

## МЕТОД МАРШРУТИЗАЦИИ В СЕТЯХ IIoT С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ПРОТОКОЛА RPL

О.А. Лавшук<sup>1</sup>, Н.И. Листопад<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусская государственная академия связи, Минск

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

## ROUTING METHOD IN IIoT NETWORKS USING CLUSTERING FOR THE RPL PROTOCOL

O.A. Lavshuk<sup>1</sup>, N.I. Listopad<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State Academy of Telecommunications, Minsk

<sup>2</sup>Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

**Аннотация.** Рассмотрен принцип работы протокола RPL для сетей с низким энергопотреблением и потерями. Выполнено моделирование и проводится оценка протокола RPL. Обоснована необходимость использования кластеризации для больших одноранговых сетей промышленного Интернета вещей. Предложен алгоритм выбора главных узлов в кластерах и разработаны два алгоритма расчета рангов при определении наилучших маршрутов от главных узлов в кластере к шлюзу.

**Ключевые слова:** интернет вещей, шлюз, сенсорный узел, надежность передачи, режимы энергопотребления, кластеризация.

**Для цитирования:** Лавшук, О.А. Метод маршрутизации в сетях IIoT с использованием кластеризации для протокола RPL / О.А. Лавшук, Н.И. Листопад // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 4 (57). – С. 74–80. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_4\\_57\\_74](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_74). – EDN: RVSCGG

**Abstract.** The article describes the principle of operation of the RPL protocol for networks with low power consumption and losses. Modeling has been done and the RPL protocol is being evaluated. The necessity of using clustering for large peer-to-peer networks of the industrial Internet of things is substantiated. An algorithm for choosing the main nodes in clusters is proposed and two algorithms for calculating ranks are developed when determining the best routes from the main nodes in the cluster to the gateway.

**Keywords:** Internet of things, gateway, sensor node, transmission reliability, power consumption modes, clustering.

**For citation:** Lavshuk, O.A. Routing method in IIoT networks using clustering for the RPL protocol / O.A. Lavshuk, N.I. Listopad // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 4 (57). – P. 74–80. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_4\\_57\\_74](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_4_57_74) (in Russian). – EDN: RVSCGG

### Введение

Промышленный Интернет вещей (IIoT) зависит от данных, собираемых многими датчиками, контроллерами и серверами. IIoT улучшает производство, используя надежную и безопасную связь между промышленными объектами при поддержке новых вычислительных технологий.

В промышленных сетях количество подключенных устройств быстро увеличивается, что влечет проблемы связанные с маршрутизацией и безопасностью.

Беспроводная сенсорная сеть состоит из небольших устройств, соединенных по радиоканалу. Сенсорные устройства имеют ограниченные ресурсы, такие как энергия, память и вычислительная мощность. В этой области проводится множество исследований. Например, какие протоколы связи являются наиболее энергоэффективными и обеспечивают наибольший срок службы [1].

Сети, работающие по протоколу RPL, привязаны к корневому маршрутизатору, который обычно действует как пограничный в сетях 6LoWPAN, т. е. обеспечивает маломощную сенсорную сеть с подключением к внешним сетям Internet.

Как известно [1] RPL (Routing Protocol for Low energy and Lossy networks) – это протокол для сетей с низким потреблением энергии и потерями, в основе которого лежат направленные ациклические графы DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph). Протокол RPL образует древовидную топологию (рисунок 0.1), также называемую DAG (Directed Acyclic Graph). У каждого узла в сети RPL есть предпочтительный родитель, который действует как шлюз для этого узла. Если узел не имеет записи в своей таблице маршрутизации для пакета, узел просто пересылает его своему предпочтительному родителю и так далее, пока он не достигнет пункта

назначения или общего родителя, который пересылает его вниз по дереву к месту назначения. Это означает, что узлы, расположенные ближе к корневому узлу, имеют большие таблицы маршрутизации. [2]

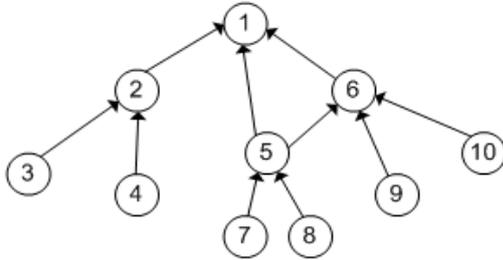


Рисунок 0.1 – Топология сети RPL

RPL использует три типа управляющих сообщений для создания и поддержки топологии RPL и таблицы маршрутизации. Этими сообщениями являются: информационный объект DODAG (DIO), запрос информации DODAG (DIS) и объект объявления пункта назначения DODAG (DAO). Сообщения DIO используются RPL для формирования, поддержки и обнаружения DODAG. Когда сеть RPL запускается, узлы начинают обмениваться информацией о DODAG с помощью сообщений DIO, которые содержат информацию о конфигурации DODAG и помогают узлам присоединиться к DODAG и выбрать родителей. DIS используется любым узлом для явного запроса сообщений DIO от соседних узлов. Он запускается узлом в случае, если он не может получить DIO через заданный интервал времени.

Протокол RPL поддерживает две целевые функции: MRHOF для нахождения оптимального пути использует метрику ETX. OFO для нахождения оптимального пути использует количество переходов. Целевая функция определяет, как узел RPL выбирает и оптимизирует маршруты в протоколе RPL на основе доступных информационных объектов.

ETX отражает потерю пакетов, учитывая качество беспроводного канала и коллизии пакетов. ETX зависит от расстояния между двумя узлами, так как вероятность успешной передачи уменьшается с увеличением расстояния. ETX можно уменьшить за счет увеличения мощности передач узлов, но это увеличит диапазон помех в беспроводной среде. ETX можно представить формулой (0.1):

$$ETX = \frac{1}{D_f \times D_r}, \quad (0.1)$$

где  $D_f$  – вероятность успешного получения пакетов соседним узлом;  $D_r$  – вероятность успешного получения подтверждения.

## 1 Моделирование в ОС Contiki

При проведении исследования нами использовался симулятор COOJA, в котором были выбраны сенсорный узел на базе платформы Skymote, выступающий в роли пограничного маршрутизатора в сети IPv6, и сенсорная сеть, содержащая 40 сенсорных узлов, расположенных случайным образом (рисунок 1.1) и выступающих в качестве отправителя. Пограничный маршрутизатор (шлюз) выполнял настройку префикса сети и инициировал создание дерева маршрутизации по протоколу RPL.

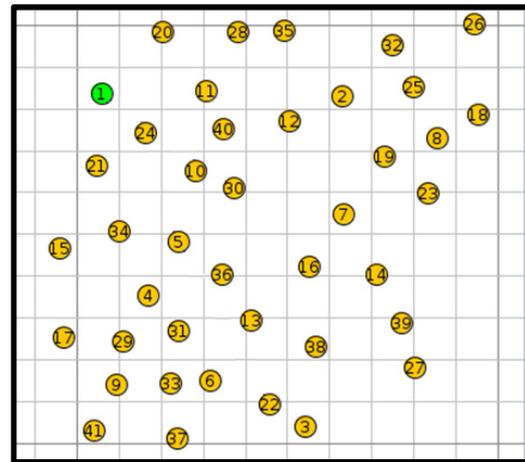


Рисунок 1.1 – Топология беспроводной сенсорной сети с 40 узлами

Было выполнено моделирование беспроводной сенсорной сети в симуляторе COOJA и произведено сравнение основных показателей производительности: различные режимы энергопотребления, количество отправленных пакетов, количество потерянных пакетов, ETX и количество переходов при подключении к шлюзу.

В таблице 1.1 представлены следующие обозначения: LPM Power – это режим низкого энергопотребления, когда сигнал на радиочастоте отсутствует (высокочастотный блок выключен), а микроконтроллер находится в режиме ожидания. CPU Power – это энергопотребление процессором. Listen Power – это энергопотребление в режиме прослушивания. Transmit Power – это энергопотребление в режиме пересылки. Power – это общее энергопотребление для всех режимов.

$$Power = CPU\ Power + LPM\ Power + Listen\ Power + Transmit\ Power \quad (1.1)$$

Результаты моделирования приведены в таблице 1.1 в порядке убывания общего энергопотребления для исследуемой сенсорной сети.

Исходя из результатов проведенного моделирования, можно отметить неравномерную балансировку нагрузки и, соответственно, более высокое потребление энергии некоторыми

сенсорными узлами. Так, в рассматриваемой топологии наибольшая нагрузка у сенсорного узла 5, для которого общее энергопотребление составляет 1,823 мВт за 10 минут исследования, что на 43% больше среднего энергопотребления для всех узлов. Также загруженными узлами будут узлы 36, 12, 38 и 19, для которых общее энергопотребление составляет 1,491 мВт., 1,464 мВт., 1,434 мВт и 1,401 мВт соответственно, что на 41%, 39%, 36%, 33 % больше среднего энергопотребления.

На рисунке 1.2 представлена сенсорная карта исследуемой сети.

Из приведенной сенсорной карты подключений можно заметить, что к узлу 5 подключилось большое количество сенсорных узлов по сравнению с другими узлами, так как узел 5 лучший по метрике ETX для всех подключенных к нему узлов.

Таблица 1.1 – Показатели производительности сенсорной сети из 40 узлов

Сенсорные узлы	CPU Power, мВт	LPM Power, мВт	ListenPower, мВт	TransmitPower, мВт	Power, мВт	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	26,18	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	25,24	9	0
19	0,517	0,148	0,638	0,098	1,401	2	34,1	9	0
13	0,554	0,147	0,575	0,12	1,397	2	26,36	9	0
2	0,533	0,147	0,511	0,159	1,351	2	27,68	10	0
29	0,535	0,147	0,538	0,128	1,348	2	25,24	9	0
9	0,47	0,149	0,614	0,112	1,346	2	25,24	9	0
4	0,531	0,147	0,561	0,092	1,333	2	25,24	9	0
16	0,539	0,147	0,566	0,075	1,327	2	26,35	9	0
6	0,523	0,148	0,538	0,115	1,323	2	25,24	9	0
30	0,55	0,147	0,54	0,072	1,308	1	16	10	0
10	0,534	0,147	0,539	0,085	1,305	1	16	9	0
25	0,46	0,15	0,546	0,148	1,304	2	29,92	9	0
14	0,511	0,148	0,518	0,124	1,302	2	29,35	10	0
7	0,538	0,147	0,542	0,069	1,296	2	25,11	10	0
40	0,544	0,147	0,527	0,07	1,288	1	16	9	0
21	0,501	0,148	0,509	0,126	1,284	1	16	9	0
31	0,533	0,147	0,51	0,084	1,275	2	25,11	10	0
35	0,49	0,149	0,537	0,09	1,266	1	16	9	0
15	0,464	0,149	0,572	0,08	1,265	1	16	9	0
39	0,464	0,149	0,464	0,17	1,247	3	38,9	10	0
32	0,461	0,15	0,481	0,149	1,24	2	32,51	9	0
17	0,461	0,15	0,493	0,13	1,233	2	25,26	9	0
23	0,472	0,149	0,497	0,101	1,219	2	28,03	9	0
11	0,491	0,149	0,494	0,072	1,206	1	16	9	0
3	0,448	0,15	0,477	0,124	1,199	3	47,25	9	1
33	0,493	0,149	0,481	0,076	1,198	2	25,11	10	0
34	0,5	0,148	0,478	0,059	1,186	1	16	9	0
22	0,506	0,148	0,458	0,063	1,175	2	25,36	8	0
24	0,482	0,149	0,48	0,06	1,171	1	16	9	0
37	0,456	0,15	0,489	0,069	1,164	2	26,39	9	0
8	0,445	0,15	0,479	0,087	1,161	2	27,68	10	0
18	0,412	0,151	0,478	0,098	1,139	2	29,95	9	0
27	0,403	0,151	0,464	0,112	1,13	3	43,94	9	0
26	0,392	0,152	0,463	0,112	1,118	2	38,36	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	37,44	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				

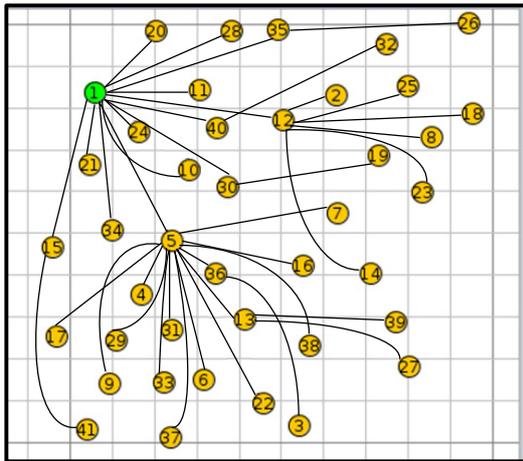


Рисунок 1.2 – Сенсорная карта подключения

Таким образом, недостатком протокола RPL является несбалансированная нагрузка, что приводит к тому, что к одному узлу может подключиться большое количество узлов и, как следствие, к расходованию большей энергии и разрядке батареи этого сенсорного узла. В нашем исследовании это узел 5. Все сенсорные узлы имеют батареи с ограниченным зарядом, батареи узлов с более высокой нагрузкой расходуют энергию быстрее и могут отключаться от беспроводной сенсорной сети. Как правило, такие узлы находятся близко к корню. 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.

Сетевая кластеризация – это один из методов снижения энергопотребления и увеличения срока службы сети. Общая беспроводная сенсорная сеть делится на разные кластеры (рисунок 1.3) [3]–[6].

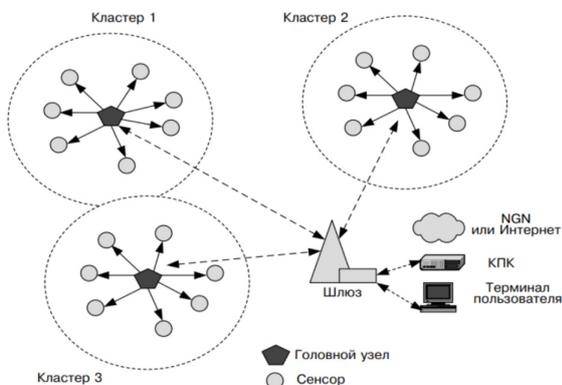


Рисунок 1.3 – Пример кластерной архитектуры

В нашем исследовании были выбраны четыре кластера. В каждом кластере в качестве

главного узла выбраны те узлы, где самое высокое значение остаточной энергии, т. е. те у которых наибольший процент заряда.

Остаточная энергия была рассчитана по следующей формуле:

$$\text{Остаточная энергия} = \text{Общая энергия} - \text{Количество потребляемой энергии узлами} \quad (1.2)$$

Количество потребляемой энергии узлами была рассчитана по следующей формуле:

$$\begin{aligned} \text{Количество потребляемой энергии узлами} = \\ = \text{CPU Power} + \text{LPM Power} + \text{Listen Power} + \\ + \text{Transmit Power} \end{aligned} \quad (1.3)$$

В протоколе RPL сообщение DIO содержит расстояние, номер версии, ранг и целевую функцию, которая используется для расчета ранга. Все узлы после получения сообщения DIO выбирают корень в качестве своего предпочтительного родителя, а затем вычисляют свой собственный ранг в соответствии с выбранной целевой функцией. Затем каждый узел отправляет свое сообщение DIO, содержащее его новый ранг всем своим соседям. Каждый узел после получения сообщения DIO проверяет свой ранг с присланным. Если полученный ранг выше, чем собственный, такое сообщение сбрасывается. Если же полученный ранг ниже, чем собственный, узел добавляет единицу к расстоянию идентификатор узла-отправителя в свою таблицу маршрутизации. Это расстояние позволяет рассчитать количество потомков на узел при построении DODAG и может использоваться для балансировки нагрузки.

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

$$\text{newRank} = \text{ETX} / \text{Остаточную энергию} \quad (1.4)$$

Узел с рангом ниже выбирается в качестве главного узла в кластере. Внесем изменение в функцию calculate\_rank(). И выполним моделирование.

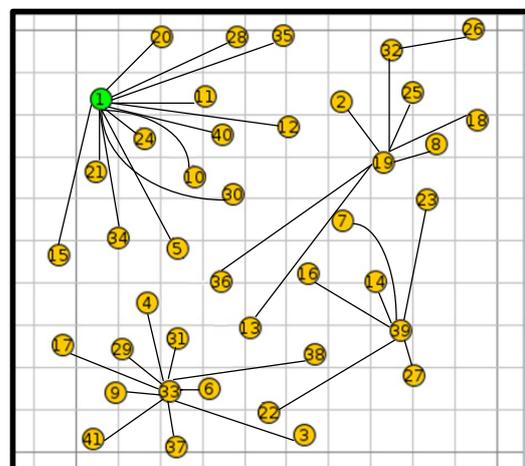


Рисунок 1.4 – Сенсорная карта подключения с использованием кластеризации

Результаты моделирования приведены в таблице 1.2 в порядке убывания общего энергопотребления для исследуемой сенсорной сети с измененным расчетом ранга. А результат подключения к главному узлу кластера показан на рисунке 1.4.

Проанализировав полученный результат, можно обратить внимание, что нет таких загруженных узлов, как в результатах, представленных в таблице 1.1 (узел 5). И общее количество затраченной энергии всеми узлами примерно одинаковое, что показывает лучшие результаты по балансировке нагрузки. Но количество подключенных узлов к кластерам оказалось неравномерным, что обуславливает необходимость

усовершенствования в дальнейшем самого алгоритма, добавив возможность подсчета подключенных узлов.

После выбора главных узлов кластера и формирования кластеров необходимо вычислить новый ранг для всех главных узлов в кластерах, которые будут отправлять данные на шлюз. Был проведен анализ нового ранга, используя для этого метрику ETX (рисунок 1.5).

ETX пути с 3 переходами со 100-процентной доставкой (процентной надежностью) равен 3, тогда как ETX пути с 2 переходами с 50-процентной доставкой равен 4. В нашем случае ETX пути с одним переходом со 100-процентной доставкой, т. е. на данном пути нет потерь пакетов, равен 1.

Таблица 1.2 – Показатели производительности сенсорной сети из 40 узлов с учетом расчета нового ранга

Сенсорные узлы	CPU Power, мВт	LPM Power, мВт	ListenPower, мВт	TransmitPower, мВт	Power, мВт	Hop	ETX	Received	Lost
36	0,543	0,147	0,545	0,051	1,287	1	16	11	0
10	0,538	0,147	0,511	0,089	1,286	1	16	11	0
13	0,54	0,147	0,514	0,072	1,273	1	16	11	0
24	0,525	0,148	0,49	0,096	1,258	1	16	11	0
31	0,536	0,147	0,53	0,044	1,258	1	16	11	0
16	0,533	0,147	0,511	0,064	1,255	1	16	11	0
30	0,541	0,147	0,501	0,048	1,237	1	16	11	0
40	0,532	0,147	0,504	0,048	1,232	1	16	11	0
4	0,526	0,148	0,484	0,064	1,221	1	16	11	0
35	0,494	0,149	0,502	0,075	1,22	1	16	11	0
7	0,533	0,147	0,472	0,065	1,217	1	16	11	0
12	0,534	0,147	0,487	0,047	1,216	1	16	10	0
6	0,511	0,148	0,467	0,078	1,204	1	16	11	0
5	0,532	0,147	0,48	0,041	1,201	1	16	10	0
23	0,469	0,149	0,471	0,107	1,197	1	16	11	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
34	0,527	0,148	0,461	0,043	1,179	1	16	11	0
11	0,49	0,149	0,453	0,079	1,171	1	16	11	0
29	0,526	0,148	0,454	0,043	1,17	1	16	10	0
22	0,511	0,148	0,452	0,054	1,164	1	16	10	0
15	0,473	0,149	0,491	0,049	1,162	1	16	11	0
14	0,501	0,148	0,458	0,05	1,157	1	16	11	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
9	0,463	0,149	0,443	0,047	1,103	1	16	11	0
17	0,452	0,15	0,443	0,048	1,092	1	16	11	0
37	0,458	0,15	0,425	0,055	1,087	1	16	11	0
18	0,407	0,151	0,449	0,079	1,086	1	16	11	0
25	0,425	0,151	0,44	0,066	1,083	1	16	11	0
32	0,435	0,15	0,43	0,045	1,061	1	16	11	0
3	0,44	0,15	0,432	0,038	1,06	1	16	11	0
8	0,422	0,151	0,436	0,042	1,051	1	16	11	0
20	0,415	0,151	0,424	0,047	1,037	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	0,06	1,162				

## 2 Поиск оптимального маршрута

На рисунке 2.1 представлены возможные пути между главными узлами в кластере и шлюзом, а также значения ETX для всех путей. Так для узла 33 возможны несколько вариантов:  $33 \rightarrow \text{GW}$ ,  $33 \rightarrow 1 \rightarrow \text{GW}$ ,  $33 \rightarrow 39 \rightarrow \text{GW}$  и это далеко не все возможные варианты путей. Наша задача состоит в нахождении наилучшего маршрута от каждого главного узла кластера до шлюза. Каждый узел рассчитывает ранг всех узлов в пределах диапазона передачи и отправит сообщение узлу с минимальным рангом. Был выполнен поиск оптимального маршрута в соответствии с алгоритмом, приведенном на рисунке 2.2, от каждого главного узла кластера до шлюза с учетом рассчитанного ранга.

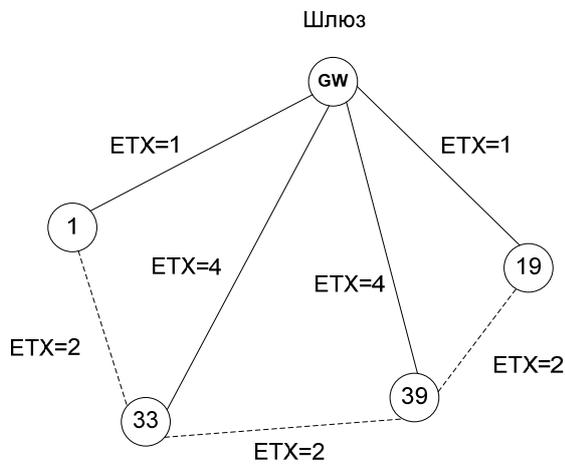


Рисунок 2.1 – Расчет ранга с учетом ETX

```

Node ID
Rank of Parents

Parent Lists for a Node X are P1, P2, P3, ..., Pn
New-Rank-Node=Infinity

1 for Parent(P) ∈ P1, P2, P3, ..., Pn do
2 NewRank(Child) = Rank(P)+ETX
3 if NewRank(Child) > Rank(Child) then
4 NewRank(Child) = Rank(Child)
5 Select_Parent = Preferred_Parent_ID
6 end if
7 end for
8 Return Select_Parent
    
```

Рисунок 2.2 – Алгоритм расчета ранга с учетом ETX

Так для главного узла кластера 33 таким маршрутом будет  $33 \rightarrow 1 \rightarrow \text{GW}$  с рангом пути 3, для 39 –  $39 \rightarrow 19 \rightarrow \text{GW}$  с рангом пути 3. Алгоритм на рисунке 1.6 находит наиболее надежный

путь, но не учитывает энергопотребление узлов, что важно для сети Интернета вещей. В этой связи был изменен расчет ранга с учетом энергопотребления (рисунок 2.3).

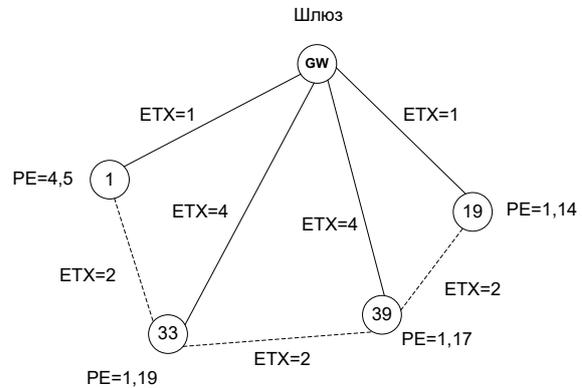


Рисунок 2.3 – Расчет ранга с учетом ETX и энергопотребления PE

На рисунке 2.3 представлены значения ETX для всех путей и общее энергопотребление для всех главных узлов в кластере. Был изменен расчет ранга в алгоритме, представленном на рисунке 2.3, добавив также общее энергопотребление. В измененном алгоритме изменилась только строка с расчетом ранга:

$$2 \quad \text{NewRank(Child)} = \text{Rank(P)} + (\text{ETX} * \text{EnergyAvg(p)})$$

Таким образом, наилучшим узлом будет узел, где ранг минимальный, т. е. этот путь более надежный и остаточная энергия наибольшая. Так, для главного узла кластера 33 таким маршрутом будет  $33 \rightarrow \text{GW}$  с рангом пути 4,56, для 39 – наилучший маршрут  $39 \rightarrow 19 \rightarrow \text{GW}$  с рангом 3,42.

Наилучшие пути для главного узла кластера 33 по двум приведенным алгоритмам оказались разными: когда учитывается энергопотребление путь  $33 \rightarrow 1 \rightarrow \text{GW}$  имеет ранг 6,88, поскольку данный узел более истощен по сравнению с другими узлами, а ранг пути  $33 \rightarrow \text{GW}$  – равен 5,56. При учете только метрики ETX путь  $33 \rightarrow 1 \rightarrow \text{GW}$  имеет ранг 3, а ранг пути  $33 \rightarrow \text{GW}$  – равен 4. А наилучшим будет тот путь, где ранг минимальный, поэтому маршруты будут отличаться. Таким образом, когда необходимо более надежная доставка ранг необходимо рассчитывать по алгоритму, приведенному на рисунке 2.3, когда же необходимо учитывать и выбирать узел с наибольшим количеством остаточной энергии, ранг необходимо рассчитывать по измененной формуле.

## Заключение

Протокол RPL обладает рядом достоинств при использовании в промышленном Интернет вещей, но, как показало проведенное моделирование, потребление энергии узлами не

сбалансировано. Чтобы исправить этот недостаток, было предложено использовать кластеризацию и, при формировании кластеров, выбирать узел с наивысшим значением остаточной энергии.

Также предложены два алгоритма определения ранга для маршрутизации от главных узлов кластера к шлюзу, учитывающие метрику ETX и общее энергопотребление.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *A Load-balancing Clustering Algorithm of WSN for Data Gathering* / Han Zhang [et al.] // IEEE 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce. – 2011. – P. 915–918.

2. *Евстифеева, Е.А.* Методика выбора головного кластерного узла в беспроводной сенсорной сети на основе нечеткой логики / Е.А. Евстифеева, В.Д. Семейкин // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2018. – № 1. – С. 81–89.

3. *Singh, A.K.* Fuzzy Logic based Clustering in Wireless Sensor Networks: A Survey / A.K. Singh,

N. Purohit, S. Varma // International Journal of Electronics. – 2012. – Vol. 100, iss. 1. – P. 126–141.

4. *Lee, J.S.* Fuzzy-Logic-Based Clustering Approach for Wireless Sensor Networks Using Energy Predication / J.-S. Lee, W.-L. Cheng // IEEE Sensors Journal. – 2012. – Vol. 12, № 9. – P. 2891–2897.

5. *Махров, С.С.* Нейросетевая кластеризация узлов беспроводной сенсорной сети / С.С. Махров // Т-Comm. – 2014. – № 6. – С. 31–35.

6. *Татарникова, Т.М.* Алгоритм роя пчел выбора головных узлов кластеров беспроводной сенсорной сети / Т.М. Татарникова, Ф. Бимбетов, Е.В. Горина // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2022. – Т. 15, № 3. – С. 15–22.

Поступила в редакцию 01.08.2023.

#### Информация об авторах

*Лавиук Ольга Александровна* – аспирантка

*Листопад Николай Измайлович* – д.т.н., профессор