

# Расчет энергетических затрат беспроводных сенсорных сетей на примере нефтегазовой отрасли

Д. А. Маслова, Т. Н. Астахова, М. О. Колбанёв, А.А. Бердникова

**Аннотация** – В данной статье предлагается аналитическая модель, которая может быть применима в большинстве отраслей промышленности. В качестве примера была выбрана нефтегазовая отрасль. В работе рассмотрены области применения беспроводных сенсорных сетей в нефтегазовой отрасли. Отмечены отличительные особенности и недостатки применяемых в нефтегазовой промышленности типов беспроводных сенсорных сетей: наземных, подземных, подводных, мультимедийных и подвижных беспроводных сенсорных сетей. Сформулирована основная проблема беспроводных сенсорных сетей – энергопотребление. Получена пространственно-энергетическая модель беспроводной сенсорной сети, позволяющая рассчитать энергопотребление сети с учётом ослабления сигнала. Анализ зависимости потребляемой мощности показал, что при моделировании беспроводных сенсорных сетей на поверхности с застройками или неровностями для точности прогнозируемых данных следует учитывать медианное ослабление сигнала.

**Ключевые слова** – нефтегазовая отрасль, энергопотребление, беспроводная сенсорная сеть, модель Окамуры, ослабление сигнала.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Эпоха Industry 4.0 позволила многим отраслям промышленности перейти к оцифровке, автоматизации и интеллектуализации производственной деятельности. Одной из ключевых технологий Industry 4.0 является Internet of Things (IoT) или применительно к промышленности – Industrial Internet of Things (IIoT) [1], которые в последние годы показывают высокий темп развития, позволяя соединять физические объекты и процессы с цифровым пространством. К IIoT относятся беспроводные сенсорные сети (БСС), производящие сбор, обработку и мониторинг информации о физическом объекте, позволяя принимать решения о рациональном распределении ресурсов предприятия.

Постоянное повышение спроса на топливо и продукты его переработки стимулирует нефтегазовые компании внедрять и использовать новые технологии. Отрасль нефтегазовой промышленности в настоящее время заинтересована во внедрении и использовании беспроводных сенсорных сетей с целью оптимизации

процессов исследования местности, добычи ресурсов, их переработки, транспортировки и сбыта.

## II. ПРОБЛЕМАТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Нефтегазовая отрасль включает большой спектр задач, для решения которых целесообразно использовать БСС. Рассмотрим подробнее некоторые из них.

1. *Удалённый мониторинг газовых и нефтяных объектов и установок.* При помощи датчиков давления, температуры, уровня вибрации, влажности воздуха и др. можно проводить постоянный удаленный мониторинг трубопроводов, скважин, сепараторов в труднодоступных местах. Для нефтегазовой отрасли это особенно важно, так как многие объекты проложены под водой, на большой глубине под землей или относятся к классу опасных производственных объектов.

2. *Мониторинг неисправностей и утечек газа.* Датчики, установленные на оборудовании, позволяют получить комплексное представление о состоянии компонентов, входящих в процессы нефтегазовой отрасли, позволяя вовремя выявить неисправности, например, снижение уровня давления в газо- и нефтепроводах, потеря герметичности оборудования, деформация, излом, износ как отдельных деталей, так и самого оборудования в целом.

3. *Разведка данных о месторождении и сейсморазведка.* При помощи датчиков и дронов, объединенных беспроводной сенсорной сетью, проводятся работы по поиску месторождения газа/нефти, в том числе в труднодоступных для человека районах. При помощи данных, полученных с дронов и датчиков, составляются карты местности с указанием рельефа, видов пород почвы и тектонических структур. На базе полученной информации оценивается вероятность нахождения в определенной точке исследуемой местности месторождения нефти или природного газа.

4. *Автоматизация процессов нефтегазовой промышленности.* Автономные интеллектуальные датчики позволяют автоматически или при помощи оператора управлять отдельными процессами производства или добычи сырья. На базе беспроводной сенсорной сети строятся «Интеллектуальные скважины», «Интеллектуальные газонепфтепроводы» и т.д., представляющие собой системы, включающие датчики, установленные на отдельных объектах (краны, регулирующие давление и расход, и т.д.). Оператор имеет возможность наблюдать за процессом в режиме реального времени

и при необходимости передавать сигнал датчикам, регулируя расход с целью повышения производительности.

В нефтегазовой промышленности могут применяться несколько типов беспроводных сенсорных сетей: наземные, подземные, подводные, мультимедийные и подвижные.

Наземные беспроводные сенсорные сети разворачиваются непосредственно на поверхности земли, на суше. Такие сети чаще всего используются для мониторинга окружающей среды, анализа вибраций, мониторинга периметров военных объектов.

В подземных БСС основная часть узлов размещается под землей, над землей располагаются только датчики, необходимые для передачи собранной информации на базовую станцию. Такой вид сетей используется в цифровом сельском хозяйстве, при работах в шахтах, для анализа и диагностики подземных трубопроводов и поисков месторождений сырой нефти.

Подводные БСС разворачиваются под водой, зачастую устанавливаются на подводных транспортных средствах. Такие сети позволяют проводить сейсморазведку, мониторинг уровня загрязнений, обнаруживают движущиеся объекты и подводные лодки и дают возможность использования подводной робототехники.

Беспроводные мультимедийные сенсорные сети представляют совокупность узлов, собирающих, вычисляющих и обменивающихся информацией. Узлы в таких сетях могут извлекать и хранить собранную мультимедийную информацию в виде изображений, видео- или аудиоданных. Такие сети применяются для контроля дорожного движения, экологического мониторинга, разведки местности и т.д.

Подвижные БСС, часто называемые мобильными сетями, состоят из подвижных сенсорных устройств, способных самоорганизовываться, и являются более универсальными, так как они дают возможность контролировать распределение ресурсов внутри сети и при необходимости изменять топологию сети. Такой вид сетей используется для мониторинга в режиме реального времени, мониторинга состояния животных, управление и мониторинг подвижной техники и оборудования, управления дронами и беспилотниками.

Но каждая из перечисленных сетей имеет свои отличительные особенности и недостатки. Наземные беспроводные сенсорные сети самые низко затратные из перечисленных, но они имеют ограничение объема передачи данных и часто сталкиваются с проблемами низкой энергоёмкости источника питания. Кроме этого, данный вид сетей статичен, что ограничивает область сбора информации. Подземные беспроводные сенсорные сети также стационарны, но из-за их расположения и принципа работы стоимость развертывания таких сетей более высокая. Кроме этого, возникает сложность замены источников

питания, ослабление или потери сигнала из-за низкой пропускной способности почвы и появляются экологические угрозы. Подводные БСС имеют проблемы, связанные с энергопотреблением, с задержкой распространения сигнала и ограниченностью пропускной способности. Стоимость таких сетей довольно высока, многие сенсорные устройства из-за контакта с водой подвержены воздействию коррозии. Датчики подводных сетей нельзя назвать статичными, так как их расположение зависит от подводной среды. Беспроводные мультимедийные сенсорные сети затрачивают наибольшее количество энергии из уже рассмотренных на процессы хранения и обработки, им требуются значительные вычислительные мощности, пропускная способность зависит от места развертывания сети. Основными проблемами подвижных сетей являются высокая стоимость оборудования и комплектующих, большое энергопотребление, постоянно изменяющаяся топология и нарушение взаимодействия узлов из-за отказа одного или более внутри сети.

Таким образом основной проблемой БСС является энергопотребление.

### III. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Авторы работы [2] считают, что энергопотребление является самым важным показателем качества беспроводной сенсорной сети, от которого зависит срок функционирования сети. Снизить энергетические затраты в БСС предлагается при помощи агрегирования данных.

В работе [3] отмечается, что беспроводные сенсорные устройства в основном тратят энергию во время приема, передачи, обработки информации, а также значительная часть расходуется при вычислении маршрута. Для решения задачи, связанной со снижением энергопотребления, авторами предложен алгоритм, основанный на кластеризации сети.

Многие исследования не учитывают при оценке затрат энергии особенности местности, препятствующие свободной передаче данных, что увеличивает результат рассчитываемого показателя. Так, например, БСС, используемые в нефтегазовой отрасли, могут быть развернуты в гористой местности или в городских застройках. В данной работе предлагается учитывать эти особенности.

Открытая, преимущественно равнинная местность называется «гладкой». Но в случаях, когда на местности присутствуют неровности (средняя высота  $\leq 20$  м), применяется понятие «квазигладкой» местности [4]. Впервые квазигладкая местность описана в модели Окамуры. Это модель распространения радиосигнала, широко используемая для прогнозирования распространения сигнала в городских районах, учитывающая ослабления

сигнала, связанные с препятствиями на пути передачи сигнала.

Местность, не имеющая различных препятствий при передаче сигнала, считается идеальным условием для передачи данных внутри БСС. В таких условиях мощность сигнала на передающей антенне рассчитывается по формуле Фрииса [5]:

$$P_{\text{пер}} = \frac{16P_{\text{пр}}\pi^2 r^2}{C_{\text{пр}}C_{\text{пер}}\gamma^2}, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – длина волны [м], передаваемого радиосигнала,  $C_{\text{пер}}$  – коэффициент усиления передающей антенны,  $C_{\text{пр}}$  – коэффициент усиления приёмной антенны,  $P_{\text{пер}}$  – мощность радиосигнала на передающей антенне [Вт] (без учёта потерь),  $P_{\text{пр}}$  – мощность радиосигнала на принимаемой антенне [Вт] (без учёта потерь),  $d$  – расстояние между антеннами объектов БСС в метрах. Требуемая мощность сигнала на передающей антенне ( $P_{\text{пер}}$ ) в предположении, что мощность радиосигнала на приёмной антенне ( $P_{\text{пр}}$ ) постоянна, случайная величина, зависящая от расстояния между взаимодействующими объектами.

Длина волны связана с частотой потока сигнала  $\gamma = \frac{v_c}{f}$ , где  $v_c$  – скорость света ( $\sim 3 \cdot 10^8$  м/с).

Зачастую создать идеальные условия для передачи сигнала невозможно. В таком случае необходимо учитывать ослабление сигнала, вызванное препятствиями на маршруте передачи. Будем считать, что неровности в среднем не превышают 20 м в высоту. Тогда, дополнив формулу Фрииса расчетами Окамуры, получим усредненную медианную мощность, с учетом ослаблений сигнала:

$$P_c = P_{\text{пер}} - a_m + H_1 + H_2, \quad (2)$$

где  $a_m$  – дополнительное ослабление сигнала для квазиравномерной местности,  $H_1, H_2$  – коэффициенты

высота-усиление антенны базовой станции и передающей антенны.

При расстоянии  $\leq 10$  км коэффициент высота-усиления антенны базовой станции вычисляется следующим образом:

$$H_1 = 20 \cdot \ln \left[ \frac{h_{\text{бс}}}{\tilde{h}_{\text{бс}}} \right], \quad (3)$$

где  $\tilde{h}_{\text{бс}}$  – эффективная высота антенны базовой станции по модели Окамуры  $\tilde{h}_{\text{бс}} = 200$  м,  $h_{\text{бс}}$  – фактическая высота антенны базовой станции.

Влияние высоты передающей антенны не зависит от расстояния, так как зачастую используемые сенсорные устройства находятся ниже уровня застроек и препятствий при условии, что передающее сенсорное устройство расположено ниже 3 м, для нахождения коэффициента высота-усиления передающей антенны справедливо следующее соотношение:

$$H_2 = 10 \cdot \ln \left[ \frac{h_{\text{пер}}}{\tilde{h}_{\text{пер}}} \right], \quad (4)$$

где  $\tilde{h}_{\text{пер}}$  – базовое значение высоты передающей антенны, по модели Окамуры  $\tilde{h}_{\text{пер}} = 3$  м,  $h_{\text{пер}}$  – фактическая высота передающей антенны.

Таким образом усредненная медианная мощность, с учетом ослаблений сигнала:

$$P_c = \frac{16P_{\text{пр}}\pi^2 r^2 f^2}{C_{\text{пр}}C_{\text{пер}}v_c^2} - a_m + 20 \cdot \ln \left[ \frac{h_{\text{бс}}}{\tilde{h}_{\text{бс}}} \right] + 10 \cdot \ln \left[ \frac{h_{\text{пер}}}{\tilde{h}_{\text{пер}}} \right], \quad (5)$$

Проведем расчеты при следующих значениях исходных данных:  $v = 3 \cdot 10^8$  м/с,  $C_{\text{пер}} = 1$ ,  $C_{\text{пр}} = 1$ ,  $P_{\text{пр}} = 40$  Вт,  $r = 5000$  м,  $a_m = 25$  дБ.

На рисунке представлен график затрачиваемой мощности с учетом ослабления сигнала ( $P_c$ ) и мощности без учета ослабления сигнала ( $P_{\text{пер}}$ ) при разных значениях частоты потока сигнала.

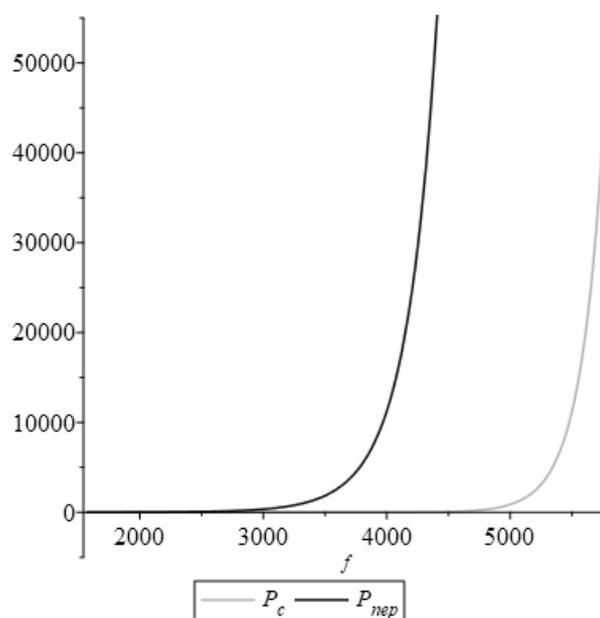


Рис. 1 – Зависимость мощностей передающей антенны от частоты потока сигнала

Полученный график подтверждает предположение о разном уровне потребляемой мощности при развертывании БСС на гладкой и квазигладкой поверхности. Таким образом, при моделировании БСС на поверхности с застройками или неровностями для точности прогнозируемых данных следует учитывать медианное ослабление сигнала.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [6] проводится оценка влияния агрегирования данных сенсорных устройств на энергопотребление. В ходе экспериментов выявлено, что уменьшение в ходе агрегирования объема данных влечет за собой снижение энергопотребления.

Подходы к расчетам энергопотребления БСС рассматриваются в работе [7], предлагается математическая модель расчета энергопотребления узлом сети, учитывающая технические параметры сетей дополненная прогностической составляющей.

В работах [8, 9, 10] при оценке энергопотребления затрачиваемая мощность считается в соответствии с формулой Фрииса. Так в работе [10] получена функция распределения вероятности случайной величины мощности, и определена связь энергетических и информационных параметров сети.

В отличие от рассмотренных подходов к расчету затрачиваемой энергии, в работе предлагается учитывать показатель медианного ослабления сигнала для получения более точных прогнозируемых данных.

#### V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были рассмотрены области применения и отличительные особенности, и недостатки беспроводных сенсорных сетей в нефтегазовой отрасли. Выявлено, что энергопотребление является одной из основных проблем беспроводных сенсорных сетей.

Получена пространственно-энергетическая модель беспроводной сенсорной сети, позволяющая рассчитать энергопотребление сети с учётом ослабления сигнала.

Отмечается, что в условиях большинства отраслей промышленности, в том числе и нефтегазовой, сложно создать идеальные условия для развертывания БСС. Застройки, особенности рельефа могут играть значительную роль при передаче сигнала. В связи с этим, при проектировании и моделировании беспроводных сенсорных сетей для отраслей промышленности, стоит учитывать ослабление сигнала. Это позволит увеличить точность прогнозируемых данных при планировании энергозатрат сети и поможет распределить нагрузку внутри сети.

#### БИБЛИОГРАФИЯ

[1] Михеев М.Ю., Цифровая трансформация сельского хозяйства на пути к ИНДУСТРИИ 4.0 / Волков А.Г., Михеев М.Ю.

// XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2022. Т. 11. № 2 (58). С. 32-37.

[2] Павлов А. М., Пожидаева И. А. Оценка энергоэффективности агрегирования разнородных данных в беспроводных сенсорных сетях // Экономика. Информатика. – 2021. – Т. 48. – № 11. – С. 156-167.

[3] Татарникова Т. М., Бимбетов Ф., Горина Е. В. Дополнение к алгоритму кластеризации беспроводной сенсорной сети // Программные продукты и системы. – 2022. – Т. 35. – №. 2. – С. 222-228.

[4] Цыбуля, С. Д. Оценка прогнозирования уровня радиосигнала подвижной наземной связи в различных условиях распространения / С. Д. Цыбуля, И. Н. Зайцева, Н. А. Фортунова // . – 2021. – № 11-4. – С. 360-368.

[5] Uolles R. Maksimal'naya dal'nost' svyazi po radiokanal v sisteme: kak etogo dobit'sya? [Maximum radio communication range in the system: how to achieve this?], *Novosti elektroniki* [News of electronics], 2015, No. 11, pp. 3–13.]

[6] Павлов, А. М. Влияние агрегирования квазистационарных измерительных данных сенсорных узлов на пропускную способность и энергопотребление беспроводной сенсорной сети / А. М. Павлов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 54-64. – DOI 10.21869/2223-1536-2022-12-1-54-64.

[7] Павлова З.Х., Балтин Р.Р., Краснов А.Н., Майский Р.А. Об основных аспектах проектирования беспроводных сетей параметрического мониторинга удаленных объектов // МНИЖ. 2016. №12-3 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-osnovnyh-aspektah-proektirovaniya-besprovodnyh-setey-parametricheskogo-monitoringa-udalennyh-obektov> (дата обращения: 21.03.2023)

[8] Андреев С. А., Воробьев В. А., Матвеев А. И. Снижение энергопотребления телеметрическими системами сельскохозяйственного назначения // Агроинженерия. – 2019. – №. 1 (89). – С. 60-65

[9] Астахова Т. Н., Верзун Н. А., Колбанев М. О., Полянская Н. А., Шамин А. А. Вероятностно-энергетические характеристики взаимодействия умных вещей // Вестник НИИЭИ. 2019. №. 4 (95)

[10] Верзун Н. А. и др. Оценка энергетических характеристик множественного доступа в эфирных сетях // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2019. – №. 10. – С. 34-38.

Статья получена 21 февраля 2024

Маслова Дарья Александровна, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. (e-mail: [dasha.kirilova.96@bk.ru](mailto:dasha.kirilova.96@bk.ru)).

Астахова Татьяна Николаевна, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет. (e-mail: [ctn\\_af@mail.ru](mailto:ctn_af@mail.ru)).

Колбанёв Михаил Олегович, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). (e-mail: [mokolbanev@mail.ru](mailto:mokolbanev@mail.ru)).

Бердникова Анна Александровна, Нижегородский государственный инженерно-экономический университет (e-mail: [anya-romanova-07@yandex.ru](mailto:anya-romanova-07@yandex.ru)).

# Calculation of energy costs of wireless sensor networks using the example of the oil and gas industry

D. Maslova, T. Astakhova, M. Kolbanev, A. Berdnikova

**Abstract** – This article proposes an analytical model that can be applied in most industries. The oil and gas industry was chosen as an example. The paper considers the application areas of wireless sensor networks in the oil and gas industry. The distinctive features and disadvantages of the types of wireless sensor networks used in the oil and gas industry are noted: terrestrial, underground, underwater, multimedia and mobile wireless sensor networks. The main problem of wireless sensor networks is formulated – energy consumption. A spatial-energy model of a wireless sensor network has been obtained, which allows calculating the power consumption of the network taking into account signal attenuation. The analysis of the dependence of power consumption showed that when modeling wireless sensor networks on surfaces with buildings or irregularities, the median signal attenuation should be taken into account for the accuracy of the predicted data.

**Keywords** – oil and gas industry, energy consumption, wireless sensor network, Okamura model, signal attenuation.

## REFERENCES

- [1] Mikheev M.Yu., Digital transformation of agriculture towards INDUSTRY 4.0 / Volkov A.G., Mikheev M.Yu. // XXI century: the results of the past and the problems of the present plus. 2022. Vol. 11. No. 2 (58). pp. 32-37.
- [2] Pavlov A.M., Pozhidaeva I. A. Energy efficiency assessment of heterogeneous data aggregation in wireless sensor networks //Economy. Computer science. – 2021. – vol. 48. – No. 1. – pp. 156-167.
- [3] Tatarnikova T. M., Bimbetov F., Gorina E. V. Addition to the clustering algorithm of a wireless sensor network //Software products and systems. - 2022. – Vol. 35. – No. 2. – pp. 222-228.
- [4] Tsybulya, S. D. Estimation of forecasting the level of a mobile terrestrial radio signal in various propagation conditions / S. D. Tsybulya, I. N. Zaitseva, N. A. Fortunova // . – 2021. – № 11-4. – S. 360-368.
- [5] Uolles R. Maksimal'naya dal'nost' svyazi po radiokanalu v sisteme: kak etogo dobit'sya? [Maximum radio communication range in the system: how to achieve this?], Novosti elektroniki [News of electronics], 2015, No. 11, pp. 3–13.]
- [6] Pavlov, A.M. The influence of aggregation of quasi-stationary measurement data of sensor nodes on the bandwidth and power consumption of a wireless sensor network / A.M. Pavlov // Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Series: Management, Computer engineering, computer science. Medical instrumentation. - 2022. – Vol. 12, No. 1. – pp. 54-64. – DOI 10.21869/2223-1536-2022-12-1-54-64.
- [7] Pavlova Z.H., Baltin R.R., Krasnov A.N., Maisky R.A. On the main aspects of designing wireless networks for parametric monitoring of remote objects // MNIZH. 2016. No.12-3 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ob-osnovnyh-aspektah-proektirovaniya-besprovodnyh-setey-parametricheskogo-monitoringa-udalennyh-obektov> (date of reference: 03/21/2023)
- [8] Andreev S. A., Vorobyov V. A., Matveev A. I. Reduction of energy consumption by telemetry systems for agricultural purposes //Agroengineering. – 2019. – №. 1 (89). – Pp. 60-65
- [9] Astakhova T. N., Verzun N. A., Kolbanev M. O., Polyanskaya N. A., Shamin A. A. Probabilistic and energy characteristics of the interaction of smart things //Bulletin of the NGIEL. 2019. №. 4 (95)
- [10] Verzun N. A. et al. Assessment of the energy characteristics of multiple access in terrestrial networks //Izvestiya SPbGETU LETI. – 2019. – №. 10. – Pp. 34-38.