riverbed Modeler*. *Riverbed Modeler* – это программное обеспечение для сетевого моделирования любых сетевых проектов [38]. Симулятор позволяет смоделировать мониторинг поведения сети, анализ производительности, провести тестирование её эффективности. При проектировании поведения модели используется программный язык *ProtoC* на основе *C*.

В *Riverbed Modeler* можно осуществлять дискретное моделирование событий для анализа разработанной сетевой модели [10, 23, 38–40].

В данном исследовании два типа узлов были разработаны в симуляторе:

узел-координатор для центрального административного пункта и узел освещения для светильников. Топологическое распределение системы освещения создавалось под линейную топологию для дорог и тоннелей. Смоделированная линейная топология системы освещения представлена на рис. 7.

Энергопотребление радиоузлов *Nordic*, используемых в моделях, указано в табл. 1 [8, 37].

Одним из параметров, влияющих на энергопотребление, является размер пакетов данных при обмене внутри беспроводной сенсорной сети. Таким образом, в беспроводных сенсорных сетях, разработанных в рамках данного исследования, используются три различных типа пакетов для подключения к сети и обеспечения её бесперебойной работы. Типы и размеры пакетов указаны в табл. 2. Размеры пакетов данных варьируются в зависимости от типа пересылаемых данных.

Узел-координатор отправляет пакет расписания для передачи информации о канале, выделенном для узла освещения. Контрольные пакеты предназначены для непосредственного соединения узлов освещения в сеть и обеспечения её непрерывной работы. Узлы освещения также используют пакеты ретрансляции для подключения к сети через другие узлы.

В рамках данного исследования были разработаны четыре различных сценария, параметры моделирования указаны в табл. 3.

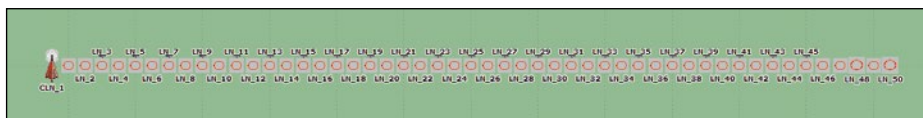


Рис. 7. Смоделированная линейная топология системы освещения

Параметры моделирования для сценариев

Сценарий/ кол-во узлов освещения, шт.	Зона охвата сети, м	Расстояние между узлами, м	Кол-во узлов- координаторов, шт.	Общая протяжённость сети, км
S50/50	120	25	1	1,25
S100/100	120	25	1	2,5
S150/150	120	25	1	3,75
S200/200	120	25	1	5

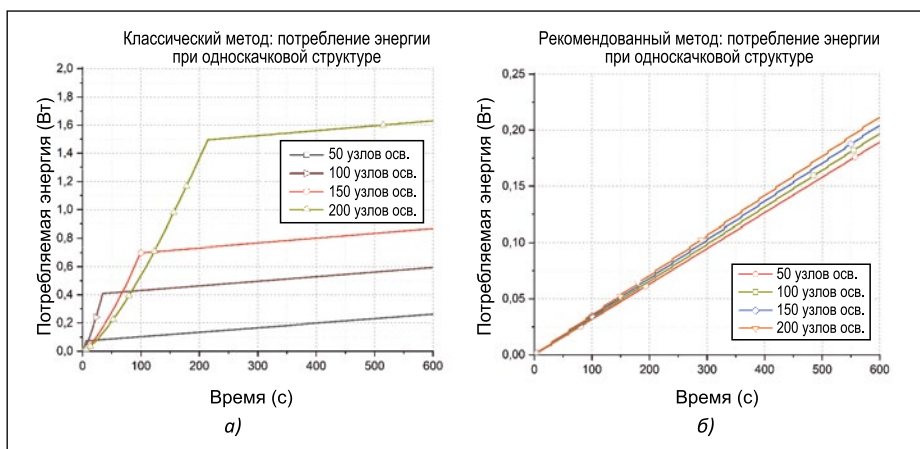


Рис. 8. Сравнение общего энергопотребления узла-координатора при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для односкачковой структуры

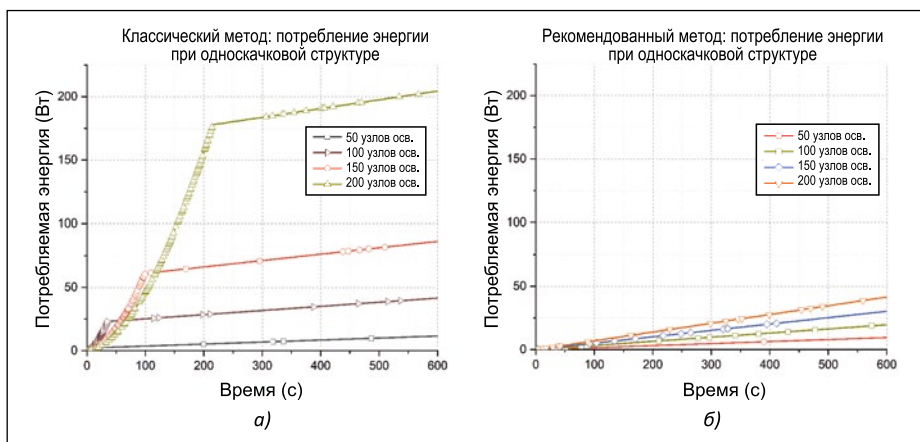


Рис. 9. Сравнение общего энергопотребления узлов освещения при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для односкачковой структуры

Для сценариев моделирования количество узлов освещения (LN) в беспроводной сенсорной сети (WSN) составляет 50, 100, 150 и 200 светильников, соответственно. Таким образом, наблюдается эффект увеличения количества узлов при линейной топологии.

Зона охвата световых датчиков составляет 120 м для формирования односкачковой структуры. В этом случае светильник в линейной сети взаимодействует только с двумя соседними светильниками.

4. Обсуждение результатов

Во всех сценариях, смоделированных в данном исследовании, использовался один узел-координатор. В ходе моделирования энергопотребление узлов освещения было исследовано в рамках сценариев с одно- и многоскачковой связью. Проведено сравнение сетей, созданных с использованием классических подходов и подходов, предлагаемых в данном исследовании.

Во-первых, на рис. 8 показано сравнение общего энергопотребления при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для односкачковой структуры с узлом-координатором как показано на рис. 8. При использовании классического подхода внезапная потребность в энергии возникает в момент подключения к сети. Энергия, потребляемая узлом-координатором в системе, состоящей из 200 светильников, где большая часть энергии потребляется в первый момент, составляет 1,5 Вт при подключении к сети всех узлов освещения. При использовании рекомендованного подхода в той же ситуации узел-координатор потребляет 0,0116 Вт. Преимущество при подключении всех узлов освещения сети достигает 99,23 %. Это объясняется следующим образом: при использовании классического подхода узлы освещения создают тяжёлый пакетный трафик при первоначальном подключении к сети. Узел-координатор обрабатывает каждый полученный запрос на соединение и отвечает на него, тем самым расходуя много энергии. Поскольку рекомендованный подход предусматривает прокси-соединение, процесс подключения выполняется не узлом-координатором, а непосредственно узлом освещения. Это снижает нагрузку на узел-координатор, уменьшая энергопотребление на этапе подключения узлов освещения. Для других сценариев характерна ситуация, описанная на рис. 8. При аналогичном подходе суммарное энергопотребление узлов освещения при одном скачке представлено на рис. 9. Видно, что при использовании классического подхода узлы освещения создают интенсивный пакетный трафик при первоначальном подключении к сети. В эксперименте с 200 узлами освещения (наиболее сложный сценарий) их энергопотребление достигло 175 Вт, а энергопотребление при использовании рекомендованного подхода составило 0,235 Вт. Достигнутое преимущество – 99,86 %.

На рис. 10 (а) показано количество энергии, расходуемой узлом-координатором во время смоделированной работы сети с 50, 100, 150 и 200 узлами освещения при использовании классического подхода с трехскачковой радиосвязью. В сценарии с 200 узлами освещения (наиболее

сложном сценарии при использовании классического подхода) процесс подключения всех узлов к сети занимает 225 с. В этот момент энергопотребление узла-координатора составило 0,552 Вт. При использовании рекомендованного подхода, как показано на рис. 10 (б), энергопотребление узла-координатора достигло всего 0,0086 Вт при наиболее сложном сценарии с одновременным подключением 200 узлов освещения. Соответственно, предлагаемый подход даёт преимущество в 98,35 % на этапе сетевого подключения узлов освещения по сравнению с классическим подходом.

Аналогично на рис. 11 показано сравнение общего энергопотребления узлов освещения при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для трёхскачковой структуры. При анализе работы сети с 200 узлами освещения (наиболее сложный сценарий при использовании классического подхода с трёхскачковой радиосвязью) выяснилось, что энергопотребление, необходимое для полноценного подключения к сети всех узлов освещения, составляет 39 Вт. Если использовать предлагаемый в данном исследовании подход, то энергопотребление не превышает 0,387 Вт при том же сценарии. В этом случае предлагаемый подход даёт преимущество в 99 %.

Для того чтобы оценить разницу в энергопотреблении для различных сценариев сети используя классический и рекомендованный в настоящем исследовании подходы, были построены графики.

На рис. 12 показано сравнение суммарного энергопотребления всех узлов освещения (кроме узла-координатора) при подключении к сети с одно-, двух- или трёхскачковой структурой с точки зрения использования классического и рекомендованного подходов. В данном исследовании было отмечено, что при использовании классического метода энергопотребление гораздо выше. Суммарное энергопотребление и экономия ресурсов по результатам моделирования работы сети с 200 узлами освещения (наиболее сложный сценарий) с одно-, двух или трёхскачковой структурой отражены в табл. 4.

На рис. 13 приводится сравнение энергопотребления узла-координатора во время работы в сети с одно-,

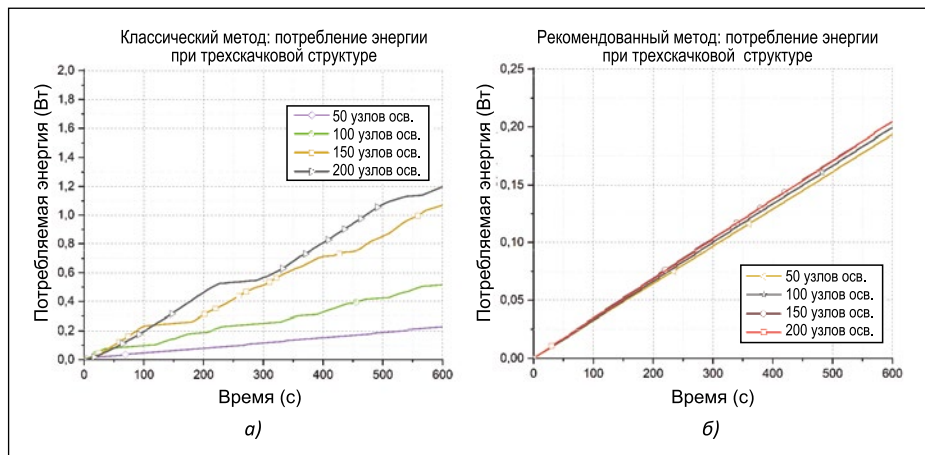


Рис. 10. Сравнение общего энергопотребления узла-координатора при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для трёхскачковой структуры

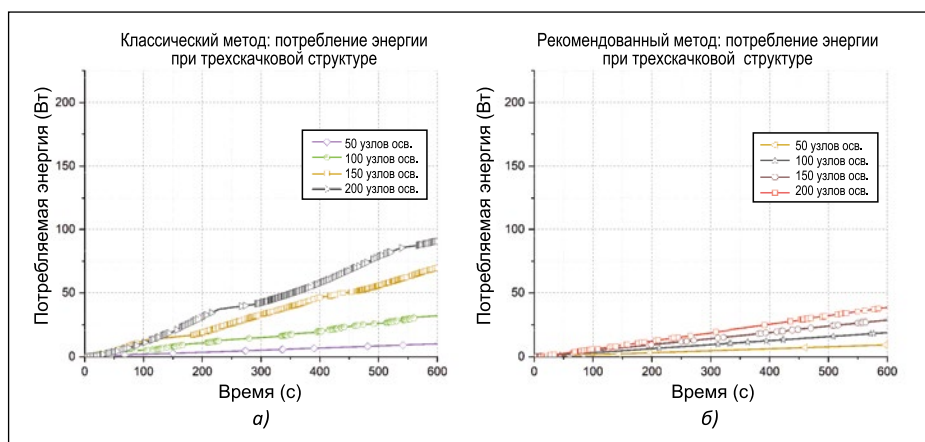
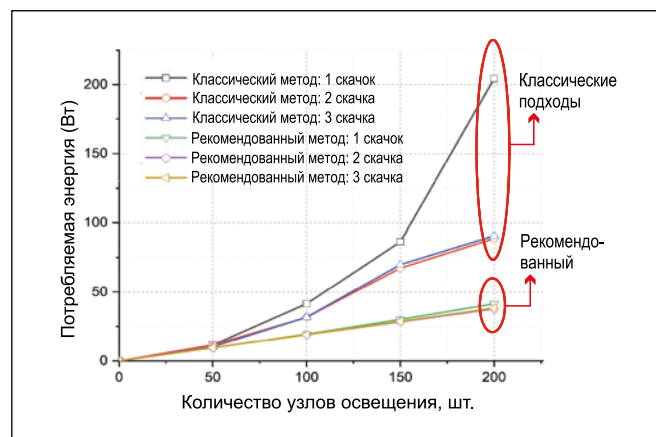


Рис. 11. Сравнение общего энергопотребления узлов освещения при использовании классического (а) и рекомендованного (б) подходов для трёхскачковой структуры

Рис. 12. Сравнение суммарного энергопотребления узлов освещения



двух или трёхскачковой структурой при использовании классического и рекомендуемого подходов. Во всех сценариях с 50, 100, 150 и 200 узлами освещения очевидно, что рекомендуемый метод намного эффективнее с точки зрения общего энергопотребления. Сравнение энергопотребления и экономии ресурсов для сценария линейной топологии с 200 столбами приводится в табл. 5.

В табл. 6 показано общее энергопотребление узла-координатора и 200 узлов освещения по количеству скачков при моделировании работы 200 узлов освещения, то есть при наиболее сложном сценарии. При сравнении классического и рекомендуемого подходов отмечается экономия ресурсов на уровне около 80 %, особенно для сетей с односкачковой структурой.

Общее энергопотребление узлов освещения по количеству скачков при моделировании работы 200 узлов освещения

	Один скачок	Два скачка	Три скачка
Классический (Вт)	205,92	89,71	91,81
Рекомендованный (Вт)	41,63	37,59	38,57
Преимущество (%)	~80	~58	~58

Таблица 4

освещения растёт максимальное количество скачков в системе. Каждый скачок означает дополнительную передачу пакета данных и её повтор, следовательно, расходуется больше энергии.

Рекомендуемый в настоящем исследовании подход к реализации беспроводной сенсорной сети с линейной топологией работает лучше, чем классический подход. Количество узлов освещения увеличивается, пакетный трафик в тех из них, которые расположены ближе к узлу-координатору, также растёт, однако столкновений пакетов данных не наблюдается. Сквозная задержка, один из наиболее важных параметров производительности при линейных топологиях, осталась на приемлемом уровне даже при увеличении количества узлов освещения. Все сценарии в настоящем исследовании предусматривают использование одного узла-координатора и разработаны для оптимальной производительности беспроводной сенсорной сети в заданных условиях. С другой стороны, по мере увеличения количества узлов-координаторов наблюдается более быстрое подключение узлов освещения к сети, а также уменьшение сквозной задержки. В данном исследовании в отношении всех узлов освещения в беспроводной сенсорной сети использовался рекомендуемый метод временного разделения для передачи данных и управления ею.

Общее энергопотребление узла-координатора по количеству скачков при моделировании работы 200 узлов освещения

	Один скачок	Два скачка	Три скачка
Классический (Вт)	1,63	1,08	1,20
Рекомендованный (Вт)	0,211	0,200	0,205
Преимущество (%)	~87	~81	~83

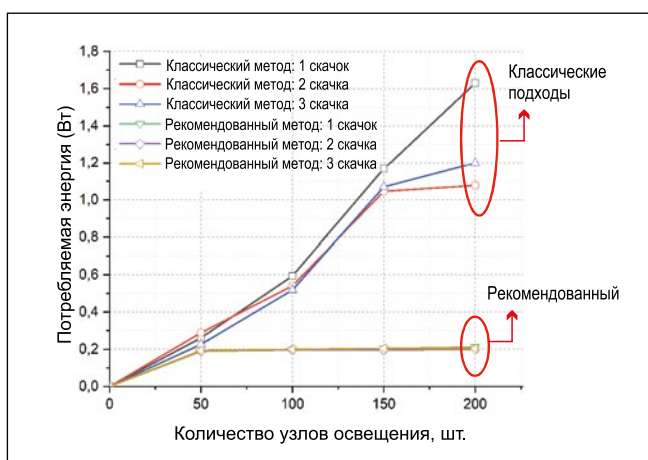
Таблица 5

Общее энергопотребление узла-координатора и 200 узлов освещения по количеству скачков при моделировании работы 200 узлов освещения

	Один скачок	Два скачка	Три скачка
Классический (Вт)	207,55	90,79	93,010
Рекомендованный (Вт)	41,841	37,79	38,775
Преимущество (%)	~80	~58	~58

Таблица 6

Рис. 13. Сравнение энергопотребления узла-координатора



5. Заключение

При использовании классического подхода во время первого подключения к сети узлов освещения расходуется больше энергии. Это связано с частым обращением к пакетам расписания, запроса на подключение, контроля и ретрансляции при первом включении системы. При использовании рекомендуемого метода сеть создаётся на основе прокси-соединения, что исключает возникновение выше-

помянутой ситуации. Рекомендуемый подход даёт преимущество в 98,23 % при использовании односкачковой структуры. Таким образом, на этапе подключения к сети, когда расходуется больше всего энергии, обеспечивается минимальное энергопотребление.

Рост общего энергопотребления особенно заметен при линейных сценариях. Основная причина такого скачка энергопотребления связана с увеличением количества светильников. С увеличением количества узлов

При моделировании было отмечено, что по мере увеличения количества узлов освещения при использовании классического подхода увеличивается продолжительность времени, в течение которого узлы активны в сети. Кроме того, в тех же сценариях с 50, 100, 150 и 200 узлами освещения время подключения узлов к сети увеличивается параболически (5, 18, 99 и 210 с соответственно). В беспроводных сенсорных сетях с большим количеством узлов такие периоды ещё дольше. Однако благодаря методу создания сети на основе прокси-соединения, предложенному в этом исследовании, отмечено, что такие периоды сокращаются до очень низких приемлемых значений (0,3, 0,89, 1,53 и 2,4 с). Кроме того, предложенные подходы обеспечивают более быстрое развёртывание сети. В случае возможного обрыва соединения сеть автоматически реорганизуется.

В результате, разработка методов реализации беспроводных сенсорных

сетей для систем освещения с акцентом на энергосбережение и быстродействие является обязательной с точки зрения производительности сети и эффективности её функционирования. Благодаря рекомендуемым настоящим исследованием решениям энергопотребление сократилось на 80 % и 58 % в зависимости от различных сценариев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dong P. Application of intelligent lighting control system in different sports events in sports venues. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 165–171.
2. Cheng R. Classroom Lighting Energy-Saving Control System Based on Machine Vision Technology. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 143–149.
3. Sun E. Solar Photovoltaic Power Generation Wireless Monitoring System Based on IOT Technology. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 130–136.
4. Sanaz Bozorg Chenani, Rami-Samuli Rasanen, Eino Tetri. Advancement in Road Lighting. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #2, pp. 99–109.
5. Iacomussi P., Rossi G., Soardo P. Energy saving and environmental compatibility in road lighting. // *Light & Engineering*, 2012. V20, #4, pp. 55–63.
6. Hao L., Gao J. Intelligent Lighting System of Urban Road Based on Internet of Things. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 150–156.
7. Cao S. Intelligent Lighting Control System in Large-Scale Sports Competition Venues. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 172–182.
8. Çibuk M., Cengiz M.S. Determination of Energy Consumption According To Wireless Network Topologies In Grid-Free Lighting Systems. // *Light & Engineering*, 2020. V28, #2, pp. 67–76.
9. Zou Q. Lighting and Control Design of Large-Scale Stadium Skating Competition. // *Light & Engineering*, 2018. V26, #4, pp. 183–190.
10. Ari D., Çibuk M., Ağgün F. Effect of Relay-Priority Mechanism on Multi-hop Wireless Sensor Networks. // *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 2017. V7, #2, pp. 145–153.
11. Çibuk M. A New Fast Network Joining Algorithm for Single-Hop Wireless Sensor Networks. // *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2018. V7, #1, pp. 72–83.
12. Shrestha A., Xing L. A performance comparison of different topologies for wireless sensor networks // in 2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security: Enhancing Critical Infrastructure Dependability, 2007. pp. 280–285.
13. Mamun Q. A Qualitative Comparison of Different Logical Topologies for Wireless Sensor Networks. Sensors, // *Light & Engineering*, 2012. V12, #11, pp. 14887–14913.
14. Efe S. B. UPFC Based Real-Time Optimization of Power Systems for Dynamic Voltage Regulation. // *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2018. V116, #3, pp. 391–406.

15. Efe S. B., Cebeci M. Power Flow Analysis by Artificial Neural Network. // *International Journal of Energy and Power Engineering*, 2013. V2, #6, pp. 204–208.
16. Cengiz M.S. Simulation And Design Study For Interior Zone Luminance In Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #2, pp. 42–51.
17. Yetgin H., Cheung K.T.K. El-Hajjar, M., Hanzo, L., A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks. // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017. V19, #2, pp. 828–854.
18. Cengiz M. S., Cengiz C. Numerical Analysis of Maintenance Factor for Tunnel and Road In Solid State Lighting, // in International GAP Renewable Energy and Energy Efficiency Congress, 2018. pp. 347–348.
19. Cengiz M. S., Cengiz C. Numerical Analysis of Tunnel LED Lighting Maintenance Factor. // *IJUM Engineering Journal*, 2018. V19, #2, pp. 154–163.
20. Cengiz M.S. The Relationship between Maintenance Factor and Lighting Level in Tunnel Lighting. // *Light & Engineering*, 2019. V27, #3, pp. 75–88.
21. Peixoto J. P. J., Costa D.G. Wireless visual sensor networks for smart city applications: A relevance-based approach for multiple sinks mobility. // *Future Generation Computer Systems*, 2017. V76, pp. 51–62.
22. Karun R., Johnny M. Street Light Commander System Using Zigbee Network of Devices. // *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2014. V4, #4, pp. 165–169.
23. Çibuk M., Ari D., Ağgün F., Relay Mechanism with Three-way Handshake for Wireless Sensor Networks, // in International Advanced Technologies Symposium (IATS17), 2017. pp. 3459–3466.
24. Bathla M., Sharma N. Topology Control in Wireless Sensor Networks. // *International Journal of Advances in Computer Networks and its Security*, 2009. pp. 161–164.
25. Varshney S., Kumar C., Swaroop A. Linear Sensor Networks: Applications, Issues and Major Research Trends, // in International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA2015), 2015. pp. 446–451.
26. Chen Q., Wang K., Ying K., Miao C., Dai G. An Energy Efficient MAC Protocol for Linear WSNs. // *Chinese Journal of Electronics*, 2015. V24, #4, pp. 725–728.
27. Çibuk M., Ari D., Çınar H. A New Multi-Channel Algorithm Of Join The Network For Single Hop Multi-Node Sensor Networks, in International Engineering, Science and Education Conference – // IN-ESEC2016, 2016. #December, pp. 1–3.
28. Ari D., Çibuk M., Ağgün F. A New Proxy-Based Network Joining Method for Linear Wireless Sensor Networks, // in International Engineering and Natural Sciences Conference (IENSC2018), 2018. pp. 715–723.
29. Ari D., Çibuk M., Ağgün F. Doğrusal Kabloşuz Algılayıcı Ağlar için Yeni Bir Zaman Dilimleme Metodu, // in 1st International Engineering and Technology Symposium, 2018. pp. 1166–1170.
30. Srinath V., Srinivas S. Street Light Automation Controller using Zigbee Network and Sensor

with Accident Alert System. // *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2015. V5, #4, pp. 2819–2823.

31. Bhargavi R., Busupalli P. Development of Automatic Street Light Illumination and Vehicle Speed Controlling System on Arm7 for Roadways. // *International Journal of Research in Advanced Engineering Technologies*, 2016. V5, #3, pp. 16–22.

32. Gomez C., Paradells J. Wireless Home Automation Networks- A Survey of Architectures and Technologies.pdf. // *CONSUMER COMMUNICATIONS AND NETWORKING*, 2010. #June, pp. 92–101.

33. Radmand P., Talevski A., Petersen S., Carlsen S. Comparison of industrial WSN standards. 4th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies – // Conference Proceedings of IEEE-DEST 2010, DEST 2010, 2010. pp. 632–637.

34. Caponetto R., Dongola G., Fortuna L., Riscica N., Zufacchi D. Power consumption reduction in a remote controlled street lighting system, in SPEED-AM 2008 – // International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2008. pp. 428–433.

35. Dingfang L., Suiping Q., Tundong L., Shouzhi Y., Funchun S. The design and realization of communication technology for street lamps control system. // *Proceedings of 2009 4th International Conference on Computer Science and Education, ICCSE2009*, 2009. pp. 259–262.

36. Nasirudin M. A., Za'bah U. N., Sidek O. Fresh water real-time monitoring system based on Wireless Sensor Network and GSM. // *Open Systems (ICOS)*, 2011 IEEE Conference on, 2011. pp. 354–357.

37. Nordic Semiconductor, nRF905 Single chip 433/868/915MHz Transceiver, 2008.

38. Riverbed, OPNET Technologies – Network Simulator, 2018. <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/opnet.html> (accessed May 02, 2018).

39. Vançin S., Erdem E. Design and simulation of advance MODLEACH for wireless sensor network, // *International Journal of Computer Networks and Applications (IJCA)*, 2015. V2, #3, pp. 135–143.

40. Cengiz M. S., Cengiz Ç. IOT and Lighting Automation, // *International Conference on Multidisciplinary, Engineering, Science, Education and Technology (IMESSET'17 Baku)* Book of Abstracts, 12–14 July 2017, Baku, pp. 8.



Муса Чибук (Musa Çibuk), M. Sc., Ph.D.
Окончил Университет Фырат, Турция в 2002 г. С 2000 по 2010 год работал в Университете Фырат, а в настоящее время занимает должность декана

факультета компьютерной инженерии в Университете Битлис Эрен. Область научных интересов – беспроводные сенсорные сети, MAC-протоколы, компьютерные сети, цифровая связь и обработка изображений