

УДК 621.391.81, 47.01.77

Н. И. ЛИСТОПАД¹, О. А. ЛАВШУК²

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники²Белорусская государственная академия связи

(Поступила в редакцию 12.05.2025)

По результатам моделирования сетей промышленного интернета вещей при различных параметрах и требованиях качества обслуживания выполнена оценка эффективности их функционирования при различных уровнях сигналов, наличии ошибок приема и задержек передачи данных от сенсорных датчиков и маршрутизаторов с учетом такого важного параметра как энергопотребление. Установлено, что при наличии в сети интернета вещей задержек и необходимости передачи данных, чувствительных к задержке, целесообразно использовать методы кластеризации и оптимального размещения сенсорных датчиков. Представлено теоретическое обоснование эффективного функционирования промышленного интернета вещей с обеспечением необходимой производительности сетей передачи данных и заданного качества обслуживания.

Введение. Промышленный интернет вещей (IIoT) относится к использованию интернета вещей (IIoT) в промышленных приложениях. IIoT позволяет улучшить качество и эффективность производства, используя надежную и безопасную связь между промышленными объектами при поддержке новых информационных технологий [1].

В промышленных сенсорных сетях количество интернет вещей быстро увеличивается. Это заставляет протоколы IIoT сталкиваться с проблемами маршрутизации и безопасности. Классические протоколы маршрутизации плохо адаптированы к среде IIoT из-за ограниченности ресурсов и неоднородности.

Для повышения эффективности промышленного интернета вещей необходимо учитывать следующие требования.:

1. Требования к безопасности данных. Необходимо обеспечивать безопасность информации, передаваемой от устройств, обладающих собственными вычислительными ресурсами, а также от устройств с ограниченными ресурсами.

2. Требования к энергопотреблению. Большинство сенсорных устройств имеют ограниченные энергоресурсы. Время жизни сети сенсорных устройств зависит от объемов получаемой и передаваемой информации.

3. Требования к скорости сбора и передачи данных, при сборе и передаче которых могут возникать задержки, что в свою очередь может привести к потере пакетов информации и сбоям в работе сети в целом.

Важным элементом обеспечения высокой эффективности промышленного интернета вещей является оптимальная организация передачи данных от многочисленных датчиков путем использования соответствующих протоколов маршрутизации. Одним из таких протоколов является RPL (Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks) протокол [2–5].

Для устройств IIoT с ограниченными ресурсами используется протокол маршрутизации RPL с низким энергопотреблением и потерями. RPL определяется как протокол удаленной векторной маршрутизации, специально предложенный для небольших и маломощных устройств IPv6. RPL работает по стандарту IEEE 802.15.4 и обеспечивает высокую масштабируемость, гибкость, надежность и отказоустойчивость, реализуя двустороннее подключение между устройствами с ограниченными ресурсами.

Протокол RPL образует древовидную топологию, узлы которой выбирают маршрут для пересылки своих пакетов в направлении приемника, используя путь маршрутизации с минимальной стоимостью. Выбор пути маршрутизации с наименьшей стоимостью – это проблема, основанная на оптимизации целевой функции OF (Objective function). Протокол RPL поддерживает только две целевые функции: нулевую целевую функцию (OF0) и целевую функцию с минимальным ранговым гистерезисом (MRHOF) [6]. Эти OF используются для оптимизации энергопотребления и производительности сети IoT на основе количества переходов (OF0), ожидаемого количества передач (ETX), энергии, задержки, пропускной способности, уровня качества канала (LQL) и т. д.

Исследование методов сбора и обработки информации сети интернета вещей с целью минимизации задержки. Беспроводная сенсорная сеть состоит из датчиков (сенсоров), соединенных по радиоканалу. Сенсорные устройства имеют ограниченные ресурсы, такие как энергия, память и вычислительная мощность [7].

Сети, использующие протокол RPL [8], привязаны к корню, который обычно действует как пограничный маршрутизатор 6LoWPAN, т. е. обеспечивает маломощную сенсорную сеть с подключением к внешним сетям Internet. Сенсорная сеть является пространственно-распределенной, а сообщения от датчиков могут транслироваться от одного элемента к другому. Также данная сеть имеет свойство

так называемой самоорганизации: устройства в сети способны к автономному нахождению маршрута друг к другу, а также к центральному узлу (рис. 1).

Для моделирования сети промышленного интернета вещей был применен симулятор SOOJA, в котором при проведении исследования использовали сенсорный узел на базе

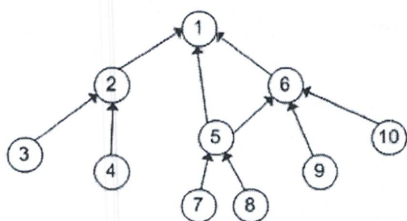


Рис. 1. Топология сети RPL

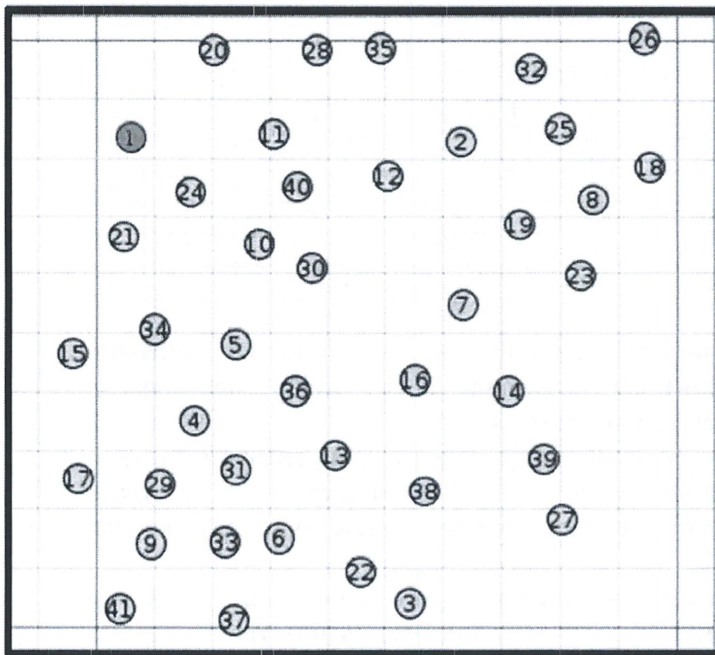


Рис. 2. Топология беспроводной сенсорной сети с 40 узлами

платформы SkyMote [9], выступающий в роли пограничного маршрутизатора, который транслирует префикс сети и инициирует создание дерева маршрутизации RPL и распределенную сеть, состоящую из 40 сенсорных узлов, расположенных случайным образом (рис. 2).

Результаты моделирования приведены в табл. 1 в порядке убывания общего энергопотребления для исследуемой сенсорной сети.

Таблица 1. Показатели производительности сенсорной сети из 40 узлов

Сенсорные узлы	CPU Power	LPM Power	ListenPower	TransmitPower	Power	Hop	ETX	Received	Lost
5	0,644	0,144	0,871	0,165	1,823	1	16	10	0
36	0,564	0,146	0,645	0,136	1,491	2	26,181	9	0
12	0,564	0,146	0,659	0,095	1,464	1	16	9	0
38	0,525	0,148	0,591	0,171	1,434	2	25,236	9	0
19	0,517	0,148	0,638	0,098	1,401	2	34,097	9	0
13	0,554	0,147	0,575	0,12	1,397	2	26,361	9	0
2	0,533	0,147	0,511	0,159	1,351	2	27,675	10	0
29	0,535	0,147	0,538	0,128	1,348	2	25,236	9	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
8	0,445	0,15	0,479	0,087	1,161	2	27,675	10	0
18	0,412	0,151	0,478	0,098	1,139	2	29,944	9	0

Окончание табл. 1

Сенсорные узлы	CPU Power	LPM Power	ListenPower	TransmitPower	Power	Hop	ETX	Received	Lost
27	0,403	0,151	0,464	0,112	1,13	3	43,944	9	0
26	0,392	0,152	0,463	0,112	1,118	2	38,361	9	0
28	0,458	0,15	0,456	0,048	1,112	1	16	9	0
41	0,423	0,151	0,432	0,082	1,088	2	37,444	9	0
20	0,417	0,151	0,431	0,054	1,053	1	16	9	0
	0,495	0,149	0,529	0,102	1,274				

Исходя из полученных результатов моделирования, можно заметить неравномерность балансировки нагрузки и соответственно более высокое потребление энергии некоторыми сенсорными узлами (табл. 1).

Так, в рассматриваемой топологии наибольшая нагрузка на сенсорный узел 5, для которого общее энергопотребление составляет 1,823 мВт за время исследования, что на 43 % больше среднего энергопотребления. Также более загруженными узлами оказались узлы 36, 12.

Из приведенной сенсорной карты подключений (рис. 3) можем заметить, что к узлу 5 по сравнению с другими подключилось большее количество сенсорных узлов.

Выполненное исследование показывает, что главный недостаток протокола RPL – это несбалансированность нагрузки. Несбалансированная нагрузка приводит к тому, что к одному узлу может подключиться большое количество узлов, что

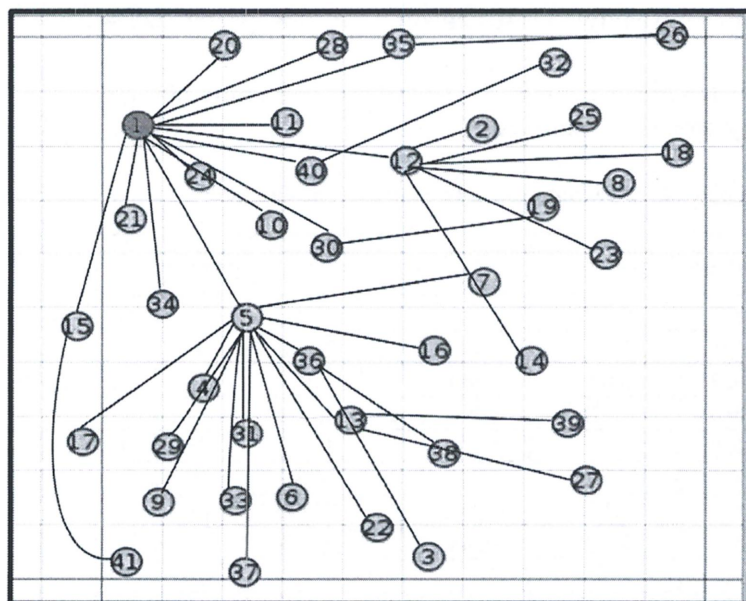


Рис. 3. Сенсорная карта подключения

приводит к расходованию большей энергии и разрядке батареи этого сенсорного узла. Таким образом, узлы с более высокой нагрузкой расходуют энергию быстрее и после отключения разряженного узла те узлы, которые использовали этот узел в своем маршруте, должны найти новый маршрут к корню, что увеличивает сетевой трафик и энергопотребление узлов и соответственно уменьшает время жизни беспроводной сенсорной сети. Временем жизни сенсорной сети является время от начала работы сети до момента отказа одного из ключевых узлов 1, 5 или 12 (рис. 3).

Как показали проведенные исследования, одной из возможностей устранения несбалансированной нагрузки является сетевая кластеризация, позволяющая увеличить срок службы сенсорной сети.

Таким образом, общая беспроводная сенсорная сеть делится на разные кластеры. В нашем исследовании выбрано четыре кластера. В каждом кластере в качестве главного узла выбираются те узлы, где самое высокое значение остаточной энергии, т. е. те, у кого наибольший процент заряда.

Остаточная энергия рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{Остаточная энергия} &= \text{Общая энергия} - \\ &- \text{Количество потребляемой энергии узлами.} \end{aligned} \quad (1)$$

Количество потребляемой энергии узлами рассчитывается по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{Количество потребляемой энергии узлами} &= \text{CPU Power} + \text{LPM Power} + \\ &+ \text{Listen Power} + \text{Transmit Power.} \end{aligned}$$

В протоколе RPL при восходящей маршрутизации корневой узел (шлюз) инициирует построение сети DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph), посылая первое сообщение DIO, содержащее расстояние, номер версии, ранг и целевую функцию, которая используется для расчета ранга [4; 5]. Все узлы после получения сообщения DIO выбирают узел в соответствии с выбранной целевой функцией в качестве своего предпочтительного родителя, а затем вычисляют свой собственный ранг. Затем каждый узел отправляет свое сообщение DIO, содержащее рассчитанный ранг всем своим соседям.

Каждый узел после получения сообщения DIO проверяет свой ранг на соответствие с присланным. Если полученный ранг выше, чем собственный, такое сообщение сбрасывается. Если же полученный ранг ниже, чем собственный, узел добавляет единицу к расстоянию и заносит идентификатор узла-отправителя в свою таблицу маршрутизации. Это расстояние позволяет рассчитать количество потомков на узел при построении сети DODAG и может использоваться для балансировки нагрузки [10].

В нашем исследовании изменим формулу расчета ранга учитывая остаточную энергию для выбора главного узла в кластере:

$$\text{newRank} = \text{ETX} / \text{Остаточная энергия.}$$

Узел, чей ранг ниже, выбирается в качестве главного узла в кластере. Внесем изменение в функцию `calculate_rank()` и выполним моделирование.

Результаты моделирования приведены в табл. 2 в порядке убывания общего энергопотребления для исследуемой сенсорной сети с измененным расчетом ранга. Результат подключения к главному узлу кластера показан на рис. 4.

Таблица 2. Показатели производительности сенсорной сети из 40 узлов с учетом расчета нового ранга

Сенсорные узлы	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power	Hop	ETX	Received	Lost
36	0,543	0,147	0,545	0,051	1,287	1	16	11	0
13	0,54	0,147	0,514	0,072	1,273	1	16	11	0
12	0,534	0,147	0,487	0,047	1,216	1	16	10	0
5	0,532	0,147	0,48	0,041	1,201	1	16	10	0
38	0,514	0,148	0,478	0,058	1,197	1	16	11	0
2	0,512	0,148	0,472	0,049	1,182	1	16	11	0
29	0,526	0,148	0,454	0,043	1,17	1	16	10	0
21	0,489	0,149	0,45	0,049	1,136	1	16	11	0
26	0,39	0,152	0,44	0,149	1,131	2	27	10	1
28	0,434	0,15	0,477	0,052	1,113	1	16	11	0
18	0,407	0,151	0,449	0,079	1,086	1	16	11	0
8	0,422	0,151	0,436	0,042	1,051	1	16	11	0
41	0,415	0,151	0,41	0,04	1,016	1	16	11	0
27	0,401	0,151	0,413	0,042	1,007	1	16	11	0
	0,486	0,149	0,468	0,0598	1,162				

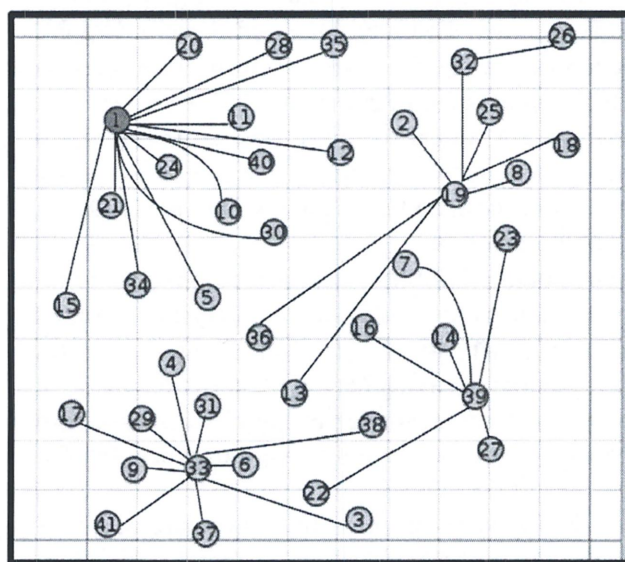


Рис. 4. Сенсорная карта подключения с использованием кластеризации

Проанализировав полученный результат, можно сделать вывод, что при наличии кластеров в сети нет таких загруженных узлов как в результате, представленном в табл. 1 (узел 5). Уменьшилось количество переходов, значение hop в табл. 2, к шлюзам, которыми в исследуемой сенсорной сети стали узлы 1, 19, 33 и 39. Благодаря чему энергопотребление узлов стало более равномерное, что показывает лучшие результаты по балансировке нагрузки [10]. Все шлюзы сенсорной сети имеют подключение с граничным устройством, предоставляющим выход во внешнюю сеть Интернет. Шлюзом в исследовании в зоне покрытия граничного устройства выступают узлы, имеющие самое высокое значение остаточной энергии (1).

Маршрутизация с использованием задержки. Основное внимание в проектировании сенсорной сети следует уделять протоколу маршрутизации. В зависимости от архитектуры сети (одноранговая, иерархическая, кластеры) в ней может быть применен тот или иной алгоритм маршрутизации. При этом основная задача протоколов сетевого уровня – обеспечить надежную передачу пакетов при минимальных затратах энергии сети и равномерном использовании всех узлов.

Среди протоколов маршрутизации, кроме вышеописанного протокола RPL, можно выделить такие классы протоколов, как протоколы с множественными маршрутами (multipath based – Directed Diffusion), протоколы на основе запросов (query based – Rumour, ACQUIRE), на основе переговоров (negotiation based – SPIN), кластерные протоколы (LEACH, TEEN, APTEEN), протоколы с обеспечением качества обслуживания (QoS based – SPEED) и др. [11].

В нашем исследовании для выбора оптимального маршрута предлагается использовать гибридную целевую функцию, объединяющую более одной метрики. Метрика для определения ранга узла использует такие параметры, как задержка D_e и вероятность потери пакетов Z_e . Для удобства дальнейшего анализа вероятность потери пакетов Z_e будем рассматривать такой параметр, как логарифм вероятности прохождения пакетов $X_e = \ln(1 - Z_e)$.

Для нахождения ранга узла предлагаем использовать следующую свертку [7]:

$$r = \frac{D_{s,j}}{D^{\max}} + \frac{X_{s,j}}{X^{\min}},$$

где $D_{s,j}$ – задержка для каждого сенсорного узла; $X_{s,j}$ – вероятность потери пакета для каждого сенсорного узла; $D^{\max}$ – максимально допустимая задержка; $X^{\min}$ – минимально допустимые потери.

После получения сообщения DIO (протокол RPL) каждый узел генерирует список возможных родительских узлов. Во время процедуры выбора выбирается родительский узел с минимальным значением ранга. В RPL ранг узла основан на его родительском ранге и базовом ранге [2]. Расчет ранга представлен в алгоритме на рис. 5.

Если узел не имеет родителя и базовый ранг равен нулю, то ранг бесконечен. Если базовый ранг не равен нулю, ранг равен базовому рангу плюс прибавка к рангу. Повышение ранга рассчитывается в соответствии с функцией OF, который

```

static rpl_rank_t
calculate_rank(rpl_parent_t *p, rpl_rank_t base_rank)
{
    rpl_rank_t new_rank;
    rpl_rank_t rank_increase;
    if(p == NULL) {
        if(base_rank == 0) {
            return INFINITE_RANK;
        }
        rank_increase = Ds,j / Dmax + Xs,j / Xmin;
    } else {
        rank_increase = p->link_metric;
        if(base_rank == 0) {
            base_rank = p->rank;
        }
    }
}

```

Рис. 5. Алгоритм расчета ранга

в нашем случае основан на параметрах задержки и вероятности потери пакета. Дочерний узел содержит список рангов родительских узлов-кандидатов, сравнивает рассчитанные ранги родительских узлов и добавляет в таблицу маршрутизации родительский узел с минимальным рангом.

Исследование функционирования системы IoT с учетом требований безопасности, надежности и эффективности. В целях апробации методики был проведен численный эксперимент путем моделирования в операционной системе CONTIKI с использованием модели Directed Graph Radio Medium. В исследуемой модели установили двунаправленные ссылки от источника к узлу назначения. Для каждой ссылки можно изменять различные параметры канала, такие как соотношение RX, RSSI, LQI и задержка. Коэффициент RX – это переменная, которая используется, чтобы обеспечить моделирование случайных ошибок при приеме пакета на узле назначения. RSSI (Received Signal Strength Indicator) – это значение мощности сигнала, поступающего на антенны устройства, который включает в себя сигнал соседних базовых станций, внутренние и внешние помехи, шумы. Чем выше показатель, тем мощнее уровень сигнала. LQI (Link Quality Indicator) – индикатор качества радиоканала физического уровня. LQI может принимать значения от 50, что соответствует низкому качеству, до 110, что соответствует практически идеальным характеристикам канала. Delay – задержка прохождения пакета на канале, которая может принимать значение от 1 до 5 мс. Исследуемая сенсорная сеть представлена на рис. 6.

В исследуемой сети установили значение мощности сигнала RSSI = -20 дБм для всех сенсорных узлов и значение индикатора качества радиоканала физического уровня LQI = 60. Значения задержки Delay в данном исследовании не учитываются

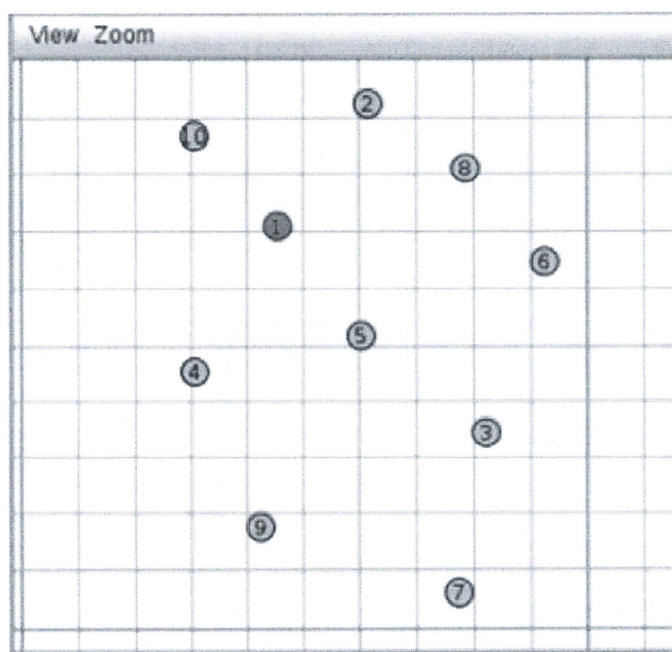


Рис. 6. Сенсорная сеть

Т а б л и ц а 3. Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	Rtmetric	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2	44	0	1	512	16	0,353	0,153	0,418	0,042	0,966
3	44	0	2	768	32	0,387	0,152	0,477	0,176	1,192
4	44	0	1	512	16	0,355	0,153	0,432	0,039	0,979
5	44	0	1	512	16	0,388	0,152	0,451	0,048	1,039
6	44	0	1	512	16	0,343	0,153	0,412	0,041	0,948
7	44	0	2	772	32	0,347	0,153	0,443	0,131	1,074
8	44	0	1	512	16	0,350	0,153	0,435	0,064	1,002
9	44	0	2	768	32	0,343	0,153	0,446	0,116	1,058
10	44	0	1	512	16	0,334	0,153	0,409	0,043	0,939
Средние показатели производительности:				597,783	21,33	0,356	0,153	0,436	0,078	1,022

для определения наиболее важных показателей при определении оптимального маршрута.

В табл. 3 приведены показатели производительности сети.

Анализируя результаты, можно сделать вывод, что при значении мощности сигнала RSSI -20 дБм и индикатора качества радиоканала физического уровня LQI 60 в сенсорной сети отсутствуют потери для всех узлов сети, энергопотребление процессора на узлах приближено к среднему значению для всей сети за исключением узлов 3, 7 и 9, для которых энергопотребление отличается в режиме

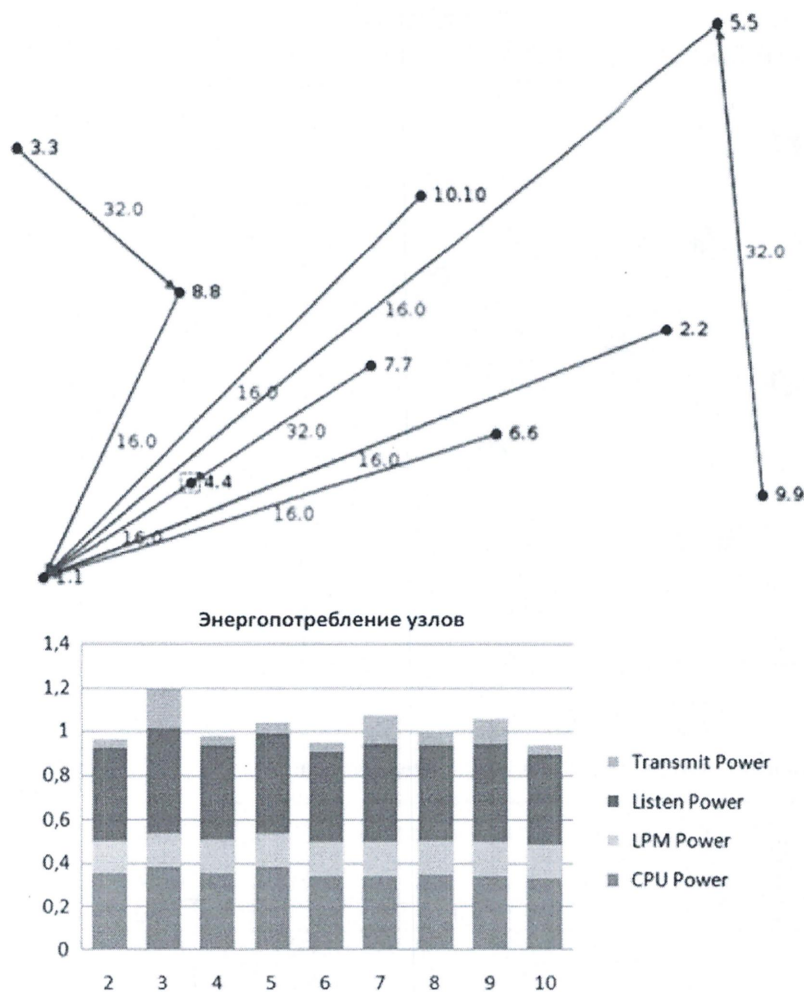


Рис. 7. Сенсорная карта подключения узлов и энергопотребление узлов при мощности сигнала RSSI -40 дБ

передачи (Transmit Power), увеличилось в 2,25; 1,68 и 1,49 раза, чем среднее значение для узлов с двумя переходами до шлюза. Сенсорная карта и графики соотношения энергопотребления узлов представлены на рис. 7.

В исследуемой сети изменим значение коэффициента RX для обеспечения моделирования случайных ошибок при приеме пакета на узле назначения и установим значение данного коэффициента, равное 70. RSSI = -20, LQI = 60. Значения задержки Delay в данном исследовании не учитывались.

В табл. 4 приведены показатели производительности сети.

Результаты, полученные за 42 мин исследования поведения сенсорной сети при изменении коэффициента RX, значений мощности сигнала RSSI и индикатора качества радиоканала физического уровня LQI, показывают, что в исследуемой

Таблица 4. Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	Rtmetric	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2	41	0	1	512	16	0,360	0,153	0,466	0,073	1,051
3	41	0	2	849	32	0,413	0,151	0,570	0,355	1,489
4	41	0	1	512	16	0,369	0,152	0,505	0,097	1,123
5	41	0	1	512	16	0,393	0,152	0,504	0,102	1,151
6	41	0	1	512	16	0,350	0,153	0,453	0,094	1,050
7	41	0	2	854	32	0,354	0,153	0,495	0,184	1,186
8	41	0	1	526	16	0,358	0,153	0,471	0,107	1,089
9	41	0	2	842	33	0,355	0,153	0,504	0,204	1,216
10	41	0	1	512	16	0,340	0,153	0,430	0,080	1,004
Средние показатели производительности:				625,897	21,3	0,366	0,152	0,489	0,144	1,151

сенсорной сети отсутствуют потери пакетов, энергопотребление процессора (CPU Power), энергопотребление в режиме передачи (Transmit Power) и энергопотребление в режиме прослушивания (Listen Power) по сравнению с предыдущим исследованием (табл. 3) увеличилось в среднем в 1,03, 1,87 и 1,12 раза соответственно. Сенсорная карта и графики соотношения энергопотребления узлов представлены на рис. 8.

В сенсорной карте подключения произошли изменения оптимальных маршрутов – рис. 7 и рис. 8. Так, наилучший маршрут для узла 3 проходит через сенсорные узлы 2-1, а маршрут для подключения узла 9 проходит через сенсорные узлы 4-1. Таким образом, коэффициент случайных ошибок RX влияет на значения ETX в большей степени, чем параметр мощности сигнала RSSI и индикатор качества радиоканала физического уровня LQI.

Энергопотребление узлов увеличилось в трех режимах: прослушивания, пересылки и энергопотребление процессора по сравнению с ранее проведенными исследованиями, результаты которых представлены на рис. 7.

В исследуемой сети изменим значение коэффициента $RX = 30$, $RSSI = -20$, $LQI = 60$.

В табл. 5 приведены показатели производительности сети.

Результаты, полученные за 45 мин исследования поведения сенсорной сети при изменении коэффициента RX и значений мощности сигнала RSSI, а также значения индикатора качества радиоканала физического уровня LQI показывают, что в исследуемой сенсорной сети потери пакетов увеличились значительно – с одного до 16, причем все потерянные пакеты относятся к узлам, подключенным через несколько промежуточных узлов к шлюзу.

В исследуемой сенсорной сети энергопотребление процессора (CPU Power) в режиме передачи (Transmit Power) и энергопотребление в режиме прослушивания (Listen Power) по сравнению с предыдущим исследованием (табл. 4) увеличилось в среднем в 1,17; 3,93 и 1,56 раза соответственно. Также увеличились значе-

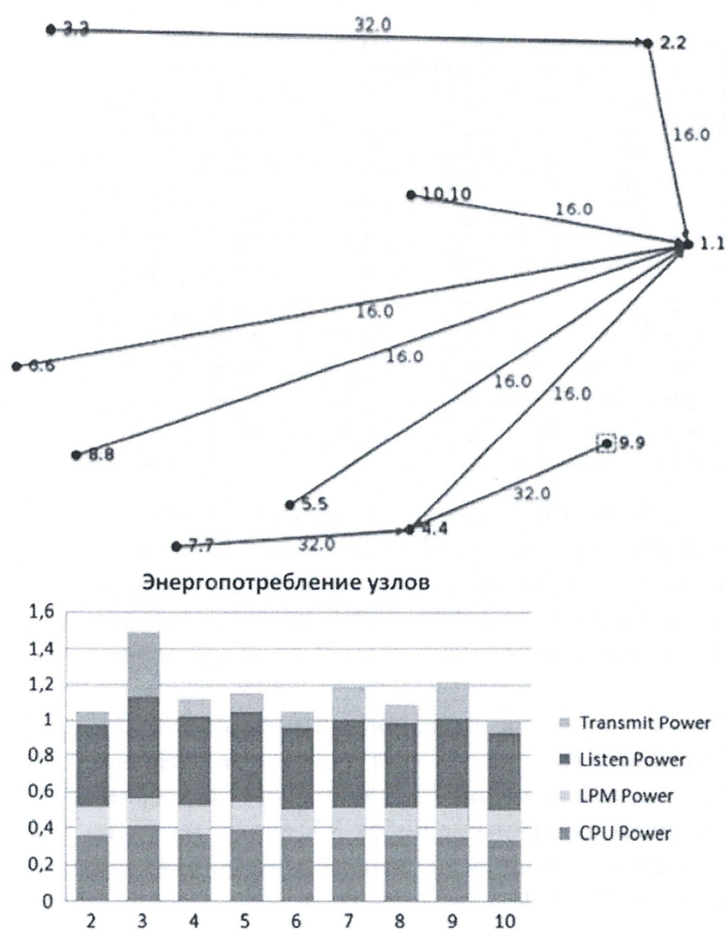


Рис. 8. Сенсорная карта подключения узлов и энергопотребление узлов при RSSI -20 дБм, LQI = 60 и коэффициента RX = 70 %

Таблица 5. Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	Rtmetric	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2	44	0	1	512	16	0,383	0,152	0,608	0,227	1,369
3	42	2	2	1809	32	0,546	0,147	1,048	1,262	3,003
4	44	0	1	513	16	0,405	0,151	0,759	0,295	1,610
5	44	0	1	512	16	0,423	0,151	0,760	0,276	1,610
6	44	0	1	512	16	0,379	0,152	0,613	0,274	1,418
7	40	5	3	1762	32	0,480	0,149	0,912	1,011	2,552
8	44	0	1	512	16	0,382	0,152	0,624	0,270	1,428
9	35	9	2	2109	32	0,494	0,149	0,951	1,109	2,703
10	44	0	1	546	17	0,381	0,152	0,570	0,372	1,475
Средние показатели производительности:				976,625	21,566	0,430	0,150	0,761	0,566	1,908

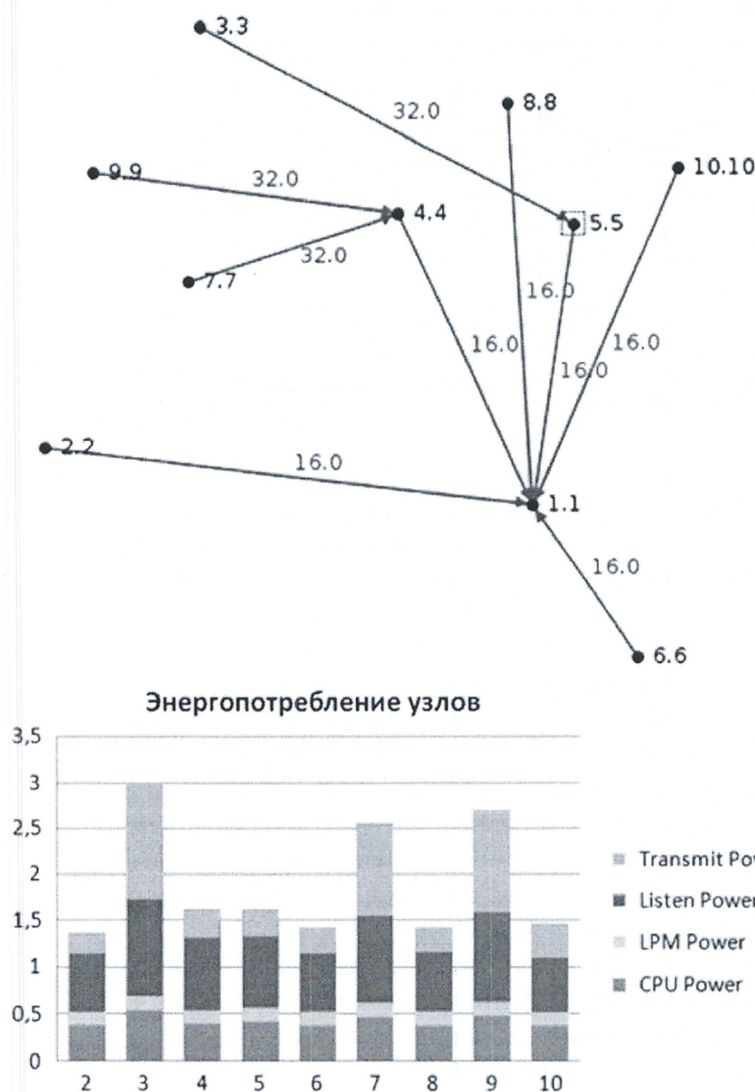


Рис. 9. Сенсорная карта подключения узлов и энергопотребление узлов при RSSI -20 дБм, LQI = 60 и коэффициента RX = 30 %

ния Rtmtric и ETX, что обусловлено потерями на канале при передаче пакетов. Сенсорная карта и графики соотношения энергопотребления узлов представлены на рис. 9.

В сенсорной карте произошли изменения оптимальных маршрутов. Так, наилучший маршрут для узла 3 проходит через сенсорные узлы 5–1. Маршруты от остальных узлов к шлюзу остались прежними.

В дальнейшем исследовании выберем $RX = 70$, $RSSI = -20$, $LQI = 60$ и добавим задержку в 1 мс.

Таблица 6. Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	Rtmetric	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2										
3	1	0	2	5376	176	0,425	0,151	1,0,22	0,490	2,086
4	9	24	2	5376	176	0,558	0,147	1,361	1,428	3,493
5	30	13	1	3017	33	0,555	0,147	1,278	1,171	3,151
6	2	27	2	5376	176	0,468	0,149	0,920	0,956	2,493
7										
8	37	4	1	2816	16	0,465	0,149	0,929	0,875	2,419
9										
10	37	4	1	2816	16	0,470	0,149	0,931	0,974	2,524
Средние показатели производительности:				4129	107,43	0,489	0,149	1,073	0,982	2695

В табл. 6 приведены показатели производительности сети.

Результаты, полученные за 43 минуты исследования поведения сенсорной сети при добавлении задержки, показывают, что в сети увеличились потери: за время исследования потеряно 72 пакета, доставлено 116 (потери составляют 62 % от числа доставленных пакетов).

Узлы 2, 7 и 9 за исследуемое время к сенсорной сети не подключились. Увеличилось значение Rtmetric и ETX для всех узлов, что обусловлено потерями пакетов. Энергопотребление процессора (CPU Power) в режиме передачи (Transmit Power) и энергопотребление в режиме прослушивания (Listen Power) по сравнению с предыдущим исследованием (табл. 5) увеличилось в среднем в 1,13; 1,73 и 1,41 раза соответственно. При наличии ошибок приема и потери пакетов для успешной передачи пакета в узел назначения необходима повторная пересылка, что и объясняет увеличение энергопотребления узлов. Сенсорная карта и графики соотношения энергопотребления узлов представлены на рис. 10.

Анализ показывает, что к шлюзу напрямую подключились узлы 8, 5 и 10, остальные узлы подключились через дополнительный узел, а не напрямую (узлы 3, 6 и 4), как это было ранее. Узлы 2, 7 и 9 не подключились к сенсорной сети за выполненное время исследования и отсутствуют в сенсорной карте.

Так как к сети подключились не все узлы, время исследования было увеличено до 1 ч 47 мин. При увеличении времени исследования к сенсорной сети подключились также узлы 2, 7 и 9 (рис. 11, табл. 7).

С увеличением времени исследования для узлов 2, 7 и 9 измерено время подключения к сенсорной сети в 67, 73 и 106 мин (время подключения к сети находилось как общее время исследования за вычетом потерянных и полученных пакетов). В исследуемой сенсорной сети увеличились потери, за время исследования потеряно 330 пакетов, доставлено 324, немного снизилось энергопотребление. При этом установлено, что показатели потерь меньше у узлов, подключенных к шлюзу напрямую, поэтому при наличии в сети задержек эффективнее использовать метод кластеризации, рассмотренный в [12].

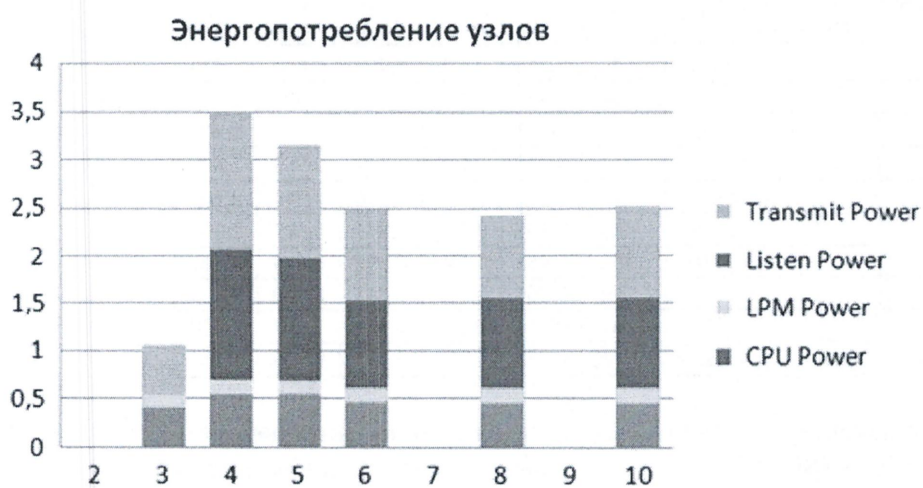
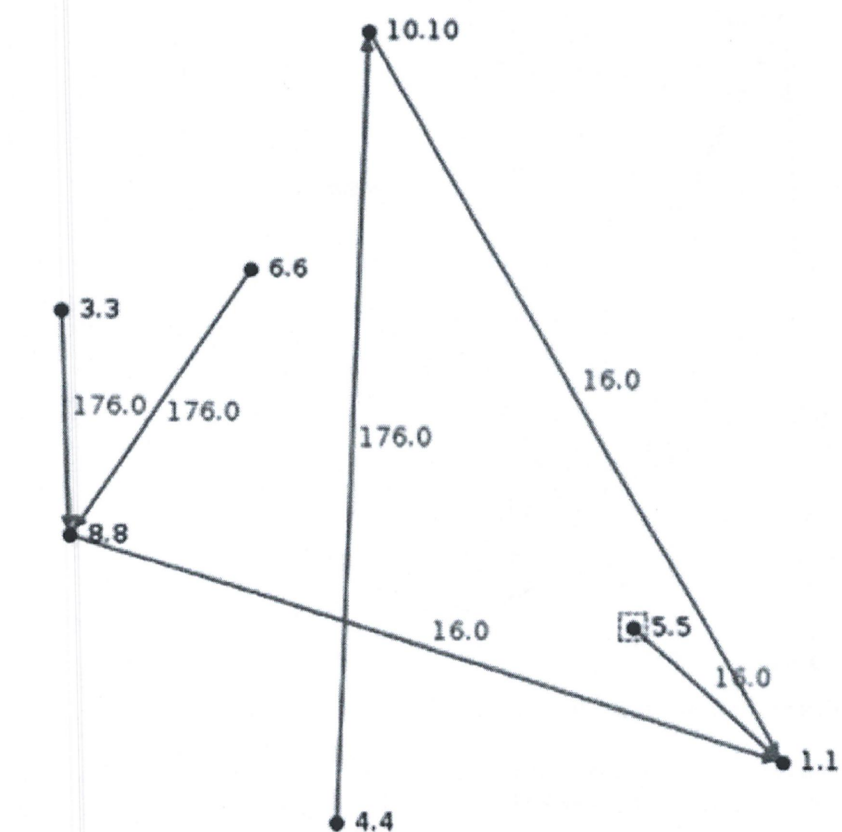


Рис. 10. Сенсорная карта подключения узлов и энергопотребление узлов при RSSI -20 дБм, LQI = 60, RX = 70 % и Delay = 1

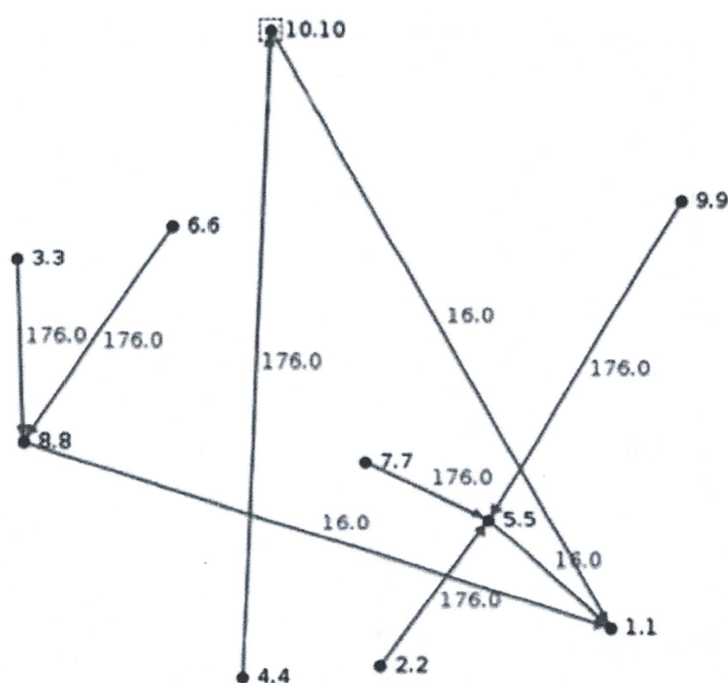


Рис. 11. Сенсорная карта подключения узлов

Таблица 7. Показатели производительности сенсорной сети при увеличении времени исследования

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	Rtmetric	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2	4	36	2	5376	176	0,456	0,150	0,908	0,820	2,334
3	5	75	2	5376	176	0,450	0,150	0,963	0,642	2,204
4	22	81	2	5376	176	0,513	0,148	1,143	1,188	2,993
5	92	15	1	2895	22	0,522	0,148	1,149	0,983	2,802
6	5	73	2	5376	176	0,436	0,150	0,836	0,743	2,165
7	3	32	2	5376	176	0,408	0,151	0,845	0,602	2,006
8	97	7	1	2816	16	0,458	0,150	0,892	0,849	2,349
9	1	0	2	5376	176	0,407	0,151	0,747	0,600	1,905
10	95	11	1	2816	16	0,473	0,149	0,910	1,007	2,539
Средние показатели производительности:				4529,62	123,26	0,458	0,150	0,933	0,826	2,366

В исследуемой сети изменим задержку до 2 мс, значения остальных параметров установлены: RX = 70, RSSI = -20, LQI = 60. В табл. 8 приведены показатели производительности сети.

Результаты, полученные за 45 мин исследования поведения сенсорной сети при увеличении задержки до 2 мс в сенсорной сети, показывают, что в сети уменьшились потери по сравнению с исследованием, проведенным при задержке

Таблица 8. Показатели производительности сенсорной сети

Сенсорные узлы	Получено пакетов	Потеряно пакетов	Количество переходов	Rtmetric	ETX	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
2	35	2	1	2816	16	0,416	0,151	0,900	0,771	2,239
3	4	8	2	5376	176	0,413	0,151	0,968	0,748	2,279
4	36	4	1	2816	16	0,470	0,149	1,000	1,047	2,666
5	6	1	1	2816	16	0,444	0,150	1,058	0,937	2,590
6	2	4	2	3328	48	0,341	0,153	0,624	0,328	1,446
7	1	0	2	3328	48	0,456	0,150	0,977	1,001	2,584
8	42	1	1	2816	16	0,408	0,151	0,821	0,779	2,159
9	3	9	2	5376	176	0,390	0,152	0,770	0,643	1,955
10	36	2	1	2816	16	0,447	0,150	0,866	1,002	2,465
Средние показатели производительности:				3498,67	58,67	0,421	0,151	0,887	0,806	2,265

в 1 мс (табл. 7): за время исследования потерян только 31 пакет, доставлено 165. Наибольшие потери у узлов 3 и 9, подключенных через два перехода к шлюзу.

Узел 7 подключился к шлюзу только на 44-й минуте исследования. Снизилось энергопотребление (рис. 8) процессора, энергопотребление в режиме передачи и энергопотребление в режиме прослушивания в 1,09; 1,02 и 1,05 раз соответственно ниже по сравнению с предыдущими показателями (табл. 7). Сенсорная карта и графики соотношения энергопотребления узлов представлены на рис. 12.

Изменения обусловлены тем, что больше узлов подключилось к шлюзу через один переход и в сети за счет этого потери оказались меньшими (рис. 12). Таким образом, к шлюзу напрямую подключились пять узлов, а именно 2, 4, 5, 8 и 10, оставшиеся подключились к шлюзу через дополнительный узел (узлы 3, 6, 7 и 9).

Таким образом, можно констатировать, что наилучшие показатели производительности как с $RX = 70\%$, так и с $RX = 50\%$ [13] были получены в сети с задержкой в 2 мс, так как большее количество узлов подключилось к шлюзу напрямую.

По результатам проведенного численного эксперимента можно сделать следующие выводы:

в отсутствии ошибок ($RX = 100\%$) параметры мощности сигнала RSSI в диапазоне от -10 до -75 дБм и индикатора качества радиоканала физического уровня в диапазоне LQI от 60 до 105 практически не влияют на показатели производительности сенсорной сети: в сенсорной сети отсутствуют потери, энергопотребление в среднем ниже в режиме передачи Transmit Power на 47 %, энергопотребление в режиме прослушивания ListenPower ниже на 11 % и энергопотребление процессора на 3 % ниже по сравнению с моделью, учитывающей случайные ошибки при приеме пакета ($RX = 70\%$);

коэффициент $RX = 70\%$, моделирующий случайные ошибки при приеме пакета на узле назначения значительно увеличивает энергопотребление узлов в среднем на 53 %, что обусловлено необходимостью повторной пересылки пакетов. Экспериментально установлено, что значение коэффициента RX не должно быть меньше, чем 70 %, т. е. качество канала должно быть не ниже среднего;

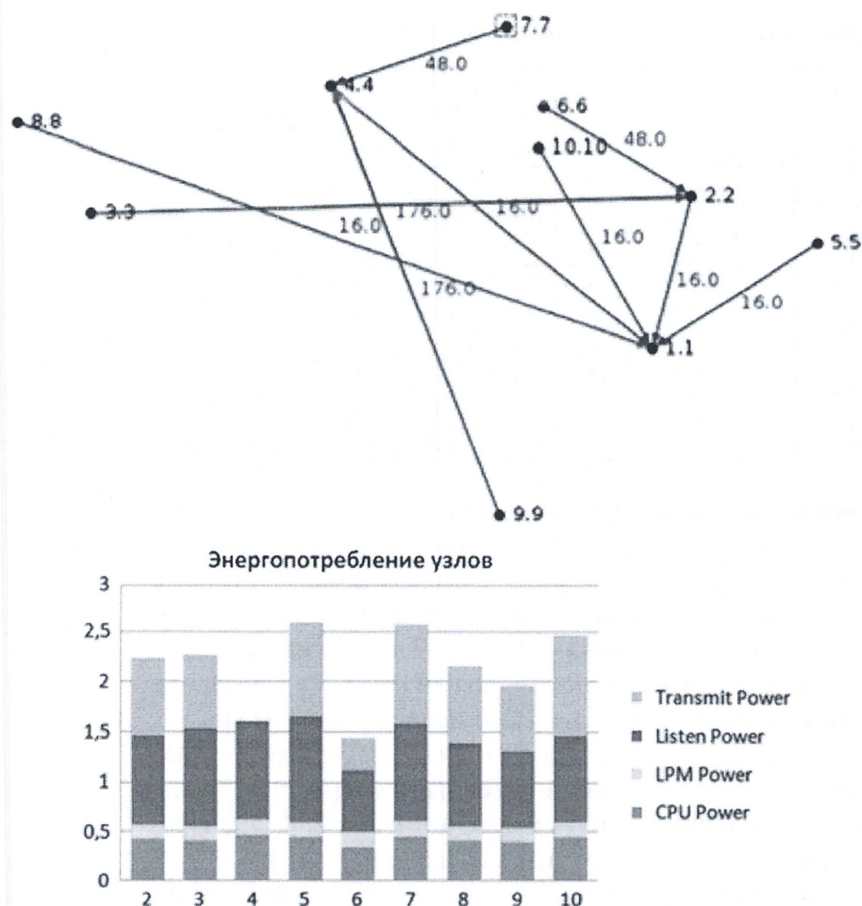


Рис. 12. Сенсорная карта подключения узлов и энергопотребление узлов при RSSI -20 дБм, LQI = 60, RX = 70 % и Delay = 2

задержки в каналах влияют на количество потерянных пакетов и на время подключения узлов к сети, причем при задержке в 2 мс к шлюзу напрямую подключилось 56 % узлов. При задержке в 1 мс к шлюзу подключилось только 30 % от всех узлов, остальные узлы подключились к шлюзу через промежуточный узел, что намного ухудшает параметры производительности сети. При задержке в 3 мс подключилось к сенсорной сети только 44 % узлов, что недопустимо при использовании в промышленном интернете вещей.

Таким образом, для повышения эффективности профилактического обслуживания устройств промышленного интернета вещей необходимо контролировать такие параметры, как энергопотребление и наличие ошибок. При наличии в сети задержек и необходимости передачи данных, чувствительных к задержкам, необходимо использовать как методы кластеризации, так и методы оптимального размещения сенсорных датчиков.

Заключение. Результаты проведенного исследования показывают, что ключевые задачи обеспечения устойчивого функционирования промышленного интернета вещей должны решаться путем оптимизации процессов сетевого взаимодействия на различных уровнях архитектурных решений.

Представлены новые методы оптимизации процессов сбора и передачи данных в сетях промышленного интернета вещей, объединяющие кластеризацию и маршрутизацию. Проведена апробация методов сбора и обработки информации в IIoT путем проведения численных экспериментов в среде моделирования Contiki. Проведенные численные эксперименты показали, что использование протокола RPL, а также кластеризации позволяют обеспечить высокую эффективность процессов сбора и передачи информации и, соответственно, всей системы промышленного интернета вещей.

Показано, что основными критериями оптимальности, относящимися к передаче данных в сетях промышленного интернета вещей, являются следующие:

- задержка, которая может по-разному рассчитываться в зависимости от используемой модели передачи данных по телекоммуникационной сети;

- пропускная способность, позволяющая определить количество данных, которые могут быть переданы в единицу времени;

- потери, возникающие на канальном уровне из-за возникновения коллизий, а также на уровне маршрутизации из-за некорректно построенного маршрута, а также при выходе одного из узлов из строя;

- время жизни пакетов в сети, определяемое как промежуток времени, в течение которого сеть сможет обеспечивать передачу данных;

- покрытие заданной области, которое оценивается относительно того, какая часть территории, с которой собираются данные или ведется контроль, находится в радиусе действия сенсоров;

- устойчивость сети к изменению топологии – беспроводная сенсорная сеть должна функционировать в условиях изменения топологии: при выходе узла из строя, по истечению срока его действия, при добавлении новых узлов или перемещении существующих.

Установлено, что одним из перспективных подходов к оптимизации процессов сбора и передачи данных в сенсорных сетях является разработка и внедрение эффективных алгоритмов кластеризации. Сенсоры, находящиеся по метрикам маршрутизации непосредственно перед шлюзом, без распределения по кластерам будут испытывать повышенную нагрузку, что влечет за собой как потенциальные простои в работе, так и быстрый разряд источника питания. Таким образом, реализация кластерного подхода позволит существенно повысить надежность функционирования сетей передачи данных интернета вещей, что и было доказано в результате проведенного моделирования.

Таким образом, представлено теоретическое обоснование эффективного функционирования промышленного Интернета вещей с обеспечением необходимой производительности сетей передачи данных и заданного качества обслуживания,

включающее новые функциональные модели сети с учетом анализа ее состояния и обеспечения надежности и безопасности, новые методы оптимизации процессов сбора и передачи данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф23КИ-038).

Литература

1. Лавишук О. А. // Современные средства связи: XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., 26–27 окт. 2023 г. Минск, 2023. С. 110–111.
2. Kamgueu P. O., Nataf E., Ndié T. D., Festor O. // INRIA, Roquencourbe, France, 2013. P. 14.
3. Kim H.-S., Kim H., Paek J., Bahk S. // IEEE Transaction on Mobile Computing. 2017. Vol. 16. N 4. P. 964–979.
4. Tang W., Ma X., Huang J., Wei J. // Hindawi Journal of Sensors. 2016. Vol. 2016. P. 11.
5. Taghizadeh S., Bobarshad H., Elbiaze H. // IEEE Access. 2018. Vol. 6. P. 23277–23291.
6. Лавишук О. А., Листопад Н. И. // Материалы науч.-техн. конф. «Информационные радиосистемы и радиотехнологии», Минск, 29–30 нояб. 2022 г. Минск, 2022. С. 263–268.
7. Sanmartin P., Rojas A., Fernandez L. et al. // Sensors. 2018. Vol. 18, N 4. P. 1277.
8. Лавишук О. А. // Материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. «Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи». Минск, 2023. С. 56–57.
9. Лавишук О. А., Листопад Н. И. // Проблемы инфокоммуникаций. 2023. № 1(17). С. 67–77.
10. Лавишук О. А., Листопад Н. И. // Проблемы физики, математики и техники. 2023. № 4(57). С. 74–80.
11. Воротицкий Ю. И. // Материалы III Междунар. науч.-практ. конф. «CTDA'2022 Компьютерные технологии и анализ данных», Минск, 21–22 апр. 2022 г. Минск: БГУ, 2022. С. 185–187.
12. Листопад Н. И., Лавишук О. А. // Доклады БГУИР. 2022. № 20(3). С. 45–53.
13. Лавишук О. А., Листопад Н. И. // Материалы научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2024», 21–22 нояб. 2024 г. Минск, 2024. С. 309–313.

N. I. LISTOPAD, O. A. LAVSHUK

MODELLING OF INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT RELIABILITY AND EFFICIENCY REQUIREMENTS

Summary

Based on the results of modeling industrial Internet of Things networks with various parameters and quality of service requirements, an assessment of their efficiency was made at various signal levels, with errors in receiving and delays in transmitting data from sensors and routers, taking into account such an important parameter as energy consumption. It was found that if there are delays in the Internet of Things network and there is a need to transmit delay-sensitive data, it is advisable to use clustering methods and optimal placement of sensors. A theoretical justification for the efficient operation of the industrial Internet of Things is presented, ensuring the required performance of data transmission networks and a given quality of service.