

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА
КОНЦЕНТРАТОРА ДАННЫХ В АСМОС**

Е.А. Волкова, Е.А. Севрюкова, А.Е. Баскаков

*НИУ МИЭТ, Зеленоград, Россия
eavolkova2015@mail.ru,
melaly@mail.ru,
9999924816@ya.ru*

Аннотация. В работе представлен метод оценки эффективности программно-аппаратного комплекса концентратора данных в АСМОС, а именно оценки энергозатрат на выполнение процессов сбора данных с сенсоров с их последующей отправкой через радиоканал для различных режимов работы концентратора данных: отправки данных с подтверждением, отправки данных без подтверждения и с учётом варьирования параметров радиомодуля. На основе разработанной математической базы проведена оценка программно-аппаратного комплекса концентратора данных. В ходе оценки получен сравнительный график кривых потребления электроэнергии для различных вариантов работы устройства.

Разработанный метод оценки эффективности программно-аппаратного комплекса концентратора данных в АСМОС позволяет оптимизировать передачи данных, а значит, произвести выбор наиболее приемлемых параметров радиомодуля и алгоритмов передачи, что ведёт к увеличению времени автономной работы устройства до 16 %.

Ключевые слова: автоматизированная система мониторинга окружающей среды, концентратор данных, мониторинг окружающей среды.

**EVALUATION OF EFFICIENCY OF HARDWARE
AND SOFTWARE COMPLEX OF THE DATA
CONCENTRATOR IN AEMS**

E.A. Volkova, E.A. Sevryukova, A.E. Baskakov

*National Research University of Electronic Technology (MIET), Zelenograd, Russia,
eavolkova2015@mail.ru,
melaly@mail.ru,
9999924816@ya.ru*

Annotation. The paper presents a method for assessing the effectiveness of hardware and software complex of data concentrator in AEMS, namely, assessing the energy consumption for performing the processes of collecting data from sensors with their subsequent sending through the radio channel for various modes of operation of data concentrator: sending data with confirmation, sending data without confirmation and taking into account varying parameters of the radio module. On the basis of developed mathematical base, the evaluation of hardware and software complex of data concentrator was carried out. In the course of the assessment, a comparative graph of the curves of electricity consumption was obtained for various variants of device operation.

The developed methodology for assessing the efficiency of hardware and software complex of data concentrator in AEMS allows to optimize data transmission, and therefore, to select the most acceptable parameters of radio module and transmission algorithms, which leads to an increase in the battery life of device up to 16%.

Key words: automated environmental monitoring system, data concentrator, environmental monitoring.

Введение

В настоящий момент в мире складывается множество проблем, связанных с экологией и состоянием окружающей среды в целом. Для того чтобы обеспечить наилучший контроль ситуации, различными организациями проводятся регулярные измерения параметров окружающей среды. Человеческий фактор при проведении измерений нередко вносит коррективы в полученные данные, что может исказить реальный ход событий, поэтому в последние годы популярность набирают автоматизированные системы мониторинга. При этом важной задачей остаётся обеспечение эффективности работы устройства измерения [1].

В работе рассматривается метод оценки эффективности устройства концентратора данных, основанного на микроконтроллерном вычислительном модуле, приёмопередатчике на основе модуляции LoRa и подключённых к устройству сенсоров. Параметр энергоэффективности очень важен для подобного рода устройств, поскольку датчики и сенсоры могут находиться в отдалённых труднодоступных местах, из-за чего обслуживание этих устройств становится слишком дорогим и сложным. При наличии возможности оценки энергоэффективности устройства, известным алгоритмом его работы возможно выбрать вариант, в котором энергопотребление будет минимальным и устройство сможет проработать большее количество времени без обслуживания [2]. Для оценки энергоэффективности необходимо предложить модель энергопотребления для сенсорных узлов с использованием модуляции LoRa и протокола LoRaWAN. Кроме того, должно учитываться влияние параметров технологии LoRaWAN, таких как передача данных с подтверждением и без подтверждения, коэффициент расширения, скорость кодирования, размер полезной нагрузки и других.

Эффективность использования энергии является ключевым требованием для увеличения срока службы устройства. Концентраторы данных (КД), как правило, работают от аккумуляторной батареи с ограниченным сроком службы. Большинство приложений Интернета вещей (IoT) требуют стабильной и надёжной работы устройств в течение продолжительного периода времени.

Таким образом, разработка методов и алгоритмов оценки эффективности устройства сбора, хранения и передачи данных или концентратора данных в автоматизированной системе мониторинга окружающей среды (АСМОС) является актуальной задачей, поскольку позволяет оптимизировать работу устройства в целом.

Метод оценки эффективности концентратора данных в АСМОС

В рамках работы рассматривается устройство класса А (по классификации технологии LoRaWAN), которое периодически выполняет передачу сегментов данных. Первой задачей является моделирование среднего потребления тока устройством при передаче данных без подтверждения, обозначено как I_{avg_unACK} . Для того чтобы определить данный параметр, необходимо выделить профиль различных состояний устройства концентратора данных, а также их длительность и потребление тока.

Для того чтобы оценить поведение конечного устройства, была разработана модель, основанная на измерениях, полученных с реального испытательного стенда LoRaWAN. В процессе измерений передаваемые сообщения используют максимальную длину полезной нагрузки кадра, разрешённого для каждой скорости передачи данных (DR) в Европейской спецификации LoRaWAN. Результаты, полученные в ходе измерений, представлены в таблице 1.

Таблица 1
Состояния, переменные и их значения для передачи данных без подтверждения устройством LoRaWAN

| Номер состояния | Описание | Длительность | | Потребление тока | |
|-----------------|---|--------------|--------------|------------------|--------------------|
| | | Переменная | Значение, мс | Переменная | Значение, мА |
| 1 | Пробуждение | T_{wu} | 168,2 | I_{wu} | 22,1 |
| 2 | Подготовка к передаче | T_{pre} | 83,8 | I_{pre} | 13,3 |
| 3 | Передача через радиointерфейс | T_{tx} | 42,4–2793,5 | I_{tx} | 83,0 |
| 4 | Ожидание установки радиointерфейса в режим приёма 1-го окна | T_{w1w} | 983,3 | I_{w1w} | 27,0 |
| 5 | Первое приёмное окно | T_{rx1w} | 0,64–33,02 | I_{rx1w} | 38,1 |
| 6 | Ожидание установки радиointерфейса в режим приёма 2-го окна | T_{w2w} | Формула (4) | I_{w2w} | 27,1 |
| 7 | Второе приёмное окно | T_{rx2w} | 33,0 | I_{rx2w} | 35,0 |
| 8 | Выключение радиointерфейса | T_{off} | 147,4 | I_{off} | 13,2 |
| 9 | Постобработка | T_{post} | 268,0 | I_{post} | 21,0 |
| 10 | Подготовка к выключению | T_{seq} | 38,6 | I_{seq} | 13,3 |
| 11 | Сон | T_{sleep} | Формула (2) | I_{sleep} | $45 \cdot 10^{-3}$ |

Поведение концентратора данных рассматривается как циклическое. Каждый цикл состоит из передачи сообщения, включая соответствующие процедуры, необходимые для выполнения данной передачи, и перевод устройства в режим сна.

Изначально КД находится в режиме сна, который характеризуется низким потреблением тока. Когда КД начинает подготовку к передаче, происходит переход в состояние 2: подача электропитания на выбранный сенсор, получение с него данных, выключение сенсора и обработка данных. После этого устройство выполняет передачу через радиointерфейс (состояние 3). По окончании передачи, устройство выключает радиointерфейс, ожидает его установки в приёмный режим (состояние 4), после чего остаётся в режиме приёмника на длительность первого приёмного окна (состояние 5). Поскольку входящая преамбула отсутствует, первое приёмное окно закрывается, и устройство ожидает начала второго приёмного окна (состояние 6), в ходе которого радиointерфейс всё ещё остаётся в режиме приёмника до тех пор, пока второе приёмное окно не будет закрыто при отсутствии входящих данных (состояние 7). После выполнения всех этих операций радиointерфейс выключается (состояние 8), за ним следует интервал постобработки (состояние 9), и затем устройство выполняет подготовку к выключению (состояние 10), после чего уходит в режим сна (состояние 11) [3].

Определим T_{notif} как время между двумя последовательными передачами сообщений. Пусть T_i и I_i обозначают длительность и потребление тока для состояния i в таблице 1, а I_{sens} обозначает потребление тока сенсором за время его работы T_{pre} . Тогда $I_{sens} = I_s \cdot T_{pre}$, где $I_s = 1$ мА исходя из документации к использованному датчику. I_{avg_unACK} в таком случае может быть выражено следующим образом [4]:

$$I_{avg_unACK} = \frac{1}{T_{notif}} \left(\sum_{i=1}^{N_{states}} T_i \cdot I_i + I_{sens} \right), \quad (1)$$

где N_{states} — это 11 в случаях передачи сообщений без подтверждения. Обратите внимание, что T_{sleep} можно выразить следующим образом:

$$T_{sleep} = T_{notif} - T_{act}, \quad (2)$$

где T_{act} — сумма длительностей всех состояний передачи данных:

$$T_{act} = T_{wu} + T_{pre} + T_{tx} + T_{w1w} + T_{rx1w} + T_{w2w} + T_{rx2w} + T_{off} + T_{post} + T_{seq}. \quad (3)$$

Длительности T_{tx} , T_{rx1w} , и T_{w2w} зависят от используемой скорости передачи (DR), T_{w2w} зависит от T_{rx1w} и может быть вычислено как:

$$T_{w2w} = RECEIVE_DELAY_2 - RECEIVE_DELAY_1 - T_{rx1w}. \quad (4)$$

Выполним расчёт T_{tx} , T_{rx1w} и T_{rx2w} . T_{tx} может быть вычислена как время, необходимое для передачи преамбулы и самого сообщения, обозначенных как $T_{preamble}$ и $T_{PHY Message}$ соответственно [5–6]:

$$T_{tx} = T_{preamble} + T_{PHY Message}. \quad (5)$$

$T_{preamble}$ можно выразить следующим образом [7]:

$$T_{preamble} = T_{sym} \cdot (N_{pre} + 4,25), \quad (6)$$

где N_{pre} — это количество символов, используемых радиопередатчиком, полная длина преамбулы равна $(N_{pre} + 4,25)$; T_{sym} — время передачи одного символа:

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW}. \quad (7)$$

$T_{PHY\ Message}$ (в секундах) может быть выражено таким же образом [7]:

$$T_{PHY\ Message} = T_{sym} \cdot N_{PHY}, \quad (8)$$

где N_{PHY} выражает количество символов, передаваемых в сообщении (за исключением преамбулы) и может быть выражена следующим образом [8]:

$$N_{PHY} = 8 + \max \left[\text{ceil} \left[\frac{28 + 8 \cdot PL + 16 \cdot CRC - 4 \cdot SF}{4(SF - 2 \cdot DE)} \right] \cdot (CR + 4), 0 \right]. \quad (9)$$

В (9) SF соответствует коэффициенту распространения и может принимать значения от 7 до 12 (что соответствует скорости передачи от $DR5$ до $DR0$ соответственно); CR — скорость кодирования и может принимать значения от 1 до 4; PL — длина полезной нагрузки; CRC — присутствие или отсутствие поля контрольной суммы в сообщении; DE — использование механизма для устранения проблем, связанных с опорным генератором, принимает значение 1, если $SF = 12$ или $SF = 11$ и имеет значение 0 для всех остальных.

После нахождения T_{tx} продолжим определять длительность приёмного окна, в случае отсутствия входящих преамбул, что для передачи сообщений без подтверждения происходит для обоих приёмных окон. Оценим поведение аппаратного модуля, используемого в расчётах для каждого приёмного окна.

Для первого приёмного окна T_{rx1w} можно определить следующим образом:

$$T_{rx1w} = N_{dsym} \cdot T_{sym}. \quad (10)$$

КД остаётся в приёмном режиме на длительность N_{dsym} символов. Это значение равно 8 символов для $SF = 12$ и $SF = 11$ и 12 символов для всех остальных значений SF . Длительность времени работы второго приёмного окна, обозначенная как T_{rx2w} может быть вычислена следующим образом:

$$T_{rx2w} = \frac{2^{SF} + 32}{BW}. \quad (11)$$

После определения T_{tx} , T_{rx1w} и T_{rx2w} таблица 2 предоставляет суммаризацию данных значений при различных параметрах. Для значений T_{rx2w} мы также приводим соответствующие значения для различных DR .

Таблица 2

Сводные значения параметров T_{tx} , T_{rx1w} и T_{rx2w} для различных скоростей передачи данных

| DR | SF | T_{sym} | $T_{preamble}$ | T_{rx1w} | T_{rx2w} | DE | Полезная нагрузка кадра | | $T_{tx\ max}$ | $T_{tx\ min}$ |
|----|----|-----------|----------------|------------|------------|----|-------------------------|------|--------------------|-------------------|
| | | | | | | | Макс. | Мин. | Исходящая передача | Входящая передача |
| | | | | | | | байт | байт | мс | мс |
| 0 | 12 | 32,77 | 401,41 | 262,14 | 33,02 | 1 | 51 | 0 | 2793,5 | 991,8 |
| 1 | 11 | 16,38 | 200,70 | 131,07 | 16,64 | 1 | 51 | 0 | 1560,6 | 577,5 |
| 2 | 10 | 8,19 | 100,35 | 98,30 | 8,45 | 0 | 51 | 0 | 698,4 | 288,7 |
| 3 | 9 | 4,10 | 50,18 | 47,15 | 4,35 | 0 | 115 | 0 | 676,9 | 144,4 |
| 4 | 8 | 2,05 | 25,09 | 24,58 | 2,30 | 0 | 242 | 0 | 707,1 | 72,2 |
| 5 | 7 | 1,02 | 12,54 | 12,29 | 1,28 | 0 | 242 | 0 | 399,6 | 41,2 |
| 6 | 7 | 0,51 | 6,27 | 6,14 | 0,64 | 0 | 242 | 0 | 199,8 | 20,6 |
| 7 | — | 0,02 | 0,48 | 1,28 | 1,28 | — | 242 | 0 | 42,4 | 3,2 |

Значение $T_{tx\ max}$ получено расчётом с использованием максимального размера кадра для каждого DR, в то время как $T_{tx\ min}$ соответствует времени передачи сообщения, не содержащего полезных данных.

Когда значения, необходимые для расчёта I_{avg_unACK} , получены, можно рассчитать время работы от батареи для КД с передачей сообщений без подтверждения $T_{lifetime_unACK}$, которое можно вычислить, основываясь на ёмкости батареи $C_{battery}$ [9]:

$$T_{lifetime_unACK} = \frac{C_{battery}}{I_{avg_unACK}}. \tag{12}$$

Ещё один важный параметр производительности — энергетические затраты передачи $EC_{delivery_unACK}$ — который показывает энергию, затрачиваемую устройством на каждый переданный бит данных полезной нагрузки при передаче в режиме без подтверждений:

$$EC_{delivery_unACK} = \frac{I_{avg_unACK} \cdot V \cdot T_{notif}}{E[l_{delivery_unACK}]}, \tag{13}$$

где V — напряжение; $E[l_{delivery_unACK}]$ — ожидаемое количество данных на каждый кадр. Допустим, l_{pay} — это длина полезной нагрузки. Примем l_{data} как общую длину сообщения, включая все заголовки. Пусть b обозначает уровень битовых ошибок (BER). Поскольку для передачи без подтверждения устройство выполняет только одну попытку передачи, которая может быть подтвержена ошибке, $E[l_{delivery_unACK}]$ выражается следующим образом:

$$E[l_{delivery_unACK}] = l_{pay} \cdot (1 - b)^{l_{data}}. \tag{14}$$

Предположим, что в процессе передачи могут случаться коллизии. Пусть p_{coll} обозначает вероятность того, что произойдёт коллизия. Для того чтобы учесть влияние коллизии на расчёт $E[l_{delivery_unACK}]$, выражение (14) должно быть расширено следующим образом:

$$E[l_{delivery_unACK}] = l_{pay} \cdot (1-b)^{l_{data}} \cdot (1-p_{coll}). \quad (15)$$

Оценим среднее потребление тока для КД, работающего в режиме передачи сообщения с подтверждением.

В данном случае устройство может вести себя двумя разными способами: подтверждение может передаваться в первое приёмное окно или во второе. Предположим, что $BER = 0$, тогда среднее потребление тока для КД в режиме передачи с подтверждением I_{avg_ACK} может быть определено следующим выражением [10]:

$$I_{avg_ACK} = p_{1win} \cdot I_{avg_ACK_1} + p_{2win} \cdot I_{avg_ACK_2}, \quad (16)$$

где $I_{avg_ACK_1}$ и $I_{avg_ACK_2}$ — среднее потребление тока КД, когда подтверждение получено в первое и во второе приёмное окно соответственно. p_{1win} и p_{2win} описывают соответствующие вероятности. Предположим, что подтверждение может быть получено конечным устройством в одно из приёмных окон с равной вероятностью, следовательно, $p_{1win} = 0,5$ и $p_{2win} = 0,5$.

Когда подтверждение получено конечным устройством в первое приёмное окно, количество состояний, наблюдаемых при передаче с подтверждением, сокращается в сравнении с передачей без подтверждения: устройству нет необходимости ожидать второе приёмное окно (таблица 3). С другой стороны, длительность первого приёмного окна (T_{rx1w}) и время выключения радиointерфейса (T_{off}) увеличиваются, поскольку подтверждение должно быть получено и корректно обработано. Таким образом, $I_{avg_ACK_1}$ может быть вычислено с использованием выражений, используемых для вычисления I_{avg_unACK} (1)–(11), но с учётом только тех состояний, которые существуют в случае, если устройство получило подтверждение в первое приёмное окно (т.е. параметры T_{w2w} и T_{2w} равны нулю).

Таблица 3

Состояния, переменные и их значения для передачи данных с подтверждением устройством LoRa WAN, где подтверждение было получено в первое приёмное окно

| Номер состояния | Описание | Длительность | | Потребление тока | |
|-----------------|-------------------------------|--------------|--------------|------------------|--------------|
| | | Переменная | Значение, мс | Переменная | Значение, мА |
| 1 | Пробуждение | T_{wu} | 169,2 | I_{wu} | 22,1 |
| 2 | Подготовка к передаче | T_{pre} | 80,4 | I_{pre} | 13,7 |
| 3 | Передача через радиointерфейс | T_{tx} | См. табл. 1 | I_{tx} | 82,8 |

Продолжение таблицы 3

| Номер состояния | Описание | Длительность | | Потребление тока | |
|-----------------|---|--------------|---------------|------------------|--------------------|
| | | Переменная | Значение, мс | Переменная | Значение, мА |
| 4 | Ожидание установки радиоинтерфейса в режим приёма 1-го окна | T_{w1w} | 988,4 | I_{w1w} | 27,1 |
| 5 | Первое приёмное окно | T_{rx1w} | См. табл. 1 | I_{rx1w} | 31,8 |
| 8 | Выключение радиоинтерфейса | T_{off} | 337,8 | I_{off} | 13,4 |
| 9 | Постобработка | T_{post} | 272,5 | I_{post} | 20,9 |
| 10 | Подготовка к выключению | T_{seq} | 37,5 | I_{seq} | 13,4 |
| 11 | Сон | T_{sleep} | Уравнение (2) | I_{sleep} | $45 \cdot 10^{-3}$ |

Для вычисления $I_{avg_ACK_2}$ необходимо учесть, что поведение устройства почти идентично его поведению при передаче данных без подтверждения, количество состояний будет таким же, но нужно учесть два изменения: длительность второго приёмного окна T_{2w} и время выключения радиоинтерфейса T_{off} будут больше, чем для передачи без подтверждения [11]. Значение $I_{avg_ACK_2}$ может быть получено из (1)–(11), но с учётом значений T_{2w} и T_{off} , соответствующим передаче с подтверждением, где подтверждение было получено во второе приёмное окно (таблица 4).

Таблица 4

Состояния, переменные и их значения для передачи данных с подтверждением устройством LoRaWAN, где подтверждение было получено во второе приёмное окно

| Номер состояния | Описание | Длительность | | Потребление тока | |
|-----------------|----------------------------|--------------|---------------------------|------------------|--------------|
| | | Переменная | Значение, мс | Переменная | Значение, мА |
| 7 | Второе приёмное окно | T_{rx2w} | T_{tx} мин. в таблице 1 | I_{rx2w} | 38,0 |
| 8 | Выключение радиоинтерфейса | T_{off} | 337,8 | I_{off} | 13,4 |

Выражение (17) может быть использовано для расчёта теоретического времени работы конечного устройства от аккумуляторной батареи при режиме передачи данных с подтверждением ($T_{lifetime_ACK}$), основываясь на ёмкости батареи $C_{battery}$ и значении I_{avg_ACK} :

$$T_{lifetime_ACK} = \frac{C_{battery}}{I_{avg_ACK}} \cdot \quad (17)$$

Теперь можно оценить энергетическую эффективность передачи данных с подтверждением $EC_{delivery_ACK}$, которая выражается в затрачиваемой энергии на каждый бит переданных данных:

$$EC_{delivery_ACK} = \frac{I_{avg_ACK} \cdot V \cdot T_{notif}}{E[l_{delivery_ACK}]}, \quad (18)$$

где $E[l_{delivery_ACK}]$ — ожидаемое значение успешно переданных данных на каждый кадр, переданный конечным устройством с подтверждением.

В передаче с подтверждением устройство будет выполнять попытки повторной передачи данных всякий раз, когда подтверждение об успешной передаче не будет получено. Таким образом, $E[l_{delivery_ACK}]$ определяется как вероятность, что сообщение успешно доставлено либо с первой попытки, либо при дальнейших повторных передачах:

$$E[l_{delivery_ACK}] = l_{pay} \cdot \sum_{k=0}^{MAX_{RETR}} \left((1 - p_{coll}) \cdot (1 - (1 - b)^{l_{data}}) + p_{coll} \right)^k \times (1 - p_{coll}) \cdot (1 - b)^{l_{data}}. \quad (19)$$

Последний параметр, который необходимо представить, — это энергия на полезный бит E_{bit} , которая является важной метрикой для оценки потребляемой мощности узла датчика [12]. Выражение E_{bit} даётся в уравнении (20):

$$E_{bit} = \frac{E_{total}}{8 \cdot PL} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}) \cdot T_{packet}}{8 \cdot PL}, \quad (20)$$

где PL — размер полезной нагрузки; E_{total} — общая потребляемая энергия; $P_{cons}(P_{Tr})$ — общая потребляемая мощность. Используя уравнения (5), (6) и (8), энергия на полезный бит может быть преобразована в следующий вид:

$$E_{bit} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}) \cdot T_{packet}}{8 \cdot PL} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}) \cdot (N_{payload} + 4,25 + N_p) \cdot T_{sym}}{8 \cdot PL}. \quad (21)$$

Заменив T_{sym} на его выражение в уравнении (17), мы можем записать E_{bit} как функцию коэффициента расширения SF . Как видно, E_{bit} является возрастающей функцией по SF :

$$E_{bit} = \frac{P_{cons}(P_{Tr}) \cdot (N_{PHY} + 4,25 + N_{pre}) \cdot 2^{SF}}{8 \cdot PL \cdot BW}. \quad (22)$$

Используя описанный математический аппарат, проведём оценку изменения потребления тока КД, общее потребление тока для отправки набора данных зависит не только от используемого радиомодуля, но и от программной реализации алгоритма сбора, хранения и передачи данных; в рассматриваемом случае используется базовый алгоритм работы [13–14].

На рис. 1 представлено потребление тока концентратором в каждом из состояний. Состояние 11 не отображено по причине того, что оно потребляет в 1000 раз меньше тока, то есть имеет слишком малые значения для отображения на данной гистограмме. Наибольшее количество энергии требуется на передачу данных, но при изменении количества подключённых сенсоров изменяется и потребление энергии для состояния 2, в котором происходит процесс подачи энергии на каждый сенсор.

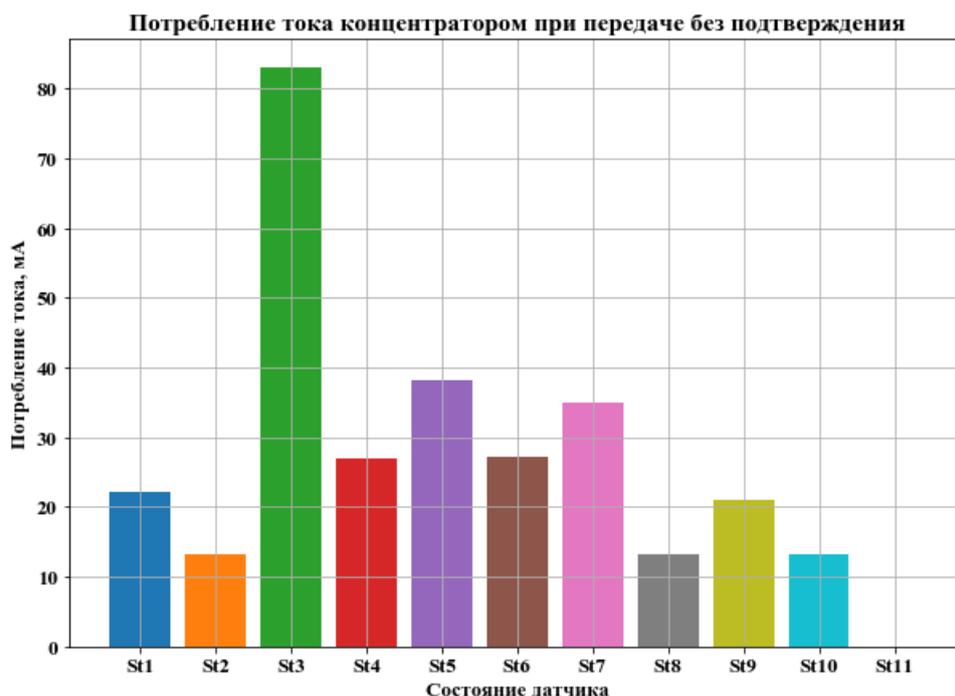


Рис. 1. Потребление тока концентратором в каждом из состояний при DR5 и передаче без подтверждения

Выполним расчёт среднего потребления тока для конечного устройства при передаче данных без подтверждения (1)–(11). Рисунок 2 изображает полученные результаты как зависимость T_{notif} от выбранного DR. Минимальное значение T_{notif} учитывает 1 % ограничение рабочего цикла, которое применяется для обязательного трёхканального поддиапазона и зависит от выбранного DR.

Среднее потребление тока снижается при увеличении T_{notif} , поскольку режим сна устройства занимает большее количество времени, в то время как время радиопередачи остаётся постоянным. Среднее потребление тока асимптотически стремится к току, потребляемому по времени сна по мере увеличения T_{notif} .

С другой стороны, среднее потребление тока снижается вместе с DR , поскольку длительность интервалов приёма и передачи обратно пропорциональна битовой скорости, соответствующей выбранному DR . Например, потребление тока при $DR0$ и $DR5$ различается в 2,76 раза для периода измерения в 5 минут. Однако эти различия уменьшаются при сокращении периода T_{notif} .

Для передачи данных без подтверждения потребление тока не зависит от уровня битовых ошибок (BER), поскольку конечное устройство выполняет только одну передачу.

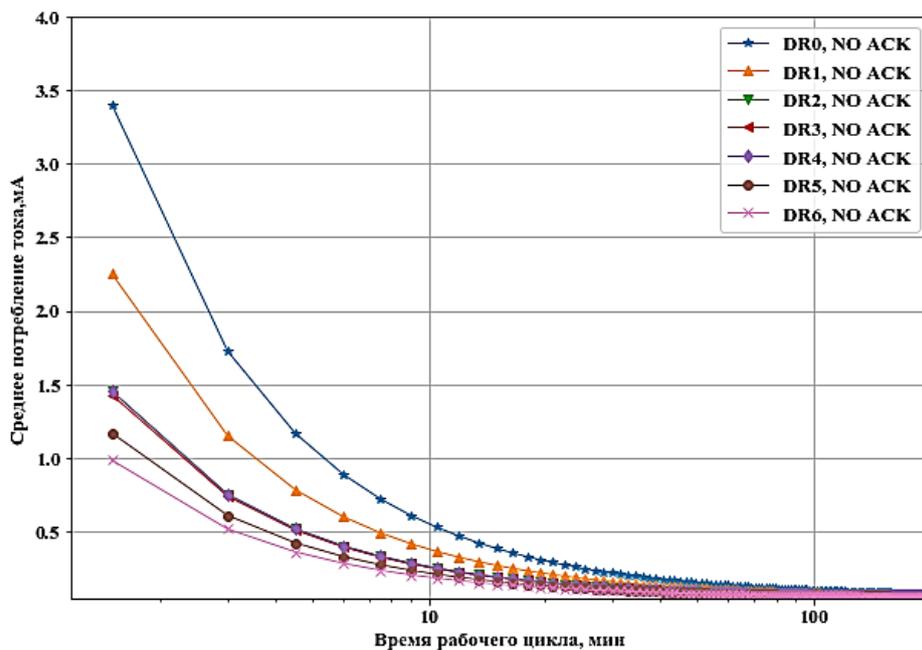


Рис. 2. Зависимость среднего потребления тока от времени рабочего цикла при различных DR

Используем данные из таблиц 1–3 и выражения (18)–(22), чтобы выполнить расчёт среднего потребления тока при передаче данных с подтверждением. На рис. 3 показана зависимость среднего потребления тока от времени рабочего цикла для передачи без ошибок ($BER = 0$). Поскольку кривые для $DR2$ и $DR3$ накладываются на кривую для $DR4$, $DR2$ и $DR3$ исключены из рис. 3.

В целом для $BER = 0$ среднее потребление тока при передаче с подтверждением ведёт себя так же, как и среднее потребление тока при передаче без подтверждения: уменьшается вместе с увеличением T_{notif} , асимптотически стремится к току, потребляемому во время сна, уменьшается при уменьшении DR .

Важным результатом при рассмотрении передачи данных с подтверждением является то, что такой вид передачи обладает меньшим потреблением тока, чем передача без подтверждения. Это связано с тем, что для передачи данных с подтверждением оно может быть получено в первое или второе приёмное окно. Второй вариант приводит к большему энергопотреблению устройством, зато первый приводит к уменьшенному потреблению тока, поскольку в этом случае устройство завершает рабочий цикл. Это приводит к тому, что общее среднее потребление тока при передаче с подтверждением оказывается ниже, чем передача без подтверждения.

Оценим влияние размера полезной нагрузки кадра на потребление тока. На рис. 4 показано среднее потребление тока при полезной нагрузке в 1 байт, а также при максимально возможном размере полезной нагрузки, что позволяет оценить верхнюю и нижнюю границы потребления тока для одного DR . Для короткого рабочего цикла разница довольно существенна: 49 % для периода в 1 мин для $DR5$ и 59 % для периода в 5 мин для $DR0$. Эта разница растёт при сокращении T_{notif} , поскольку потребление тока сна становится менее значительным. Для данного BER потребление тока для $DR5$ ниже, чем при использовании $DR0$. Для $DR5$ меньшая продолжительность интервалов, связанных с передачей и приёмом, уменьшает потребление тока.

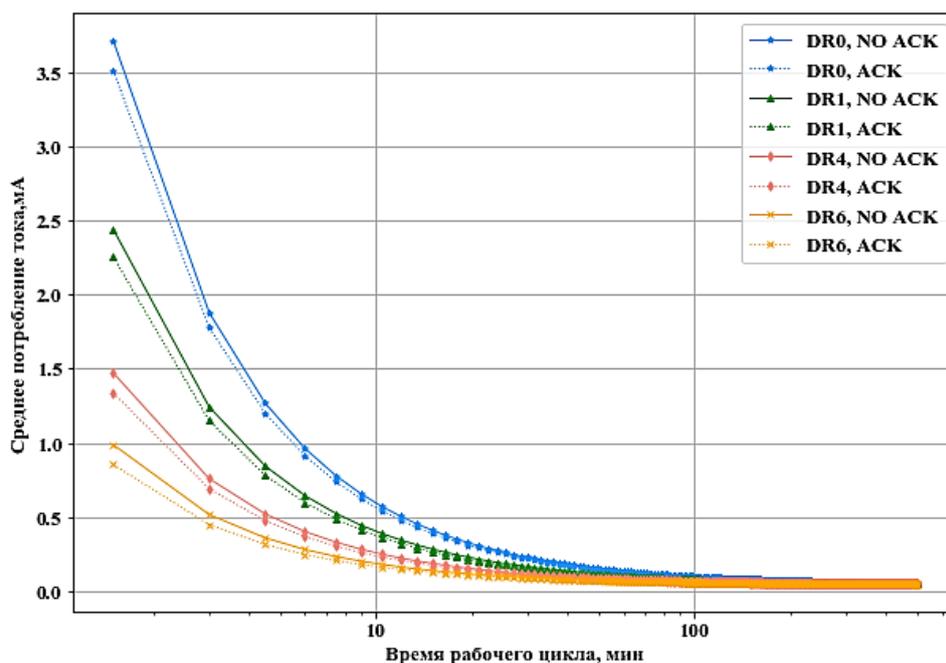


Рис. 3. Зависимость среднего потребления тока конечным устройством для передачи с подтверждением и без подтверждения от рабочего цикла устройства для различных DR для $BER = 0$ и $p_{coll} = 0$

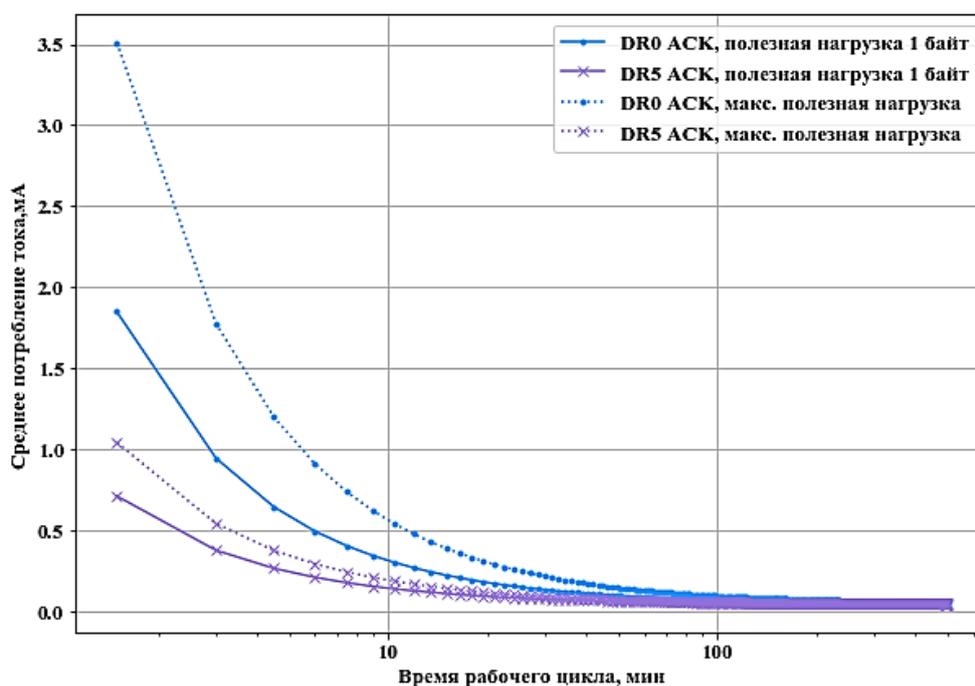


Рис. 4. Зависимость среднего потребления тока от времени рабочего цикла устройства для размера полезной нагрузки в 1 байт и максимальной доступной для выбранного DR , $BER = 0$ и $p_{coll} = 0$

Используя полученные результаты, оценим максимальное время работы устройства от батареи. Предположим, что ёмкость батареи равна 2400 мАч. На рис. 5 представлен график зависимости времени работы устройства для различных DR для передачи без подтверждения. Функция времени работы устройства обратна его среднему потреблению тока: чем выше время рабочего цикла T_{notif} , тем выше его время работы. Максимальное значение в 5,96 лет было получено для $DR6$ и $T_{notif} = 1440$ мин. Независимо от выбранного значения DR , значение времени работы асимптотически стремится к 6,19 лет (КД всегда находится в режиме сна). При этом меньшее значение DR ведёт к меньшему времени работы устройства, и этот эффект увеличивается при снижении T_{notif} . При увеличении времени рабочего цикла возможно достичь времени работы от батареи до нескольких лет.

На рис. 6 представлено сравнение времени работы устройства от батареи для передачи с подтверждением и без подтверждения. Пониженное энергопотребление в режиме передачи с подтверждением ведёт к увеличению времени работы устройства от батареи. Максимальная разница во времени работы устройства составляет 16 % для $DR5$ и времени рабочего цикла 0,5 мин. Для других DR снижение составляет до 3 %.

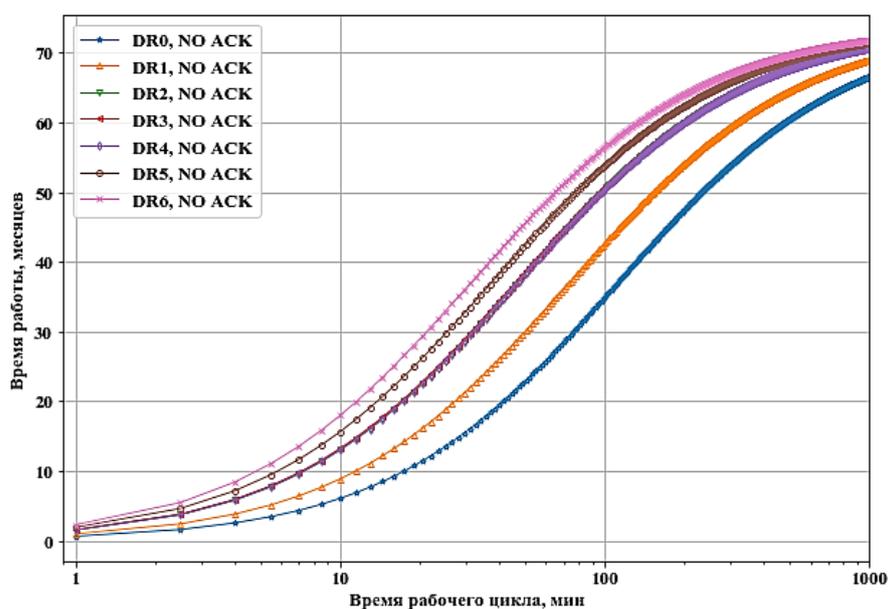


Рис. 5. Зависимость времени работы устройства от времени рабочего цикла для разных DR

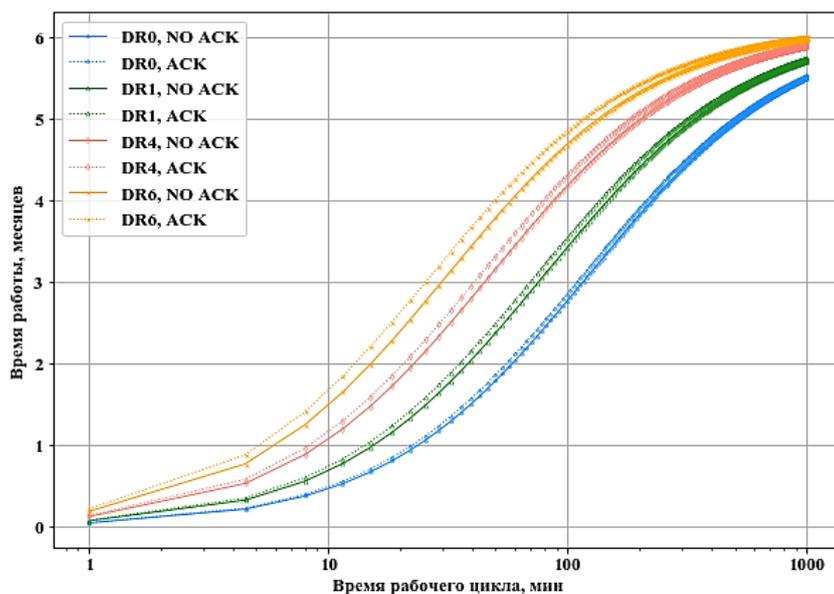


Рис. 6. Зависимость времени работы устройства от времени рабочего цикла для разных DR при передаче с подтверждением и без при $BER = 0$ и $p_{coll} = 0$

Из полученных данных следует, что использование алгоритма передачи с подтверждением более энергоэффективно, чем передача без подтверждения.

Заключение

Разработанный метод оценки эффективности программно-аппаратного комплекса концентратора данных в АСМОС позволяет решить ряд проблем, связанных с потреблением электроэнергии устройства на этапе его проектирования, и, как следствие, выбрать оптимальный вектор разработки программной и аппаратной составляющих устройства. Помимо этого, разработанный метод позволяет сравнить теоретические расчётные параметры энергопотребления для каждого состояния устройства с реальными, тем самым оценить оптимизацию алгоритмической базы устройства.

В ходе разработки метода оценки эффективности концентратора данных получена математическая модель, описывающая энергопотребление устройства при нахождении в основных состояниях: сна, сбора данных, передачи данных. Учтены вариации способов передачи данных: с подтверждением, без подтверждения, изменение параметров передачи данных для технологии LoRaWAN.

На основе разработанной математической модели получены расчётные значения времени автономной работы программно-аппаратного комплекса концентратора данных для различных параметров радиомодуля, приведены рекомендации выбора оптимальных параметров радиомодуля для увеличения времени автономной работы устройства до 16 %.

Работа выполнялась в НИУ МИЭТ в рамках научных исследований центра НТИ «Сенсорика» в НОЦ «Распределённые цифровые сенсорные системы» на тему «Разработка автоматизированной системы мониторинга окружающей среды (АСМОС) для сбора, обработки, хранения и передачи метеорологической и экологической информации».

Список литературы

1. Mikhaylov K., Petaejaevaervi J., Haenninen T. Analysis of capacity and scalability of the LoRa low power wide area network technology // European Wireless 2016; 22th European Wireless Conference. VDE. — 2016. — P. 1–6.
2. Kim B., Hwang K. Cooperative downlink listening for low-power long-range wide-area network // Sustainability. — 2017. — V. 9. — No. 4. — P. 627.
3. Magno M. et al. WULoRa: An energy efficient IoT end-node for energy harvesting and heterogeneous communication // IEEE. Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE) — 2017. — P. 1528–1533.
4. Nahhibeqiri J. et al. LoRa scalability: A simulation model based on interference measurements // Sensors. — 2017. — V. 17. — No. 6. — P. 1193.
5. Dongare A. et al. OpenChirp: A low-power wide-area networking architecture // IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). — 2017. — P. 569–574.

6. Логинов В.Н., Бычковский И.А., Сурнов Г.С., Сурнов С.И. Smart monitoring-технология дистанционного мониторинга потребления электроэнергии, воды, тепловой энергии и газа в smart city // Труды Московского физико-технического института. — 2020. — Т. 12. — № 1 (45).
7. Godoy J.A. et al. A new approach of V2X communications for Long Range Applications in UAVs // IEEE. 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC). — 2018. — P. 1–4.
8. Elshabrawy T., Robert J. Capacity planning of LoRa networks with joint noise-limited and interference-limited coverage considerations // IEEE Sensors Journal. — 2019. — V. 19. — No. 11. — P. 4340–4348.
9. Elshabrawy T., Robert J. Enhancing lora capacity using non-binary single parity check codes // IEEE. 14th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob). — 2018. — P. 1–7.
10. Sanchez-Gomez J. et al. Impact of SCHC Compression and Fragmentation in LPWAN: A Case Study with LoRaWAN // Sensors. — 2020. — V. 20. — No. 1. — P. 280.
11. Casals L. et al. Modeling the energy performance of LoRaWAN // Sensors. — 2017. — V. 17. — No. 10. — P. 2364.
12. Barriquello C.H. et al. Fundamentals of Wireless Communication Link Design for Networked Robotics // Service Robots. — 2018. — P. 127–142.
13. Севрюкова Е.А., Волкова Е.А., Баскаков А.Е. Разработка алгоритмического обеспечения программно-аппаратного комплекса мониторинга окружающей среды // Альманах современной метрологии. — 2019. — № 4 (20) — С. 190–199.
14. Sevryukova E., Volkova E., Gubanova N., Solodkov A., Gorelik A. A Study on design principles of Automatic System for Environment Monitoring // IEEE Conference of russian young researchers in electrical and electronic engineering (EIconRus), January 27–30, 2020. — P. 2545–2548.

Статья поступила в редакцию: 10.03.2021 г.

Статья прошла рецензирование: 19.03.2021 г.

Статья принята в работу: 01.04.2021 г.