

Сравнение энергопотребления имеющих разную топологию беспроводных сенсорных сетей осветительных установок¹

М. ЦИБУК, М.С. СЕНГИЗ

Университет Битлис Ерен, Битлис, Турция
E-mails: mcibuk@beu.edu.tr, msaitcengiz@gmail.com

Аннотация

Беспроводные сенсорные сети (БСС) в настоящее время используются во многих областях, в частности, в системах дистанционного управления, особенно освещением главных улиц и дорог и в связанных с ними автономных объектов.

Целью данного исследования являлось определение количества энергии, потребляемой БСС, обеспечивающей работу системы мониторинга и управления в случае автономных осветительных установок, питаемых возобновляемыми источниками энергии. При этом была поставлена задача максимизации срока службы БСС, что достигается посредством уменьшения энергопотребления автономного оборудования. Рассмотрение различных реальных топологий БСС осветительных установок позволило продемонстрировать различия в затратах, рабочей силе и времени. Имеющие различные топологии БСС автономных осветительных установок были смоделированы и проанализированы с целью получения оптимального решения. Энергопотребление БСС с линейной, произвольной и древовидной топологиями было определено для режима обмена данными. В рамках каждой из топологий были смоделированы включающие в себя 25, 50, 100 и 200 светильников осветительные установки, для каждой из которых было определено энергопотребление БСС при работе в режиме обмена данными. Показано, что на энергопотребление влияет в первую очередь количество скачков между узлами и что наибольшее потребление энергии имеет место в случае БСС с линейной топологией, а наименьшее – в случае БСС с древовидной топологией.

Ключевые слова: осветительная установка, беспроводные сенсорные

сети, топология сети, автономные осветительные установки.

1. Введение

В настоящее время приходящаяся на освещение часть полного энергопотребления увеличивается день ото дня. Для реализации экологичного и непрерывного освещения нужны интеллектуальные осветительные установки (ОУ), в которых часто используются беспроводные сенсорные сети (БСС), обеспечивающие возможность автоматизации и дистанционного контроля и управления. Классическая БСС состоит из узлов, распределённых случайным образом или в соответствии с планом и имеющих малую пропускную способность.

В данной работе применительно к имеющим разные топологии БСС рассмотрено количество энергии, потребляемой при обмене между узлами информацией, необходимой для работы ОУ. Сравнение потребляемой разными топологиями энергии было проведено применительно к дорожному освещению, и на основе полученных результатов были выработаны рекомендации относительно оптимальной топологии. В рассматриваемой в данной работе системе дистанционного контроля и управления в узлах осветительной установки (УОУ) регистрируются и сохраняются в памяти, а затем передаются на центральный узел осветительной установки (ЦУОУ) различные параметры, такие как создаваемая светильниками освещённость, уменьшение светового потока по сравнению с первым днём работы ОУ, наличие тумана, уровень влажности, температура воздуха, включение и выключение светильника, угловое расположение светильника относительно земли. Обмен данными между узлами сопровождается потреблением энергии, зависящим как от используемых устройств, так и от топологии

сети. Для обеспечения связи между узлами и минимизации расходуемой на передачу данных энергии в работе была предпринята попытка выявления оптимальной топологии, которая привела бы к увеличению энергоэффективности.

2. Беспроводные сенсорные сети для осветительных установок

Сенсорные узлы в общем случае могут быть распределены по освещаемому участку произвольным образом или упорядоченно по отношению к рассматриваемому месту. При формировании БСС нет необходимости в предварительном определении местоположений сенсорных узлов [1–4].

В многочисленных исследованиях освещения были рассмотрены различные БСС, предназначенные для дистанционного управления интеллектуальными системами освещения. В исследованиях, проведённых применительно к освещению, обычно рассматривались системы на основе технологий *Zigbee* или *GPRS* с заметным преобладанием технологии *Zigbee*. Так, в [5] была предложена основанная на *Zigbee* интеллектуальная система управления освещением главной улицы. Эта система была предназначена для управления ОУ без вмешательства людей. В [6] была предложена также основанная на *Zigbee* система управления уличным освещением, в которой использовались сеть и датчики, предназначенные, в частности, для предотвращения дорожных происшествий. В этом исследовании, направленном на уменьшение потребления электроэнергии, измерительные станции, расположенные на главной улице, через определённые промежутки времени измеряли уровень естественного освещения и степень дорожной активности. В работе [7], целью которой было увеличение энергоэффективности ОУ с основанным на *Zigbee* дистанционным управлением, рассматривалась расходуемая на управление энергия. В [8] была предложена система дистанционного управления, обеспечившая уменьшение энергии, потребляемой ОУ, до 60 %. В этой системе управление осуществлялось при помощи микроконтроллера и технологии *Zigbee*. При этом подчёркивалось, что использование *GPRS-GSM* привело бы к уменьшению затрат,

¹ Перевод с англ. Е.И. Розовского

Сравнение ZigBee, GPRS-GSM и nRF905

	Частота, МГц	Модуляция	Топология	Энергопотребление	Скорость передачи данных	Радиус зоны покрытия, м	Многоканальность
ZigBee	868/915/2400	BPSK, OQPSK	Звезда, P2P, сеть	Низкое	250 кбит/с	10–100	Нет
nRF905	433/868 / 915	GFSK	–	Очень низкое	250 кбит/с, 1 Мбит/с, 2 Мбит/с	250	Да
GPRS-GSM	850/900/1800/1900	GMSK	P2P, P2M	Высокое	56–114 кбит/с	1000+	Нет

и отмечалось, что для увеличения энергоэффективности управляемых дистанционно интеллектуальных систем дорожного освещения правильнее было бы использовать сочетание технологий Zigbee и GPRS-GSM.

Хотя использование в этих исследованиях технологии Zigbee и привело к увеличению энергоэффективности, присущая этой технологии низкая пропускная способность передачи данных препятствует её применению в случае требующей высокой скорости передачи данных работы в реальном масштабе времени. Например, хотя технология Zigbee и обеспечивает удовлетворительную передачу данных в системе, включающей в себя 25 светильников, она не подходит для передачи данных в случае протяжённых ОУ с гораздо большим количеством УОУ. Так как при большом потоке данных для связи между УОУ и ЦУОУ требуется гораздо больше энергии, то питающие светильники аккумуляторы разряжаются быстрее, вследствие чего эти светильники выпадают из состава ОУ. Применительно к дистанционному управлению освещением на втором по распространённости месте после Zigbee стоит технология GPRS-GSM, и в литературе часто предлагается использовать в интеллектуальных ОУ дистанционное управление на основе именно GPRS-GSM [9–12].

Из-за присущей технологиям Zigbee и GPRS-GSM низкой скорости передачи данных и других недостатков, таких как высокие затраты на инфраструктуру, в основу данного исследования был положен приёмопередатчик nRF905, характеризующийся более низкой стоимостью, распространённостью, простотой в эксплуатации и очень низким энергопотреблением при обмене данными [13]. Сравнение Zigbee, GPRS-GSM и nRF905 проведено в табл. 1.

3. Связь между беспроводными сенсорными сетями и коэффициентом эксплуатации

В настоящее время для интеллектуального освещения нужны автоматизированные системы, обеспечивающие бесперебойное освещение и меньше нуждающиеся в техническом обслуживании. Основная задача использования БСС в ОУ состоит в том, чтобы создать структуру, которая обеспечивала бы увеличение комфорта зрительного восприятия, меньше бы нуждалась в техническом обслуживании и могла бы управляться дистанционно или автоматически. И если говорить о питаемых возобновляемыми источниками энергии автономных электрических установках, то для автоматизации их работы в них необходимо использовать БСС, характеризующиеся низким энергопотреблением. В ОУ, подверженных воздействию различных неблагоприятных условий, коэффициент эксплуатации уменьшается, а энергопотребление увеличивается. Коэффициент эксплуатации ламп, коэффициент сохранения светового потока ламп, коэффициент выживаемости ламп и коэффициент эксплуатации светильника определяются совместным влиянием нескольких параметров на уменьшение светового потока источников света и ухудшение характеристик оптической системы [14–27]. В нормальных условиях БСС и автоматизация не влияют на коэффициент эксплуатации. Однако если управление освещением осуществляется в рамках программы умный город или автоматической системы управления, когда недостатки БСС сказываются и на коэффициенте эксплуатации, то имеют место дополнительное уменьшение коэффициента эксплуатации и, как следствие, увеличение энергопотребления. Другими словами, уменьшение коэффициента эксплуатации приводит к уменьшению

эффективности ОУ и увеличению расходов на освещение. (Как следует из формулы (1), при расчёте освещённости E коэффициент эксплуатации MF выступает в качестве множителя [16, 21, 26–29]):

$$E = \frac{I \cdot \varepsilon \cdot \Phi \cdot MF}{h^2}, \quad (1)$$

где I – приведённая сила света, кд/кلم; Φ – световой поток, клм; h – высота расположения светильника относительно уровня земли, м; ε – угол между направлением падения излучаемого светильником света и нормалью к поверхности земли.)

4. Использование беспроводных сенсорных сетей в осветительных установках

БСС состоит из сенсорных узлов, распределённых по участку случайным образом или в соответствии с планом и имеющих малую пропускную способность. Одними из основных факторов, влияющих на формирование БСС, являются присущие сенсорным узлам энергетические ограничения и сложность замены аккумуляторов. Помимо необходимости обеспечивать удовлетворение требований конкретной области применения, большое значение имеет и обеспечение энергоэффективности. Энергия потребляется главным образом во время обмена данными. Прикладные разработки и исследования в области управления доступом к сети, призванные минимизировать энергопотребление при обмене данными, описаны в [1, 2, 30, 31]. Хотя целью этих работ являлось обеспечение исключительного совпадения доступа, они были направлены также и на достижение максимальной эффективности передачи данных.

Другим важным критерием построения БСС является топология сети. Топология сети описывает связи меж-

ду узлами. Базовая логическая схема построения БСС связана с осуществляемой тем или иным способом передачей данных, собранных в узлах сети, в центральный узел. В принципе, варианты связи между узлами можно разделить на две группы: односкачковые и многоскачковые (рис. 1). В случае ОУ узлами осветительной установки (*Lighting Nodes*), которые обозначаются как УОУ, являются светильники, а центральные узлы осветительной установки (*Coordinator Lighting Nodes*), которые обеспечивают управление ОУ и сбор данных, обозначаются как ЦУОУ.

В односкачковой схеме УОУ связаны с ЦУОУ непосредственно, тогда как при многоскачковой схеме ЦУОУ связан с УОУ, находящимися в его зоне покрытия, через другие расположенные в этой зоне УОУ. Поэтому по мере приближения к ЦУОУ поток данных, передаваемых УОУ, увеличивается. А так как энергопотребление пропорционально потоку данных, то оно также увеличивается. Рассматриваемые здесь УОУ не подключены к сети энергоснабжения и питаются от аккумуляторов, так что вследствие интенсивного обмена данными они быстро расходуют всю свою энергию и выпадают из сети.

В многоскачковых БСС через разные УОУ проходит разное количество данных, так что они потребляют разное количество энергии. А так как УОУ, расположенные близко к ЦУОУ, осуществляют связь с дальними УОУ, то количество проходящих через них

Рис. 1. Варианты соединения в БСС:
а – односкачковая сеть;
б – многоскачковая сеть

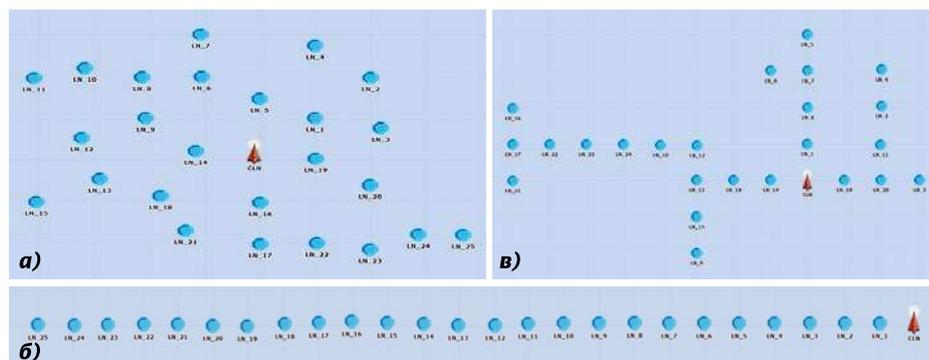
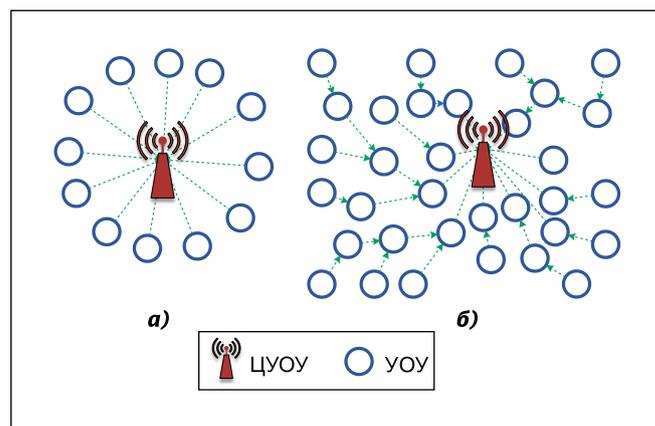


Рис. 2. Топологии ОУ: а – произвольная; б – линейная; в-древовидная (обозначения: LN = УОУ, CLN = ЦУОУ)

данных отличается от количества данных, проходящих через другие УОУ, и они потребляют больше энергии. И после того, как энергия тех УОУ, которые расположены около ЦУОУ, будет быстро израсходована, связь этих УОУ с БСС прекращается. При этом дальние УОУ, которые соединены с этим УОУ, также выпадают из сети, хотя их энергия остаётся

неизрасходованной. А это означает, что обмен данными прекращается. В подобных случаях для обеспечения оптимального использования БСС предпочтительными являются метод и топология, обеспечивающие эффективное расходование энергии.

5. Выбор оптимальной топологии

Топология БСС рассматривалась во многих публикациях [3, 4], но ни одна из них не была посвящена эффективности топологий БСС применительно к работе ОУ, что и послужило причиной написания этой статьи, в которой проведено сравнение энергии, потребляемой всеми УОУ имеющих разные топологии БСС. Для проведения анализа моделирование производилось применительно к искусственной среде. Физическая реализация БСС связана с большими расходами и затратами. Поэтому в первую очередь требуется сформировать такую модель, которая позволила бы получить результаты, близкие к реальным.

Моделирование БСС, соответствующей рассматриваемой области применения, осуществлялось в среде моделирования *Riverbed Modeler*,

Спецификация nRF905

Параметр	Значение параметра
Минимальное питающее напряжение, В	1,9
Максимальная излучаемая мощность, дБм	10
Скорость передачи данных, кбит/с	50*
Питающий ток при излучаемой мощности –10 дБм, мА	9
Питающий ток в режиме приёма, мА	12,5
Температурный диапазон, °С	От –40 до +85
Типичная чувствительность, дБм	-100
Питающий ток в режиме пониженного потребления энергии, мкА	2,5
Время переключения каналов, мкс	< 650

* В табл. 1 приведены другие данные. – Прим. пер.

Параметры моделирования для произвольной, линейной и древовидной топологий с 25, 50, 100 и 200 УОУ

Количество УОУ	Топология	Радиус покрытия УОУ, м	Количество ЦУОУ	Сетевая зона, м ²	Время, затрачиваемое на моделирование, с	Расстояние между узлами, м
25	Линейная	145	1	2500×100	300	100
	Произвольная	145	1	2000×2000	300	Переменное
	Древовидная	145	1	2000×2000	300	100
50	Линейная	145	1	5000×100	300	100
	Произвольная	145	1	2000×2000	300	Переменное
	Древовидная	145	1	2000×2000	300	100
100	Линейная	145	1	10000×100	300	100
	Произвольная	145	1	2000×2000	300	Переменное
	Древовидная	145	1	2000×2000	300	100
200	Линейная	145	1	20000×100	300	100
	Произвольная	145	1	2000×2000	300	Переменное
	Древовидная	145	1	2000×2000	300	100

Таблица 4

Энергопотребление изделий компании *Nordic*

Ширина полосы, кГц	Скорость передачи данных, кбит/с	Тип энергопотребления	Энергопотребление, Вт
100	595	Передача данных	0,0330
		Приём данных	0,0366
200	1190	Передача данных	0,0900
		Приём данных	0,0384
		Режим ожидания	0,0003
		Экономичный режим ожидания	$3,75 \cdot 10^{-5}$

представляющей собой программные средства моделирования, которые позволяют осуществлять моделирование любых сетей [32]. Анализ связанных с построением сетей проектов даёт возможность понять многие моменты, такие как анализ рабочих характеристик или проверка предпочтительности. Моделирование осуществляется на языке *ProtoC*, в основу которого положен язык программирования СИ и который предназначен для используемого программного обеспечения. *Riverbed Modeler* позволяет осуществлять моделирование дискретных событий для проведения анализа работы рассматриваемой сети [33].

Для того, чтобы при проектировании БСС обеспечить совпадение с реальностью, в качестве основы для построения УОУ были взяты приёмопередатчики *nRF905* компании *Nordic*,

которые обеспечивают возможность многоканальной связи. Технические характеристики приёмопередатчика *nRF905* приведены в табл. 2 [13].

В модели использовались узлы двух типов: ЦУОУ для центральной точки управления и УОУ для отдельных светильников. Что касается топологии ОУ, то для сельской местности использовалась произвольная топология, для установок дорожного и тоннельного освещения использовалась линейная топология, а древовидная топология использовалась применительно к разветвлённым системам уличного и дорожного освещения. Все эти топологии показаны на рис. 2.

Применительно к каждой из топологий были рассмотрены 4 варианта, которым соответствовали 25, 50, 100 и 200 УОУ. Параметры, которые использовались при моделировании этих вариантов, приведены в табл. 3.

Энергопотребление приёмопередатчиков *nRF905*, применительно к которым осуществлялось моделирование сети, приведено в табл. 4.

Одним из параметров, влияющих на энергопотребление, является размер пакета передаваемых данных, которые используются в БСС. В БСС, которые были разработаны в рамках данного исследования, использовались пакеты трёх разных типов, размеры которых приведены в табл. 5. Рабочие пакеты (*Schedule Packets*) используются для передачи информации по каналам, выделенным ЦУОУ для УОУ. Контрольные пакеты (*Control Packets*) используются УОУ для прямого подключения к сети и для обеспечения бесперебойной работы сети, тогда как релейные пакеты (*Relay Packets*) используются УОУ для подключения к сети через другие узлы.

В данном исследовании энергопотребление определяется посредством сложения энергии, потребляемой n УОУ и одним ЦУОУ в режимах ожидания, экономных режимах ожидания (*Low Sleep Power*) и режимах обмена пакетами данных. При этом незначительным энергопотреблением, связанным с другими факторами, которые могут привести к расходу энергии, пренебрегали [1, 2]. Количество энергии, требующейся узлу для получения пакета (P_R), рассчитывают по формуле (2):

$$P_R = \frac{L_{pkt}}{R_{ch}} * P_{Rx}, \quad (2)$$

где L_{pkt} – длина пакета, бит; R_{ch} – скорость передачи данных по каналу, бит/с; P_{Rx} – мощность, потребляемая приёмником, Вт.

Расчёт энергии, которая потребляется при передаче пакета данных любым из УОУ (P_T), производится по формуле [1, 2]:

$$P_T = \frac{L_{pkt}}{R_{ch}} * P_{Tx}, \quad (3)$$

где P_{Tx} – мощность, потребляемая передатчиком, Вт.

Если сеть состоит из n УОУ и одного ЦУОУ, то энергия E_T , потребляемая равным N_C ($N_C = n + 1$) количеством узлов рассчитывают по формуле [1, 2]:

$$E_T = \sum_{n=1}^{N_C} \left\{ \begin{aligned} &(P_R * N_{Rpkt}) + \\ &+(P_T * N_{Tpkt}) + P_{Sp} + P_{LPL} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где N_{Rpkt} – полное количество пакетов, принятых всеми узлами; N_{Tpkt} – полное количество пакетов, переданных всеми узлами; P_{Sp} – мощность, потребляемая в режиме ожидания, Вт; P_{LPL} – мощность, потребляемая в экономном режиме ожидания, Вт

7. Результаты и обсуждение

Для осуществлявшегося в рамках данной работы моделирования БСС были выбраны равные 25, 50, 100 и 200 количества узлов и линейная, произвольная и древовидная топологии. Для всех смоделированных топологий были определены полные количества энергии, потребляемой всеми $n + 1$ узлами. На всех приведённых ниже графиках заметно, что в течение

Типы и размеры пакетов, использовавшихся в БСС

Тип пакета	Длина, бит
Рабочий пакет	Переменная
Контрольный пакет	32
Релейный пакет	52

первых секунд моделирования энергопотребление резко возрастало, так как при первом вхождении УОУ в сеть все УОУ потребляют энергию одновременно. Когда питание на УОУ подаётся впервые, они часто используют для включения в сеть и контрольные, и релейные пакеты одновременно. После включения в сеть УОУ периодически, но менее часто, посылают контрольные пакеты и пакеты данных. ЦУОУ потребляет энергию при подключении к сети каждого из УОУ.

Полная энергия, потребляемая БСС в варианте с 25 УОУ и одним ЦУОУ, показана на рис. 3, на котором видно, что полная энергия, потребляемая

смоделированными БСС с линейной, произвольной и древовидной топологиями, составляет, соответственно, 0,114; 0,0827 и 0,0743 Вт. Так что в сети, состоящей из 25 светильников, наибольшее потребление энергии, равное 0,114 Вт, наблюдается в случае линейной топологии. Минимальное потребление энергии, равное 0,0743 Вт, наблюдалось в случае древовидной топологии. В случае ОУ с 25 УОУ и одним ЦУОУ, БСС с древовидной топологией потребляет на 35 % меньше энергии, чем БСС с линейной топологией. В случае произвольной топологии потребление было на 27 % меньше, чем в случае линейной топологии.

Рис. 3. Полное потребление энергии сетью, состоящей из 25 УОУ и одного ЦУОУ

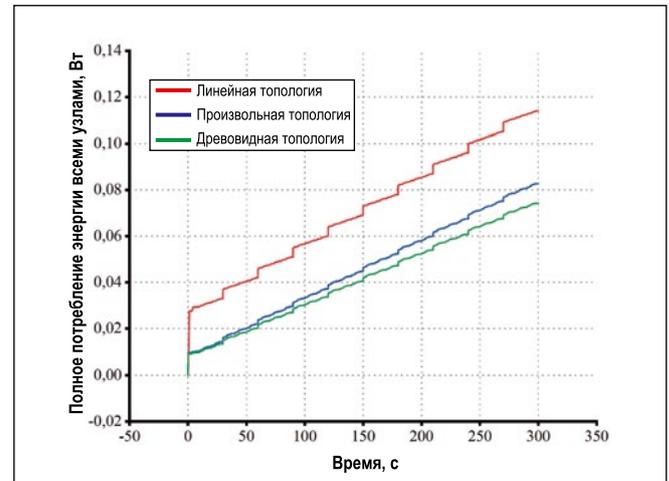


Рис. 4. Полное потребление энергии сетью, состоящей из 50 УОУ и одного ЦУОУ

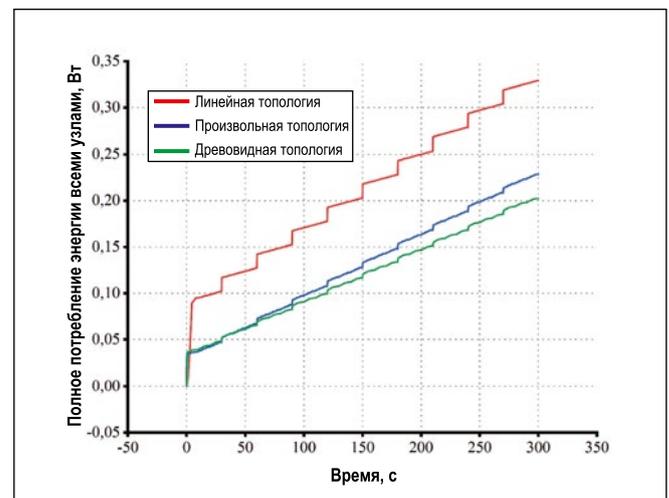


Рис. 5. Полное потребление энергии сетью, состоящей из 100 УОУ и одного ЦУОУ

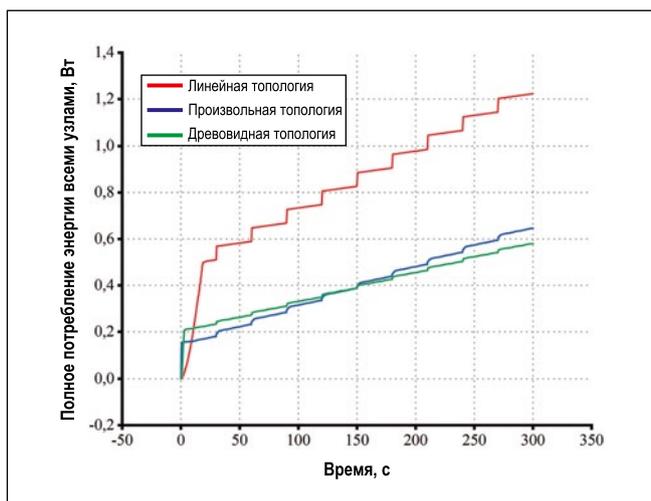


Рис. 6. Полное потребление энергии сетью, состоящей из 200 УОУ и одного ЦУОУ

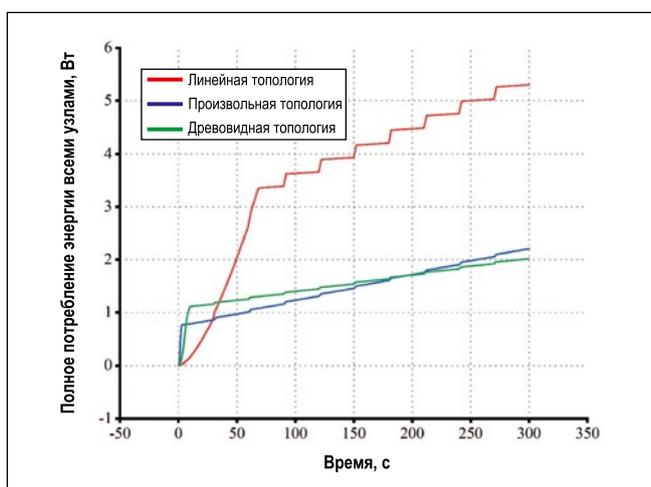
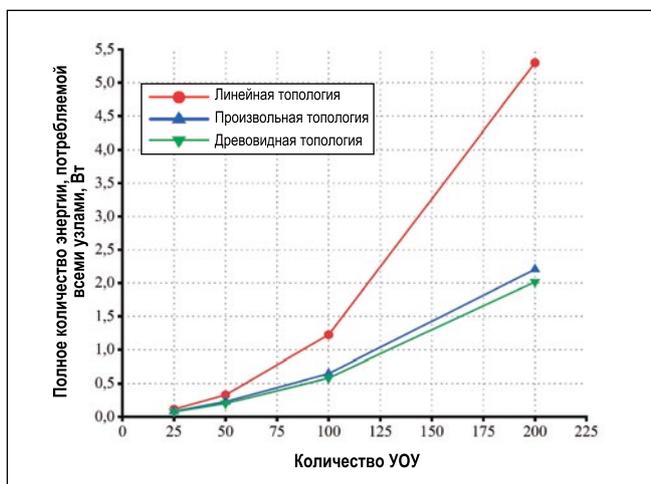


Рис. 7. Зависимость полного количества потребляемой БСС энергии от количества УОУ для линейной, произвольной и древоидной топологий



Полная энергия, потребляемая БСС в варианте с 50 УОУ и одним ЦУОУ, показана на рис. 4, на котором видно, что полная энергия, потребляемая смоделированными БСС с линейной, произвольной и древоидной топологиями, составляет, соответственно, 0,3293; 0,2287 и 0,20 Вт. Так что в сети, состоящей из 50 светильников, наибольшее потребление энергии, рав-

ное 0,3293 Вт, наблюдается в случае линейной топологии. Минимальное потребление энергии, равное 0,20 Вт, наблюдалось в случае древоидной топологии. В случае ОУ с 50 УОУ и одним ЦУОУ, БСС с древоидной топологией потребляет на 40 % меньше энергии, чем БСС с линейной топологией. По мере увеличения количества входящих в сеть светильников увели-

чивается и разность между энергией, потребляемой БСС с линейной и древоидной топологиями. И если в случае БСС с 25 УОУ и одним ЦУОУ эта разность составляла 35 %, то в случае БСС с 50 УОУ и одним ЦУОУ она оказалась равной 40 %. А это означает, что любой добавленный в ОУ светильник приводит к увеличению разности между энергией, потребляемой БСС с наиболее удачной топологией, и энергией, потребляемой имеющими другие топологии БСС.

Полная энергия, потребляемая БСС в варианте со 100 УОУ и одним ЦУОУ, показана на рис. 5, на котором видно, что полная энергия, потребляемая смоделированными БСС с линейной, произвольной и древоидной топологиями, составляет, соответственно, 1,223; 0,6458 и 0,58 Вт. Так что в сети, состоящей из 100 светильников, наибольшее потребление энергии, равное 1,223 Вт, наблюдается в случае линейной топологии. Минимальное потребление энергии, равное 0,58 Вт, наблюдалось в случае древоидной топологии. В случае ОУ со 100 УОУ и одним ЦУОУ, БСС с древоидной топологией потребляет на 53 % меньше энергии, чем БСС с линейной топологией.

Полная энергия, потребляемая БСС в варианте с 200 УОУ и одним ЦУОУ, показана на рис. 6, на котором видно, что полная энергия, потребляемая смоделированными БСС с линейной, произвольной и древоидной топологиями, составляет, соответственно, 5,301; 2,205 и 2,016 Вт. Так что в сети, состоящей из 200 светильников, наибольшее потребление энергии, равное 5,301 Вт, наблюдается в случае линейной топологии. Минимальное потребление энергии, равное 2,016 Вт, наблюдалось в случае древоидной топологии. В случае ОУ с 200 УОУ и одним ЦУОУ, БСС с древоидной топологией потребляет на 62 % меньше энергии, чем БСС с линейной топологией. Энергия, потребляемая БСС, и количества скачков приведены в табл. 6 для разных вариантов ОУ.

Энергия, потребляемая БСС с рассмотренными в данной работе топологиями, показана на рис. 7, из которого следует, что минимальное потребление энергии имеет место в случае древоидной топологии, а максимальное – в случае линейной топологии. По мере увеличения количества УОУ в сети полное энергопотребление воз-

Энергия, потребляемая БСС, для разных вариантов ОУ

Количество узлов	Топология	Энергопотребление, Вт	Сравнение топологий (наибольшее/наименьшее энергопотребление), %	Среднее количество скачков	Максимальное количество скачков
25СУ+ЦУОУ	Линейная	0,1140	-	13	25
	Произвольная	0,0827	-	1,72	3
	Древовидная	0,0743	35	1,6	4
50СУ+ЦУОУ	Линейная	0,3293	-	25,5	50
	Произвольная	0,2287	-	1,54	4
	Древовидная	0,2003	40	2,88	7
100СУ+ЦУОУ	Линейная	1,2234	-	50,5	100
	Произвольная	0,6458	-	4,19	6
	Древовидная	0,5801	53	3,49	9
200СУ+ЦУОУ	Линейная	5,3012	-	100,5	200
	Произвольная	2,2046	-	7,35	15
	Древовидная	2,0160	62	4,78	11

растает экспоненциально, причём на рисунке не заметны какие бы то ни было серьёзные различия между произвольной и древовидной топологиями. Что касается линейной топологии, то на графике видно, что по мере увеличения количества узлов наблюдается значительное увеличение энергопотребления. Очевидно, что на этот результат в первую очередь влияет среднее количество скачков. Поэтому при моделировании помимо полного потребления энергии рассматривается ещё и количество скачков, требующееся УОУ для подключения к ЦУОУ. В табл. 6 максимальные и минимальные количества скачков приведены для всех рассмотренных в процессе моделирования размеров и топологий БСС. Как следует из табл. 6, в случаях линейной и древовидной топологий с равными расстояниями между узлами и упорядоченным распределением узлов энергопотребление возрастает по мере увеличения количества скачков. С другой стороны, в случае произвольной топологии распределение узлов не является упорядоченным, и поэтому нельзя утверждать, что одновременно с увеличением количества узлов увеличивается и среднее количество скачков. Если же это увеличение происходит одновременно, то по мере увеличения количества узлов имеет место и увеличение максимального количества скачков, что и наблюдается в случае линейной топологии. Помимо собственных дан-

ных, УОУ передаёт и данные, поступающие от других УОУ, для которых он играет роль ретранслятора. Поэтому количество ретрансляций, осуществлённых УОУ, говорит о том, какое количество данных им передано. Так как в случае линейной топологии каждая ретрансляция считается скачком, то при увеличении количества скачков соответствующим образом увеличивается и количество энергии, которую УОУ расходуют на передачу данных. Например, УОУ, который подключён непосредственно к ЦУОУ, передаёт свои данные напрямую. Но если данные передаёт УОУ, подключённый к ЦУОУ через другой УОУ, то он должен передать пакет данных на этот другой УОУ, играющий для него роль ретранслятора. Если для передачи данных требуется 10 скачков, то один и тот же пакет должны передать 10 узлов, так что расход энергии возрастает в 10 раз по сравнению с энергией, требующейся для однократной передачи пакета данных.

8. Заключение

В данной работе проведена оценка энергопотребления БСС осветительных установок, имеющих разные топологии и количества узлов. Для этого применительно к питаемым возобновляемыми источниками энергии автономным ОУ с линейной, произвольной и древовидной топологиями, было проведено моделирование БСС,

позволившее определить количество энергии, потребляемой как при подключении узлов к БСС, так и при передаче данных. Согласно полученным результатам, несмотря на равное количество узлов, при изменении топологии изменяется и энергопотребление. При подключении узлов к сети потребляется большее количество энергии, так как при включении системы имеет место передача пакетов данных, включающих в себя временные, контрольные и ретрансляционные данные. По завершении установки пакетов частота передачи данных соответствующими УОУ уменьшается, вследствие чего имеет место равномерное уменьшение потребляемой энергии.

Увеличение энергопотребления при увеличении количества УОУ наиболее заметно в случае линейной топологии, так как при этой топологии количество скачков оказывается максимальным. Минимальное потребление энергии имело место в случае произвольной топологии с 25 УОУ², и в части энергопотребления эта топология очень близка к древовидной топологии. Было установлено, что количества энергии, потребляемой в случаях древовидной и произвольной топологий, очень близки друг к другу, и что эти топологии являются очень

² Согласно табл. 6, минимальное энергопотребление имеет место в случае БСС с древовидной топологией и 25 УОУ. – Прим. пер.

энергоэффективными. В то же время, линейная топология в части энергопотребления оказалась проблематичной.

Проведённые исследования показали, что при увеличении количества скачков, имеющих место в рамках разных топологий (особенно в сетях с линейной топологией), подключение к сети сопровождается значительным увеличением энергопотребления. При увеличении количества УОУ полное количество энергии, потребляемой БСС, увеличивается экспоненциально, а энергоэффективность сети уменьшается. Поэтому при подключении УОУ к сети следует использовать энергоэффективные методы (или протоколы управления доступом к сети (MAC-протоколы)). А неизбежность использования линейной топологии в случае протяжённых установок дорожного освещения только подчёркивает важность эффективных и энергоэкономичных методов подключения УОУ к сети. И этот вопрос следует рассмотреть в рамках дальнейших исследований.

И наконец, проведённое моделирование показало, что имеющие разные топологии БСС осветительных установок потребляют разное количество энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. – Vol. 7, No. 2. – P. 145–153.
2. Çibuk, M. Tek Atlımalı Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Yeni Bir Hızlı Ağa Katılım Algoritması // Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi.– 2018. – Vol. 7, No. 1. – P. 72–83.
3. Shrestha, A., Xing, L. A Performance Comparison of Different Topologies for Wireless Sensor Networks // 2007 IEEE Conf. Technol. Homel. Secur, 2007. – P. 280–285.
4. Mamun, Q. A Qualitative Comparison of Different Logical Topologies for Wireless Sensor Networks // Sensors.– 2012. – Vol. 12, No.12. – P. 14887–14913.
5. Karun, R., Johnny, M. Street Light Commander System Using Zigbee Network of Devices // Int. Journal of Engineering and Innovative Technology.– 2014. – Vol. 4, No. 4. – P. 165–169.
6. Srinath, V., Srinivas, S. Street Light Automation Controller using Zigbee Network and Sensor with Accident Alert System // Int. Journal of Current Engineering and Technology.– 2015. – Vol. 5, No. 4. – P. 2819–2823.
7. Bhargavi, R., Pavitra, B. Development of Automatic Street Light Illumination and Vehicle Speed Controlling System on Arm7 for Roadways // Int. Journal of Research in Advanced En-

gineering and Technology.– 2016. – Vol. 5, No. 3. – P. 16–22.

8. Lahoti, P., Wanare, A. Remotely Control High Energy Efficient Automatic Street Lighting System // Int. Journal of Science, Technology and Engineering.– 2015. – Vol. 1, No. 11. – P. 43–46.

9. Caponetto, R., Dongola, G., Fortuna, L., Riscica, N., Zufacchi, D. Power consumption reduction in a remote controlled street lighting system // Int Symp Power Electron Electr Drives, Autom Motion, 2008. – P. 428–433.

10. Chen, Y., Liu, Z. Distributed intelligent city street lamp monitoring and control system based on wireless communication chip nRF401 // Proc. Int. Conf. Networks Secur Wirel Commun Trust Comput, 2009, Vol. 2. – P. 278–281.

11. Lin J, Jin X, Mao Q. 2009. Wireless monitoring system of street lamps based on ZigBee // Proc. 5th Int Conf Wirel Commun Netw Mob Comput, 2009. – P. 2–4.

12. Jun, L., Cangxu, F., Xuesong, S., Aijun, Y. Street lamp control system based on power carrier wave // Proc. 2nd Int Symp Intel Inf Tech Appl Work IITA 2008. – P. 184–188.

13. Nordic Semiconductor: nRF905 Single chip 433/868/915MHz Transceiver, 2019. http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF905_PS_v1.5.pdf (02.02.2019)

14. Özkaya, M. Aydınlatma Tekniği, Birsen Yayınevi, İstanbul-1994, 91.

15. TS EN13201–2, Road lighting – Part 2: Performance requirements (Effective date: 09.12.2016).

16. Cengiz, M.S. A Simulation and Design Study for Interior Zone Luminance in Tunnel Lighting // Light & Engineering.– 2019. – Vol. 27, No. 2. – P. 42–51.

17. Tetri, E., Chenani, S.B., Rasanen R.S. Advancement in Road Lighting // Light & Engineering.– 2018. – Vol. 26, No. 1. – P. 99–109.

18. Бозорг Ченани С., Рясянен Р.-С, Тетри Е. Состояние и перспективы развития дорожного освещения // Светотехника.– 2018.– № 1. – С. 15–22.

19. Barua, P., Mazumdar, S., Chakraborty, S., Bhattacharjee, S. Road Classification Based Energy Efficient Design and its Validation for Indian Roads // Light & Engineering.– 2018. – Vol. 26, No. 2. – P. 110–121.

20. Чакрабурти С., Баруа П., Бхаттачарджи С., Мазумдар С. Энергоэффективное проектирование установок дорожного освещения на основе классификации индийских дорог по освещению // Светотехника.– 2018.– № 1. – С. 60–67.

21. Cengiz M.S., Cengiz, C. Numerical Analysis of Tunnel LED Lighting Maintenance Factor // IIUM Engineering Journal.– 2018. – Vol. 9, No. 2. – P. 154–163.

22. Iacomussi, P., Rossi, G., Soardo, P. Energy Saving and Environmental Compatibility in Road Lighting // Light & Engineering.– 2012. – Vol. 20, No. 4. – P. 55–63.

23. Росси Д., Соардо П., Якомусси П. Дорожное освещение: экономия энергии и совместимость с окружающей средой // Светотехника.– 2012.– № 2. – С. 32–39.

24. Van Bommel, W., Van Den Beld, G., Van Ooyen M. Industrial Light and Productivity // Light & Engineering.– 2003. – Vol. 11, No. 1. – P. 14–21.

25. Ван Боммель В., Бельд Г., Оойжен М. Промышленное освещение и производительность труда // Светотехника.– 2003.– № 1. – С. 8–12.

26. Cengiz M.S. The Relationship Between Maintenance Factor and Lighting Level in Tunnel Lighting // Light & Engineering.– 2019 – Vol. 27, No. 3.

27. Сенгуз М.С. Связь между коэффициентом эксплуатации и уровнем освещённости в тоннеле // Светотехника.– 2019.– № 3. – С. 51–58.

28. Cengiz, M.S., Cengiz, Ç. Numeric Analysis for the Efficiency of LED and Traditional Luminaries used in Tunnel Lighting // Int. GAP Renewable Energy and Energy Efficiency Congress, 10–12 May 2018. – P. 347–348.

29. Cengiz, M.S., Cengiz, Ç., Mamiş, M.S. Contribution of Reflector Design formed by Numeric Calculations to Energy Efficiency // Int. GAP Renewable Energy and Energy Efficiency Congress, 10–12 May 2018. – P. 349–350.

30. Çibuk, M., Ari, D., Ağgün, F. Relay Mechanism with Three way Handshake for Wireless Sensor Networks // 8th Int. Advanced Technologies Symp., Elazığ, 2017.

31. Ari, D., Çibuk, M., Ağgün, F. A New Proxy Based Network Joining Method for Linear Wireless Sensor Networks // Int. Engineering and Natural Sciences Conf. (IENSC2018), Diyarbakır, 2018.

32. Riverbed Models, 2018. Available at: <https://www.riverbed.com/gb/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>. (Access date 28-Feb.-2019).

33. Hammoodi, I.S., Stewart, B.G., Kocian, A., McMeekin, S.G. A comprehensive performance study of OPNET modeler for ZigBee wireless sensor networks // 3rd Int. Conf. Next Gener. Mob. Appl. Serv. Technol, 2009. – P. 357–362.



Муса Цибук (Musa Çibuk),

Ph.D. (2009 г.). Заведующий кафедрой вычислительной техники Университета Битлис Ерен, Турция. Область научных интересов: беспроводные сенсорные сети, компьютерные сети, цифровая связь и обработка изображений



Мехмет Сауд Сенгуз (Mehmet Saif Cengiz), Ph.D.

(2016 г.). Работает в Университете Битлис Ерен, Турция. Область научных интересов: практика освещения