

**КИБЕРФИЗИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.382.2

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕНСОРНОЙ СЕТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ**О.А. ЛАВШУК<sup>1</sup>, Н.И. ЛИСТОПАД<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»,  
ул. Ф. Скорины, 8/2, Минск, 220114, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6725-4411>

<sup>2</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики  
и радиоэлектроники», ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2220-0202>

Поступила в редакцию 24 марта 2023

В статье представлена конфигурация сети Интернета вещей в виде сенсорного устройства и самой сети Интернета вещей. Приведена архитектура беспроводного сенсорного узла в виде четырех основных подсистем: сенсорной, вычислительной, коммуникационной и подсистемы питания. Выполнен сравнительный анализ наиболее распространенных вычислительных платформ моделирования сенсорных узлов. Выполнено моделирование взаимодействия различных сенсорных узлов в операционной системе Contiki. Результаты моделирования и проведенный анализ позволил выработать рекомендации по возможности использования рассмотренных платформ в промышленном Интернете вещей.

*Ключевые слова:* Интернет вещей, шлюз, сенсорный узел, целевая функция, режимы энергопотребления, потери пакетов.

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 или масштабируемость быстро увеличивается, что влечет проблемы, связанные с маршрутизацией и безопасностью.

Датчики Интернета вещей отвечают за сбор данных в режиме реального времени. Сигналы окружающей среды наиболее часто представлены в аналоговой форме, таких как, скорость в километрах в час, температура в градусах Цельсия, расстояние в метрах. Основное назначение датчиков Интернета вещей – сбор различных данных окружающей среды и преобразование этих данных в цифровой вид.

Приведем конфигурацию сети Интернета вещей с подключенными датчиками (рис. 1).

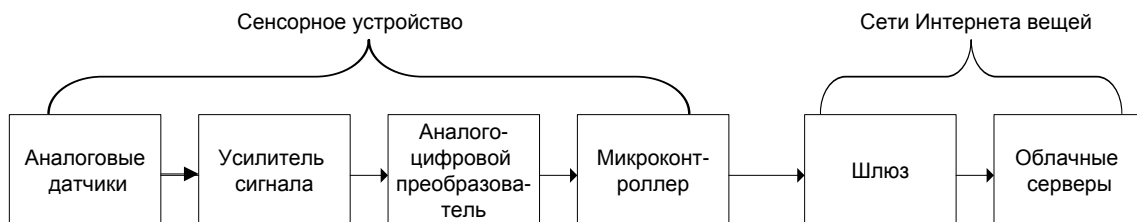


Рис. 1. Конфигурация сети Интернета вещей

Датчики являются конечными устройствами в сетях Интернета вещей. Микроконтроллер фиксирует изменения состояния датчика и по заданному алгоритму запускает к выполнению определенные действия. Шлюз выполняет пограничные вычисления. После обработки данные отправляются в облако для долговременного хранения.

Датчики бывают различных форм и размеров и могут измерить практически любую физическую величину: температуру, давление, звук, измерение света, скорость и направление движения, состав жидкости, измерение высоты и расстояния и другие. Существует множество различных типов датчиков: датчик атмосферного давления, датчик влажности, световой датчик, датчик уровня, датчик расстояния/приближения, датчик движения, ИК-сенсор, датчик температуры, датчик дыма и газа, датчик прикосновения, ультразвуковой датчик.

IoT датчики можно классифицировать по типу выходного сигнала:

- 1) аналоговые – датчики температуры, давления, влажности, освещенности, тока и напряжения, потребляемой мощности, расхода, уровня и др;
- 2) дискретные – датчики движения/перемещения, открытия/закрытия, воды/протечки;
- 3) импульсные – датчики расхода веществ;
- 4) цифровые – аналоговый датчик с подключенным цифровым преобразователем.

По потреблению энергии датчики бывают двух типов: пассивные и активные. Пассивный датчик не нуждается в дополнительном источнике энергии. Активному датчику для своей работы требуется источник внешней энергии.

**Архитектура беспроводного сенсорного узла.** Аппаратную часть беспроводного сенсорного узла можно разделить на четыре подсистемы (рис. 2): подсистема питания, сенсорная подсистема, вычислительная подсистема и коммуникационная подсистема.



Рис. 2. Архитектура беспроводного сенсорного узла

Подсистема питания предназначена для обеспечения электропитанием всех элементов беспроводного сенсорного узла. Сенсорная подсистема предназначена для измерения физической величины. Вычислительная подсистема предназначена для обработки собранных данных и функционирования сенсорного узла. Коммуникационная подсистема предназначена для соединения с другими сенсорными узлами в сенсорной сети.

**Сравнительный анализ вычислительных платформ в среде моделирования Cooja Contiki.** Выполним сравнительный анализ вычислительных платформ для исследования в среде моделирования Cooja Contiki в табл. 1.

Таблица 1

## Сравнительный анализ платформ микроконтроллеров

Характеристики	Sky mote	Zolertia Z1	Wismote
Микроконтроллер	MSP430F1611	MSP430F2617	MSP430
ЦП	16-разрядный процессор RISC с тактовой частотой 8 МГц	16-разрядный процессор RISC с тактовой частотой 16 МГц	16-разрядный процессор RISC с тактовой частотой 8 МГц
RAM, КБайт	10	8	10
FLASH, КБайт	48	92	16
I/O (макс.), шт.	48	64	128/192/256 КБ
Напряжение питания, В	от 1.8 до 3.6	от 1.8 до 3.6	от 1.8 до 3.6
Потребляемая мощность, мкА	Активный режим: 280; Режим ожидания (LPM3): 1.1; Режим пониженного напряжения (LPM4): 0.1.	Активный режим: 365; Режим ожидания (LPM3): 0.5; Режим пониженного напряжения (LPM4): 0.1.	Активный режим: 220 Режим ожидания (LPM3): 0.5; Режим пониженного напряжения (LPM4): 0.1.
Температура, °С	от -40 до 85	от -40 до 125	от -40 до 85
Измеряемые параметры	Встроенные датчики, измеряющие относительную влажность, температуру и освещенность.	Встроенный акселерометр ADXL345 и датчик температуры TMP102. Содержит набор контактов, доступных для очень простого подключения различных типов датчиков (до 4).	Может отслеживать любые физические измерения в таких областях, как окружающая среда, здравоохранение, домашнее хозяйство, интеллектуальное строительство, логистика или промышленное применение.
Достоинства	Очень низкое потребление тока и быстрый выход из спящего режима, USB-интерфейс.	Не требует дополнительного оборудования для программирования, только USB-кабель.	Сверхнизкое энергопотребление. Миниатюрные микросхемы размером 3x3мм.

На основании проведенного анализа сенсорных устройств можно сделать следующие выводы:

– сверхнизкое энергопотребление в режиме передачи у сенсорного узла Wismote 220 мкА, соответственно, срок эксплуатации выше;

– сенсорный узел Wismote выполняет измерения во многих областях, соответственно, являются более функциональными, но уступают по показателю кэш памяти процессора по сравнению с другими платформами 16 КБайт, так у сенсорного узла Skymote размер кэш в три раза выше, а у сенсорного узла Zolertia Z1 размер кэш почти в шесть раз выше;

– каждая рассмотренная платформа содержит встроенные датчики и набор контактов для подключения дополнительных датчиков, что позволяет увеличить измеряемые параметры.

**Моделирование взаимодействия различных сенсорных узлов в операционной системе Contiki.** В большинстве исследований предлагаются многочисленные модели маршрутизации протокола RPL (*Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) с новыми целевыми функциями OF (*Objective Function*).

Были предложены различные метрики маршрутизации для однородной нагрузки трафика; эти метрики основаны на атрибутах уровня узла и канала, таких как остаточная энергия узла [1], использование очереди [2], пропускная способность и задержка для выбора родителя в гетерогенной сети.

Tang и др. исследовали механизм предотвращения перегрузок и предложили составную метрику под названием CA-RPL [3]. CA-RPL определяет среднюю задержку к узлу-приемнику и вычисляет ранг каждого пути. Taghizadeh и др. [4] предложили метрику на основании потери энергии и пакетов в сценариях с высокой нагрузкой трафика.

Несмотря на то, что сети IoT состоят из разнородных устройств, в большинстве исследований рассматривались только однородные узлы.

В нашем исследовании выполнен анализ возможности взаимодействия различных платформ IoT, а также произведен подробный анализ показателей производительности сети Интернета вещей. Как отмечалось выше, в среде моделирования Cooja Contiki доступны три платформы, а именно Sky-mote, Zolertia Z1 и Wismote. На рис. 3, 4 приведены исследуемые топологии.

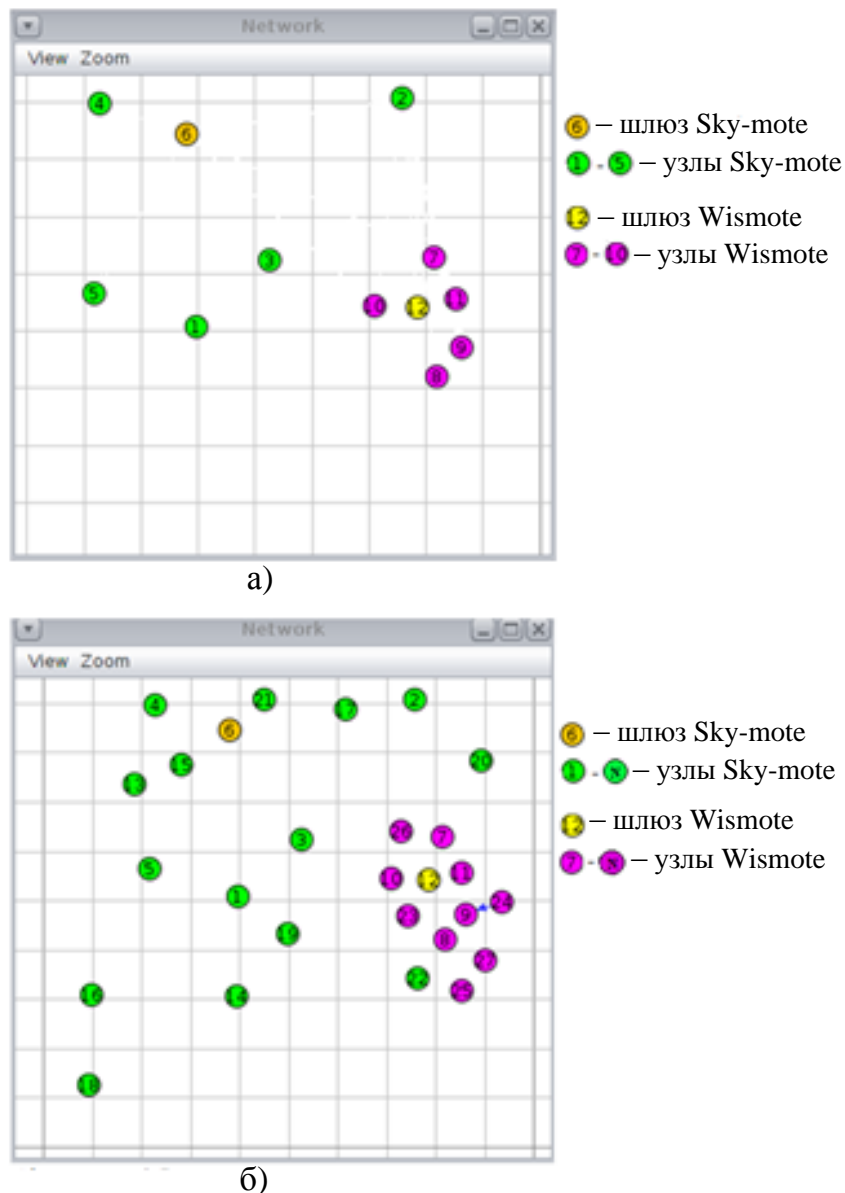


Рис. 3. Топологии сети Интернета вещей с разнородными узлами: а – сеть с 10 сенсорными узлами; б – сеть с 25 сенсорными узлами

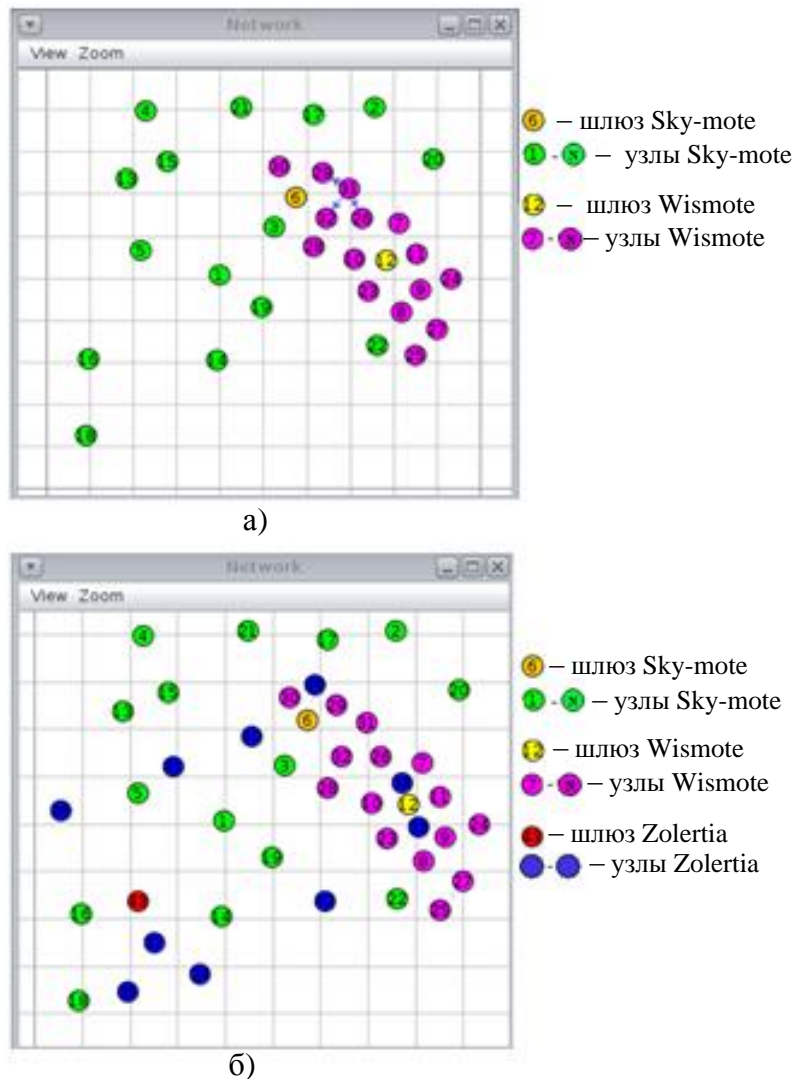


Рис. 4. Топологии сети Интернета вещей с разнородными узлами:  
 а – сеть с 30 сенсорными узлами; б – сеть с 40 сенсорными узлами

В таблицах представлены результаты для двух целевых функций протокола маршрутизации RPL: MRHOF (*Minimum Rank Objective Function with Hysteresis*) для нахождения оптимального пути может использовать различные метрики, такие как ETX, энергопотребление, задержка и другие, OF0 для нахождения оптимального пути использует в качестве метрики только количество переходов.

В таблицах 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.

$$\text{Power} = \text{CPU Power} + \text{LPM Power} + \text{Listen Power} + \text{Transmit Power}. \quad (1)$$

Из полученных результатов в табл. 2 можно заметить, что у сети из 5 сенсорных узлов платформы Sky-mote нет потерь пакетов и общее количество отправленных пакетов выше, чем у сети из 5 узлов платформы Wismote, в сети которых за час исследований при целевой функции mrhof теряется шесть пакетов.

Таблица 2

## Показатели производительности сети Интернета вещей (рис. 3а)

Платформа шлюза	Время модел., мин	Целевая функция	Общее количество отправленных пакетов	Потерянные пакеты	Максимальное количество переходов	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
Skymote	10	mrhof	48	0	1	0.331	0.153	0.389	0.054	0.929
		of0	55	0	1	0.331	0.153	0.390	0.049	0.923
	20	mrhof	95	0	1	0.327	0.154	0.383	0.035	0.899
		of0	106	0	1	0.326	0.154	0.383	0.032	0.894
	60	mrhof	300	0	1	0.322	0.154	0.377	0.016	0.87
		of0	297	0	1	0.322	0.154	0.377	0.017	0.87
Wismote	10	mrhof	41	0	3	0.031	0.163	59.818	0.007	60.018
		of0	11	0	1	0.025	0.163	59.947	0.004	60.139
	20	mrhof	87	3	3	0.029	0.163	59.905	0.008	60.105
		of0	51	0	3	0.029	0.163	59.981	0.013	60.185
	60	mrhof	286	6	3	0.028	0.163	59.966	0.007	60.164
		of0	217	1	3	0.029	0.163	59.988	0.011	60.190

Анализируя энергопотребление узлов, необходимо отметить, что в режиме низкого энергопотребления показатели рассматриваемых платформ приблизительно равны. Энергопотребление процессора выше у сенсорных узлов платформы Sky-mote в среднем в 11 раз, но в режиме прослушивания энергопотребление выше у Wismote в 150 раз, что существенно для сенсорных узлов.

Энергопотребление на пересылку пакетов ниже у Wismote, так как количество отправленных пакетов ниже согласно собранной статистике. Также у узлов платформы Wismote максимальное количество переходов равно три при одинаковом количестве узлов, что свидетельствует о небольшом радиусе действия антенны.

Добавим дополнительные узлы в рассмотренную топологию и выполним моделирования для сбора статистических данных, результаты моделирования приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Показатели производительности сети Интернета вещей (рис. 3б)

Платформа шлюза	Время модел., мин	Целевая функция	Общее количество отправленных пакетов	Потерянные пакеты	Максимальное количество переходов	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
Skymote	10	mrhof	138	0	2	0.388	0.152	0.424	0.065	1.029
		of0	140	0	2	0.388	0.152	0.423	0.063	1.027
	20	mrhof	287	0	2	0.383	0.152	0.411	0.044	0.990
		of0	289	0	2	0.382	0.152	0.410	0.042	0.986
	30	mrhof	436	0	2	0.378	0.152	0.403	0.033	0.966
		of0	442	0	2	0.378	0.152	0.401	0.032	0.963
	60	mrhof	884	2	2	0.376	0.152	0.395	0.024	0.947
		of0	887	0	2	0.376	0.152	0.394	0.023	0.944
Wis mote	10	mrhof	44	0	2	0.053	0.162	59.649	0.008	59.872
		of0	20	0	1	0.047	0.162	59.93	0.004	60.146
	20	mrhof	120	4	4	0.045	0.162	59.871	0.009	60.087
		of0	61	0	3	0.063	0.162	59.921	0.061	60.207
	30	mrhof	209	6	4	0.042	0.162	59.92	0.009	60.133
		of0	130	2	4	0.06	0.162	59.916	0.071	60.209
	60	mrhof	506	12	4	0.041	0.162	59.957	0.009	60.170
		of0	375	4	5	0.047	0.162	59.966	0.031	60.206

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что при увеличении количества сенсорных узлов существенных изменений энергопотребления не происходит. Увеличилось количество переходов и значительно увеличились потери пакетов с 6 для сети из 5 сенсорных узлов до 12 для сети из 10 сенсорных узлов платформы Wismote. При использовании целевой функции OF0 потери меньше, но при этом большее время конвергенции сенсорной сети. Более подробная статистика за 60 минут исследования по всем сенсорным узлам приведена для платформы Wismote (табл. 4).

В нашем исследовании каждый узел отправляет пакеты каждую минуту: так, за 10 минут при поиске маршрута по целевой функции OF0 подключились только два узла из десяти – это узлы 11 и 23, которые располагаются ближе всего к шлюзу. Сенсорный узел 25 присоединяется к сети на 59 минуте моделирования, что недопустимо в промышленном Интернете вещей.

При использовании целевой функции для платформы Wismote mrhof время конвергенции меньше, чем при использовании целевой функции OF0, но при этом моделирование показало наличие значительных потерь пакетов. Исходя из анализа, можно сделать следующий вывод: наилучшие результаты по многим параметрам показывают сенсорные узлы платформы Skymote.

Таблица 4

Статистика по всем сенсорным узлам для Wismote (рис. 3б)

Узлы платформы Wismote		7	8	9	10	11	23	24	25	26	27
Отправлено пакетов узлами	Функция mrhof	57	50	46	60	59	59	33	44	51	47
Потеряно пакетов		2	3	1	0	0	0	1	3	1	1
Количество переходов		1	2	3	1	1	1	4	4	2	3
Отправлено пакетов узлами	Функция of0	45	45	45	15	60	59	45	1	31	33
Потеряно пакетов		1	0	1	0	0	0	0	0	2	0
Количество переходов		2	3	2	2	1	1	3	5	3	4

В топологии рис. 4а изменим положение шлюза 6 платформы Skymote и добавим еще 5 узлов платформы Wismote и выполним моделирование, результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Показатели производительности сети Интернета вещей (рис. 4а)

Платформа шлюза	Время модел., мин	Целевая функция	Общее количество отправленных пакетов	Потерянные пакеты	Максимальное количество переходов	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
Skymote	10	mrhof	162	0	2	0.337	0.153	9.819	0.052	10.361
		of0	164	0	2	0.337	0.153	9.78	0.051	10.321
	20	mrhof	359	2	2	0.302	0.154	15.077	0.03	15.564
		of0	376	2	2	0.289	0.155	17.211	0.027	17.682
	30	mrhof	580	3	2	0.299	0.154	15.157	0.022	15.633
		of0	574	2	1	0.276	0.155	19.214	0.0021	19.666
	60	mrhof	1156	4	2	0.296	0.155	15.221	0.016	15.687
		of0	1170	5	2	0.273	0.155	19.285	0.015	19.728
		of0	–	–	–	–	–	–	–	–

Продолжение таблицы 5

Платформа шлюза	Время модел., мин	Целевая функция	Общее количество отправленных пакетов	Потерянные пакеты	Максимальное количество переходов	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
Wis mote	10	mrhof	34	0	1	0.055	0.162	59.961	0.005	60.183
		of0	–	–	–	–	–	–	–	–
	20	mrhof	119	1	4	0.047	0.162	59.98	0.014	60.203
		of0	–	–	–	–	–	–	–	–
	30	mrhof	225	9	4	0.045	0.162	59.988	0.009	60.204
		of0	17	0	4	0.102	0.16	59.755	0.218	60.235
60	mrhof	509	15	4	0.044	0.162	59.99	0.009	60.205	
	of0	222	7	5	0.048	0.162	59.971	0.028	60.209	

К шлюза платформы Skymote на первой минуте моделирования подключились три сенсорных узла платформы Wisemote, а именно узлы 29, 30, 32. Количество отправленных пакетов совпадает у узлов разных платформ, что говорит об их одновременном подключении к шлюзу 6. На 14 минуте моделирования присоединились еще два узла, 28 и 31. Все потерянные пакеты приведенные в табл. 3 для шлюза Skymote относятся к присоединенным сенсорным узлам платформы Wisemote.

Статистика за 60 минут исследования по всем сенсорным узлам рассматриваемой топологии на рис. 4а приведена для платформы Wisemote (табл. 6). В нашем исследовании каждый узел отправляет пакеты каждую минуту, так, потери 11 пакетов из 15 (73 % потерь) относятся к 25 узлу, который находится дальше всего от шлюза. Исходя из выполненного моделирования для шлюза платформы Wisemote, наилучшей целевой функцией с точки зрения конвергенции сети является mrhof, уже на первой минуте моделирования к шлюзу подключились три сенсорных узла и на 11 минуте присоединились все оставшиеся узлы. При целевой функции OF0 только на 27 минуте присоединились узлы 8, 9 и 11; оставшиеся узлы присоединились на 28 минуте за исключением 25, который подключился только на 58 минуте моделирования. Узлы 7 и 26, по которым нет статистики, подключились к шлюзу Skymote.

Таблица 6

## Статистика по всем сенсорным узлам для Wisemote (рис. 4а)

Узлы платформы Wisemote	7	8	9	10	11	23	24	25	26	27
Отправлено пакетов узлами	59	50	47	57	59	59	48	36	46	48
Потеряно пакетов	0	0	1	0	0	1	0	11	2	0
Количество переходов	1	2	2	1	1	1	3	4	2	3
Отправлено пакетов узлами	–	33	33	32	32	32	30	2	–	28
Потеряно пакетов	–	0	0	0	1	0	2	0	–	4
Количество переходов	–	3	2	1	1	2	3	5	–	4

В топологию рис. 4б добавим сенсорный узел 43 платформы Zolertia, настроив его как шлюз, и 10 узлов платформы Zolertia и выполним моделирование, результаты моделирования приведены в табл. 7.



Все потерянные пакеты, приведенные в табл. 7 для платформы Skymote, при использовании функции of0 относятся к присоединенным узлам платформы Wismote, а именно 18 из 20 потерянных (90 % потерь).

По энергопотреблению наилучшие результаты у шлюза платформы Zolertia, но к шлюзу подключилось только три узла. При подключении устройств платформы Wismote в качестве целевой лучше выбирать функцию MRHOF, так как время подключения устройств к DODAG (Destination Oriented Directed Acyclic Graph) меньше, но при этом потери пакетов выше.

Таблица 7

## Показатели производительности сети Интернета вещей (рис. 4б)

Платформа шлюза	Время модел., мин	Целевая функция	Общее количество отправленных пакетов	Потерянные пакеты	Максимальное количество переходов	CPU Power	LPM Power	Listen Power	Transmit Power	Power
Skymote	10	mrhof	127	1	2	0.416	0.151	8.946	0.073	9.586
		of0	149	1	2	0.42	0.151	8.394	0.08	9.045
	20	mrhof	272	2	2	0.384	0.152	12.335	0.045	12.916
		of0	292	2	3	0.399	0.151	16.911	0.121	17.582
	60	mrhof	705	6	2	0.377	0.152	12.324	0.025	12.878
		of0	343	20	4	0.342	0.153	19.228	0.054	19.777
Wis mote	10	mrhof	31	2	1	0.074	0.161	59.858	0.004	60.097
		of0	–	–	–	–	–	–	–	–
	20	mrhof	96	6	3	0.064	0.162	59.965	0.008	60.199
		of0	18	1	2	0.199	0.157	59.587	0.366	60.31
	60	mrhof	419	12	4	0.061	0.162	59.985	0.009	60.217
		of0	212	7	5	0.064	0.162	59.964	0.034	60.224
Zolertia Z1	10	mrhof	25	0	1	0.447	0.15	0.473	0.142	1.212
		of0	22	0	1	0.441	0.15	0.465	0.045	1.102
	20	mrhof	54	0	1	0.433	0.15	0.423	0.063	1.069
		of0	45	0	1	0.429	0.151	0.411	0.044	1.035
	60	mrhof	141	0	1	0.423	0.151	0.395	0.030	0.999
		of0	135	0	1	0.423	0.151	0.391	0.019	0.983

Оценим производительность сети с точки зрения коэффициента доставки пакетов (PDR), который определяется как количество полученных пакетов на узле по отношению к количеству пакетов, отправленных на узел. Количество полученных пакетов определяется как разность количества, отправленных к количеству потерянных пакетов. Результаты представлены на рис. 5.

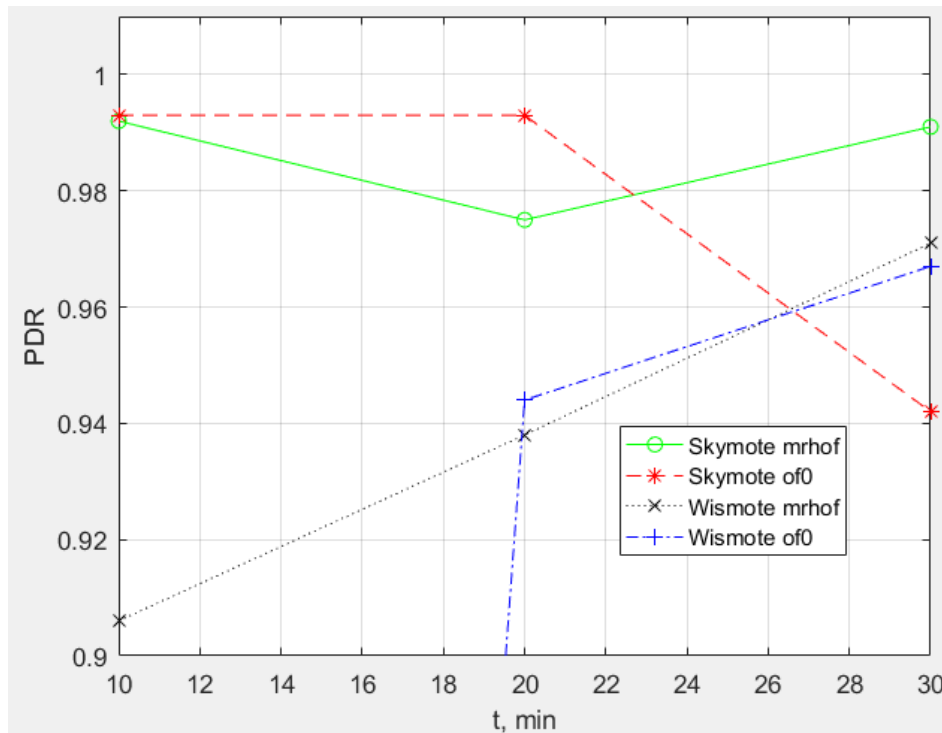


Рис. 5. Коэффициент доставки пакетов для топологии 4б

Из представленных зависимостей следует, что наилучший коэффициент доставки у платформы Skymote для целевой функции MRHOF.

**Заключение.** Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Наилучшие показатели производительности были получены для сенсорных узлов платформы Skymote, а именно: наименьшие потери пакетов, наименьшее количество переходов. Общее энергопотребление узлов данной платформы меньше, чем у узлов Wismote. Следовательно, узлы Skymote могут работать более продолжительное время.

2. При необходимости использования сенсорных узлов платформы Wismote целесообразнее использовать целевую функцию MRHOF, поскольку для данной функции наилучшие показатели производительности, такие как коэффициент доставки пакетов и время подключения узлов к направленному ациклическому графу DODAG.

## SIMULATION OF THE SENSOR NETWORK OF THE INDUSTRIAL INTERNET OF THINGS

O.A. LAVSHUK, N.I. LISTOPAD

### Abstract

The article presents the configuration of the Internet of Things network in the form of a sensor device and the Internet of Things network itself. The architecture of a wireless sensor node is presented in the form of four main subsystems: sensor, computing, communication, and power subsystem. A comparative analysis of the most common computing platforms for modeling sensor nodes has been carried out. The simulation of the interaction of various sensory nodes in the Contiki operating system was performed. The simulation results and the analysis made it possible to develop recommendations on the possibility of using the considered platforms in the industrial Internet of things.

**Список использованных источников**

1. Kamgueu, P. O. Energy-Based Routing metric for RPL / P. O. Kamgueu [et al.] // INRIA, Rocquencourbe, France. – 2013. – 14 p.
2. Kim, H. S. Load balancing under heavy traffic in rpl routing protocol for low power and lossy networks / H. S. Kim, H. Kim, J. Paek // IEEE Transaction on Mobile Computing. – 2017. – Vol. 16, № 4. – P. 964–979.
3. Tang, W. Toward improved RPL: A congestion avoidance multipath routing protocol with time factor for wireless sensor networks / W. Tang, X. Ma, J. Huang, J. Wei // Hindawi Journal of Sensors. – 2016. – P. 1–11.
4. Taghizadeh, S. CLRPL : Context-Aware and Load Balancing RPL for Iot Networks Under Heavy and Highly Dynamic Load / S. Taghizadeh, H. Bobarshad, H. Elbiaze // IEEE Access. – 2018. – Vol. 6. – P. 23277–23291.