

Анализ энергопотребления узлов телекоммуникационных сетей

А. А. Шамин¹, М. О. Колбанев², Д. А. Семенов¹, Е. А. Сбитнев¹✉

¹ Нижегородский государственный инженерно-экономический университет,
Княгинино, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ evgenij.sbitnev@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос энергопотребления и повышения энергоэффективности различных по характеристикам узлов телекоммуникационных сетей. Проведен ряд экспериментальных опытов на реальных микроконтроллерах, применяемый в промышленности для мониторинга и автоматизации процессов, а также виртуальный имитационный эксперимент для микроконтроллера беспроводной сенсорной сети. Разработана виртуальная модель, позволяющая оценить эффективное энергопотребление. Выявлены наиболее энергоемкие режимы работы устройств. Приведены расчеты по энергопотреблению и максимальному времени работы элементов питания данных устройств. На основе полученных данных предложен ряд методов повышения энергоэффективности узлов телекоммуникационных сетей.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, виртуальная модель, имитационное моделирование, интеллектуальное реле, микроконтроллер, микропроцессор, энергопотребление, энергоэффективность

Для цитирования: Анализ энергопотребления узлов телекоммуникационных сетей / А. А. Шамин, М. О. Колбанев, Д. А. Семенов, Е. А. Сбитнев // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 4. С. 61–70. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-61-70.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Analysis of Energy Consumption of Telecommunication Network Nodes

A. A. Chamin¹, M. O. Kolbanev², D. A. Semenov¹, E. A. Sbitnev¹✉

¹ Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics, Knyaginino, Russia

² Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

✉ evgenij.sbitnev@yandex.ru

Abstract. The paper considers the issue of energy consumption and energy efficiency improvement of telecommunication network nodes of various characteristics. A number of experiments was conducted on actual microcontrollers used in industry for monitoring and automating processes, as well as a virtual simulation experiment for a wireless sensor network microcontroller. A virtual model was developed to assess the efficiency of energy consumption. The most energy-intensive operation modes of the studied devices were identified. Calculations on energy consumption and maximum battery life of these devices are given. Based on the data obtained, a number of methods for improving the energy efficiency of telecommunication network nodes are proposed.

Keywords: wireless sensor networks, virtual model, simulation, intelligent relay, microcontroller, microprocessor, energy consumption, energy efficiency

For citation: Analysis of Energy Consumption of Telecommunication Network Nodes / A. A. Chamin, M. O. Kolbanev, D. A. Semenov, E. A. Sbitnev // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 4. P. 61–70. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-61-70.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

В современном обществе телекоммуникационному оборудованию уделяется особое внимание в различных сферах деятельности [1]. На данный момент в промышленности и быту (системы «Умный дом») для автоматизации и сбора данных все чаще используются различные решения, которые позволяют контролировать множество датчиков и исполнительных устройств [2]. Данные устройства чаще всего размещаются на небольших расстояниях и передают относительно небольшие объемы информации с невысокой скоростью до 250 кбит/с [3]. Однако для таких устройств важны такие свойства, как автономность, экономичность и надежность [4]. Решение вопроса энергопотребления и повышения энергоэффективности узлов телекоммуникационных сетей на сегодняшний день представляет актуальную задачу [5]. Сбой в работе таких узлов может привести к большим финансовым убыткам, потере важных данных, информации и времени. К основным факторам, влияющим на увеличение аварийных ситуаций и нарушение работы телекоммуникационной сети, относится ограниченный ресурс автономного питания узла [6], в связи с чем целью данного исследования служит анализ энергопотребления узлов телекоммуникационных сетей и его дальнейшая оптимизация.

Постановка задачи. Для достижения этой цели необходимо провести ряд реальных и виртуальных экспериментов по анализу энергопотребления различных узлов телекоммуникационных сетей.

Объект исследования. При решении задач, связанных с промышленным мониторингом и автоматизацией, объектом становятся телекоммуникационные сети с передачей информации до 250 кбит/с. Такой скорости достаточно для передачи управляющих и информационных сигналов от исполнительных устройств и сенсоров.

Материалы и методы. *Опыт 1.* В качестве первого примера для анализа энергопотребления узла телекоммуникационной сети рассмотрим интеллектуальное реле ZEN10C1DR-D. Модель снабжена жидкокристаллическим 4-строчным 12-символьным дисплеем, 8 программируемыми кнопками управления, входами/источником питания, календарем и часами. Вход/источник питания – DC12-24 В. Выходы: релейные – 250 В/8 А. Максимальная потребляемая мощность – 6.5 Вт. Узел – это экономичный вариант с индикацией состояния. Для анализа энергопотребления была

составлена LAD-программа*, которая моделирует передачу одного бита информации. На рис. 1 представлена фотография собранной установки для проведения лабораторного эксперимента. Далее представлены алгоритм и описание работы программы.

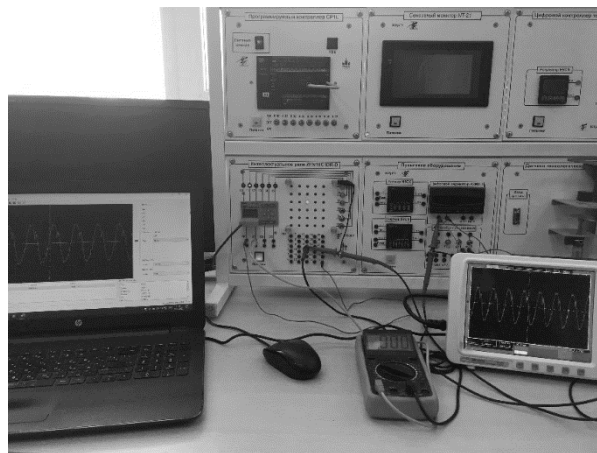


Рис. 1. Лабораторная установка с интеллектуальным реле ZEN10C1DR-D
Fig. 1. Laboratory installation with a ZEN10C1DR-D intelligent relay

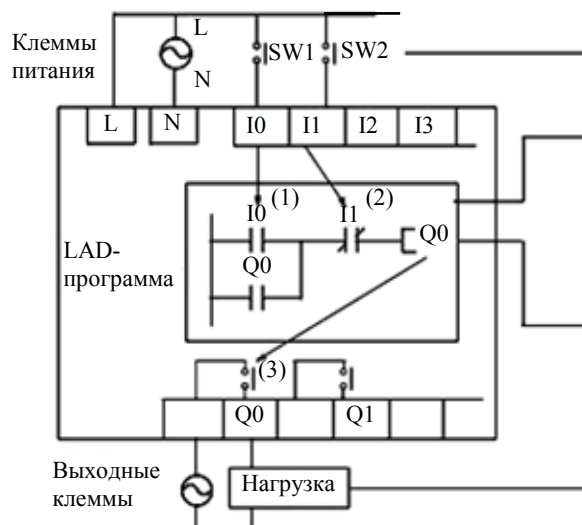


Рис. 2. Алгоритм LAD-программы
Fig. 2. LAD program algorithm

Интеллектуальное реле имеет собственные клеммы питания L и N, к которым подключается напряжение питания реле. Когда кнопка SW1, подключенная к дискретному входу I0 (рис. 2, (1)), нажата или отжата, I0 включается или вы-

* Ladder Diagram – релейная (лестничная) логика. Графический язык программирования основан на представлении коммутационных схем и удобен для специалистов по электротехнике, так как нормально замкнутые и нормально разомкнутые контактные элементы языка LAD можно сопоставить с нормально замкнутыми и нормально разомкнутыми переключателями в электрических цепях.

ключается. Когда кнопка SW2, подключенная к дискретному входу I1 (рис. 2, (2)), нажата или отжата, I1 включается или выключается. Если LAD-программа выполняется в режиме RUN и кнопка SW1 нажата, дискретный вход I0 включается, выходной бит Q0 включается, и выходной контакт (рис. 2, (3)) также включается. Когда выходной контакт (3) включается, включается и нагрузка, подключенная к выходу клеммы Q0. LAD-программа и значения параметров дублируются во внутреннем электрически программируемом модуле памяти (ЭППЗУ) интеллектуального реле и защищены от потери. Аккумулятор следует использовать для предотвращения потери текущих показаний календаря/часов, значений фиксируемых битов, фиксируемых таймера, счетчика и других данных в случае отключения питания на продолжительное время (более двух дней при температуре 25 °С). В других случаях данные хранятся в оперативной памяти с питанием от конденсатора.

На рис. 3 представлена осциллограмма энергопотребления данного узла в режиме передачи одного бита. Осциллограмма снята с помощью цифрового запоминающего осциллографа АКИП-4122/2V. Время, затраченное на работу, составило 19.914 мс за один цикл нажатия кнопки SW1.

Рассмотрим рис. 3 более подробно. Участок 0 показывает включение микроконтроллера и пере-

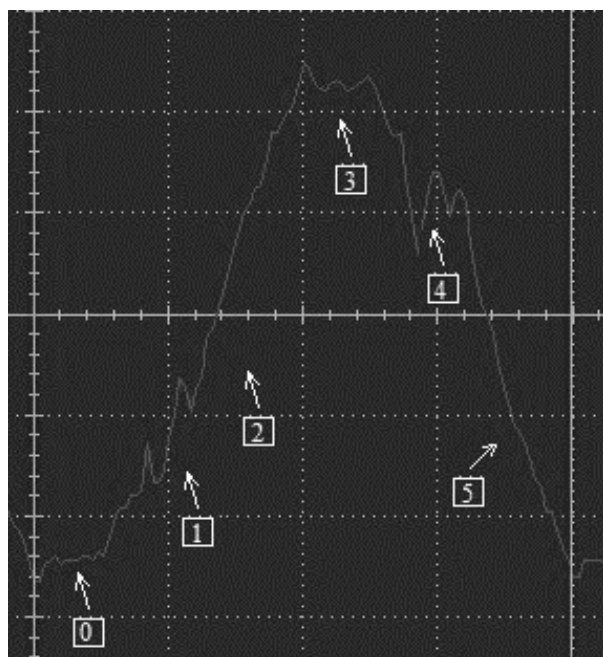


Рис. 3. Энергопотребление узла ZEN10C1DR-D
Fig. 3. ZEN10C1DR-D node Power Consumption

ход его в ждущий режим, при этом затрачивается энергия в 0.005 мВт на протяжении 2.645 мс. Далее на участке 1 микроконтроллер переходит в режим Start-up на протяжении 1.634 мс с затратой энергии 0.003 мВт. После нажатия кнопки SW1 микроконтроллер входит в рабочий режим (участок 2) и начинает передавать один бит информации на светодиод в течение 5.445 мс с энергией 0.01 мВт. Участок 3 – время горения светодиода с затратой энергии 0.008 мВт в течение 4.356 мс. Участок 4 показывает переходный процесс при выключении светодиода. Затрата энергии составила 0.003 мВт на протяжении 1.556 мс. Участок 5 показывает возврат микроконтроллера в ждущий режим, затрата энергии – 0.008 мВт, длительность – 4.278 мс. Из полученных данных видно, что энергопотребление узла неравномерно на относительно длительных промежутках времени и зависит от фазы работы микроконтроллера. Часть энергии тратится на коммуникацию, а не на передачу одного бита информации.

Опыт 2. В качестве второго примера для анализа энергопотребления узла телекоммуникационной сети рассмотрим модуль Arduino Nano, построенный на базе микроконтроллера ATMEGA 328P. Напряжение логических уровней – 5 В. Постоянный ток через вход/выход – 40 мА · ч с одного вывода и 500 мА · ч со всех выводов. Потребляемая мощность – 19 мА. Также для анализа энергопотребления был составлен скетч, моделирующий передачу одного бита информации. На рис. 4 представлена фотография собранной установки для проведения лабораторного эксперимента. Далее представлена часть скетч-программы:

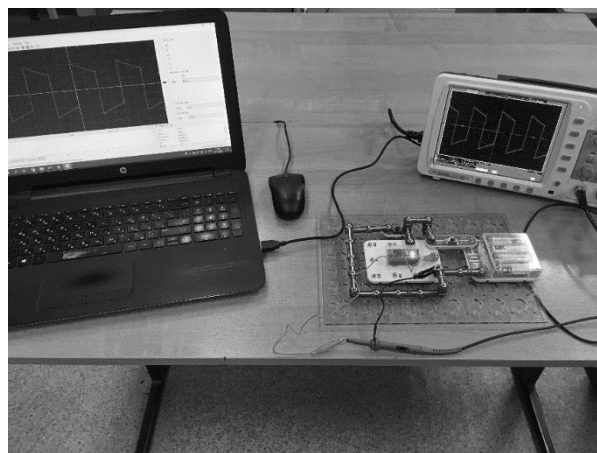


Рис. 4. Лабораторная установка с модулем Arduino Nano
Fig. 4. Laboratory installation with Arduino Nano module

```
void setup()
{
  Serial.begin(115200);
}
unsigned long t0 = 0;
unsigned long t1 = 0;
void loop()
{
  Serial.print("osc\n");
  Serial.println(t1-t0);
  t0 = micros();
  for (int i = 0; i < 500; i++)
  {
    //Read analog pin
    int val = analogRead(A4);
    Serial.write( (val >> 8) & 0xff );
    Serial.write( val & 0xff );
  }
  t1 = micros();
}...
```

Лабораторная установка с модулем Arduino Nano представляет собой сам модуль, источник питания в виде аккумуляторного отсека 4×1.5 В с выключателем и кнопкой включения/отключения. Осциллограф подключен к выводу передачи асинхронных выходных данных (TX), передающему асинхронные выходные данные. Скetch-программа составлена таким образом, что при нажатии/отпускании кнопки сигнал в 1 бит передается на выход TX. Далее сигнал зацикливается. Осциллограф фиксирует непрерывный сигнал.

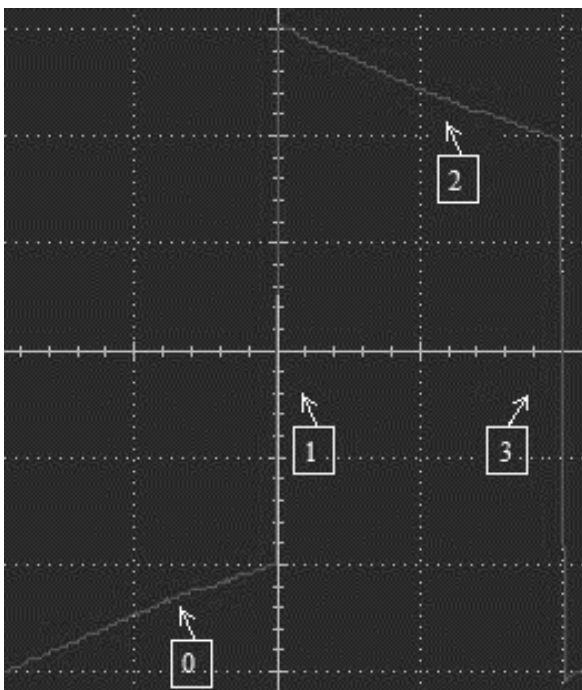


Рис. 5. Энергопотребление узла модуль Arduino Nano
Fig. 5. Power consumption of the Arduino Nano Module

На рис. 5 представлена осциллограмма энергопотребления данным узлом в режиме передачи одного бита при нажатии/отпускании кнопки. Время передачи одного бита составило 20 мс за один цикл нажатия кнопки.

Участок 0 объединяет в себе включение микроконтроллера, переход в ждущий режим и переход в режим Start-up, при этом затрачивается энергия менее 0.0001 мВт на протяжении 10.13 мс. Участок 1 – нажатие кнопки. Участок 2 – рабочий режим и передача информации 1 бит, который занимает 9.887 мс с затратой энергии 0.0003 мВт. Участок 3 – переход в ждущий режим, с затратой энергии менее 0.0001 мВт.

Наиболее перспективное направление в проектировании систем контроля, сбора параметров и управления объектов представлено беспроводными системами. К основному наиболее перспективному направлению развития беспроводных телекоммуникационных технологий относятся беспроводные сенсорные сети (БСС). БСС обладают рядом преимущественных характеристик – миниатюрностью узлов, сравнительно невысокой стоимостью, а также очень низким энергопотреблением [7]. На данный момент стоимость компонентов БСС еще слишком велика, чтобы иметь возможность построить сеть с разными модулями для научных исследований. В этом случае актуально виртуальное имитационное моделирование отдельных событий и состояния этих сетей.

В настоящее время наиболее эффективное средство для оценки пропускной способности сети, производительности узлов сети и главного эффективного энергопотребления – имитационное моделирование. Энергопотребление – один из основных факторов для БСС, так как эти устройства питаются в основном от аккумуляторов. На данный момент для этих целей разработано достаточно большое количество виртуальных сетевых симуляторов. Для наших целей наиболее эффективное средство – среда имитационного моделирования *OMNeT++* (Objective Modular Network Testbed in C++) [8], так как в основную задачу входит моделирование и исследование стандарта и протокола БСС с оценкой его энергоэффективности. Среда *OMNeT++* представляет собой систему моделирования на основе дискретных событий, которая может быть использована для различных задач [9]. Для моделирования будем использовать дополнительную библиотеку *Castalia*, предназначенную для симуляции сетей с низким потреблением энергии. Она воспринимает

сенсорную сеть как набор узлов, каждый из которых опирается на ряд устройств зондирования, взаимодействующих с определенными физическими процессами с целью извлечения данных из среды.

Опыт 3. В качестве третьего примера для анализа энергопотребления узла БСС рассмотрим модель радиопередающего устройства, основанного на реальной радиостанции, построенной на основе приемо-передатчика с использованием набора микросхем CC2420. Беспроводной микроконтроллер фирмы «Jennic» JN5121-IJ представляет собой объединение 32-разрядного микроконтроллера RISC (reduced instruction set computer) с приемопередатчиком диапазона 2.4 ГГц. Микроконтроллер выполнен в корпусе QFN56 размером 8×8 мм.

Имитационное моделирование будет проводиться для двух рабочих станций ($SN.numNodes = 2$) в течение одного часа ($sim-time-limite = 3600s$). Устройства используют в качестве протокола канального уровня протокол IEEE 802.15.4 ($SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "Mac802154"$). В проектируемой виртуальной сети все устройства будут полнофункциональными ($SN.node[*].Communication.MAC.isFFD = true$), первая рабочая станция станет PAN-координатором ($SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true$), скорость передачи данных будет равняться 1024 симв./с ($SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 1024$), в одном символе будет передаваться 2 байт информации ($SN/node[*].Communication.MAC.phyBitsPerSymbol = 2$). Для радиоприемопередатчика устанавливается файл входных данных со стандартными настройками ($SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/BANRadio.txt"$) и мощность передатчика устанавливается на уровне -25dB ($SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "-25dBm"$).

Для моделирования сети в среде *OMNeT++* необходимо создать файл конфигурации *omnetpp.ini*. Ниже представлена часть скетч-программы:

```
[General]
network = SN
include ../parameters/Castalia.ini
sim-time-limit = 3600s
SN.numNodes = 2
SN.node[*].Communication.MACProtocolName = "Mac802154"
SN.node[*].Communication.MAC.isFFD = true
```

```
SN.node[0].Communication.MAC.isPANCoordinator = true
SN.node[*].Communication.MAC.phyDataRate = 1024
SN.node[*].Communication.MAC.phyDitsPerSymbol = 2
SN.wirelessChannel.pathLossMapFile = "../Parameters/WirelessChannel/BANmodels/pathLossMap.txt"
SN.wirelessChannel.temporalModelParametersFile = "../Parameters/WirelessChannel/BANmodels/TemporalModel.txt"
SN.node[*].ApplicationName = "ThroughputTest"
SN.node[*].Application.startupDelay = 1
SN.node[*].Communication.Radio.RadioParametersFile = "../Parameters/Radio/BANRadio.txt"
SN.node[*].Communication.Radio.TxOutputPower = "-25dBm"...
```

После создания имитационной модели в среде *OMNeT++* выполняется сборка проекта (рис. 6), выбирается созданная конфигурация модели *omnetpp.ini* и запускается симуляция модели.

В симуляторах *wireless sensor network/беспроводных сенсорных сетей (WSN/БСС)* распознаванием обычно пренебрегают. Обычно узлам передаются случайные числа или каждому узлу присваивается статическое значение. Такие проблемы, как шум или смещение устройства распознавания, редко принимаются во внимание. В библиотеке *Castalia* эта проблема решена и фиксируются некоторые важные элементы сенсорники. Обычная практика генерации полученных данных заключается в передаче случайных чисел узлам, чтобы каждый узел имел статическое значение или, в лучшем случае, передавал узлам следы полученных данных. Последний случай действительно реалистичен, если речь идет об очень специфических физических процессах, но следы данных редко поддаются любому виду моделирования физического процесса. Для разработки алгоритма на ранней стадии нужны модели физических процессов, которые достаточно гибки, но в то же время имеют некоторое соответствие реальным процессам (например, пространственная корреляция данных, изменчивость во времени). Для этой цели создана универсальная модель физического процесса, чтобы снабжать данными чувствительные устройства узлов.

Авторами была проведена серия экспериментов на составленной имитационной модели с целью анализа энергопотребления узлов БСС. Энергопотребление каждого узла сети получено с

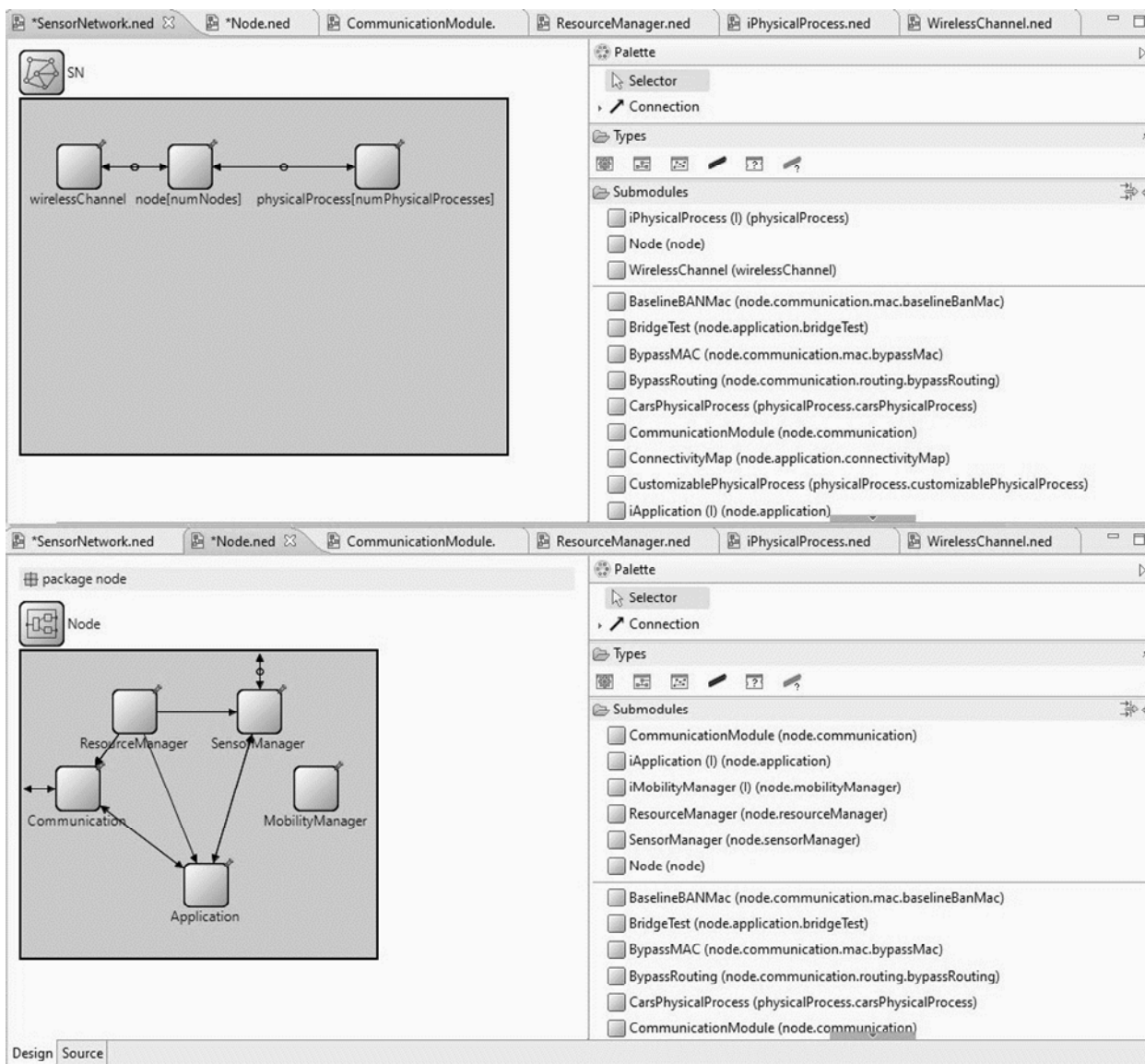


Рис. 6. Структура беспроводной сенсорной сети
Fig. 6. Structure of the wireless sensor network

использованием стандартной встроенной команды библиотеки *Castalia* – `$ CastaliaResults -i gen.txt -s energy -n`. Анализ результата моделирования – процесс длительный и трудоемкий. Результат моделирования записывается в виде скалярных значений, векторных значений и гистограмм. Затем применяются статистические методы для извлечения соответствующей информации и вывода заключения. Этот процесс может включать в себя несколько этапов. Обычно нужно отфильтровать и преобразовать данные и отобразить результат на графике.

Чтобы однозначно определить, какие режимы работы нужно свести к минимуму энергопотребления, рассмотрели номинальное энергопотребление телекоммуникационных сетей.

Результаты и обсуждение. В табл. 1, 2 представлено номинальное энергопотребление исследованных узлов телекоммуникационных систем в различных режимах работы.

Энергопотребление узла E_e за один цикл, исходя из приведенного анализа, можно определить как сумму энергий потребления:

$$E_e = E_{\text{slip}} + E_{\text{st.up}} + E_{\text{ti}} + E_{\text{om}} + E_{\text{tp}} + E_{\text{sst}},$$

где E_{slip} – энергия, потребляемая узлом в ждущем режиме; $E_{\text{st.up}}$ – энергия, потребляемая в режиме «Start-up»; E_{ti} – энергия, потребляемая в режиме передачи информации; E_{om} – энергия, потребляемая в рабочем режиме; E_{tp} – энергия, потребляемая при переходном процессе; E_{sst} – энергия, потребляемая при переходе узла в ждущий режим.

Табл. 1. Номинальное энергопотребление узлов в различных режимах работы, реальный эксперимент
 Tab. 1. Nominal power consumption of nodes in various operating modes, real experiment

Наименование модуля	Энергопотребление, мВт					
	Ждущий режим	Start-up	Передача информации	Рабочий режим	Переходный процесс	Переход в ждущий режим
Интеллектуальное реле ZEN10C1DR-D	0.005	0.003	0.01	0.008	0.003	0.008
Модуль Arduino Nano	<0.0001	0.0003	0.0003	–	–	<0.0001

Табл. 2. Номинальное энергопотребление узлов в различных режимах работы, виртуальный эксперимент
 Tab. 2. Nominal power consumption of nodes in various operating modes, virtual experiment

Наименование модуля	Энергопотребление, мА			
	Активный Start-up + рабочий режим + переходный процесс + переход в ждущий режим	Режим сна Ждущий режим	Передача Передача информации	Прием
Микроконтроллер JN1521-IG	12	0.002	123	46

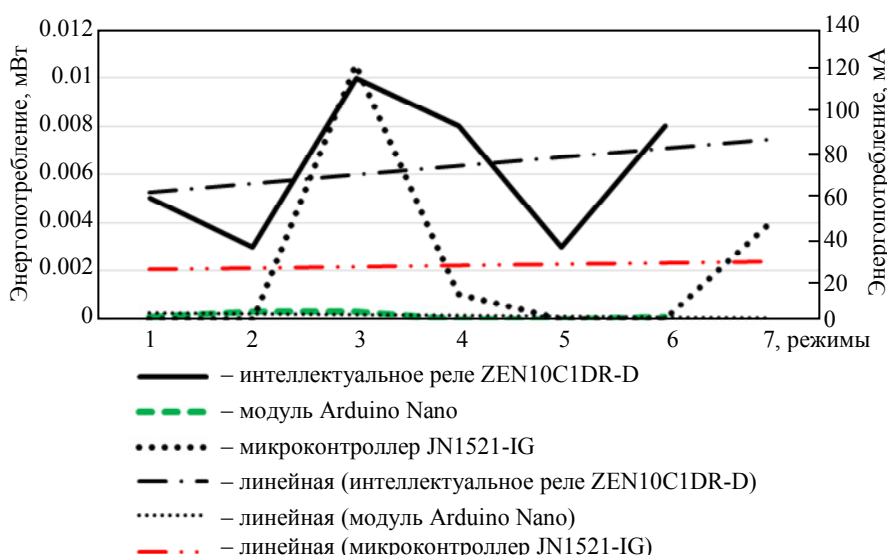


Рис. 7. Среднее значение энергопотребление узлов телекоммуникационной сети
 Fig. 7. Average power consumption of telecommunication network nodes

Для определения среднего энергопотребления узлов в сети необходимо определить наиболее энергоемкий цикл работы, который присутствует в узлах телекоммуникационных сетей. Наибольший интерес представляет цикл работы с энергией потребляемой в режиме передачи информации.

На рис. 7 представлены графики среднего значения энергопотребления различных узлов телекоммуникационной сети (1 – ждущий режим; 2 – Start-up; 3 – передача информации; 4 – рабочий режим; 5 – переходный процесс; 6 – переход в ждущий режим; 7 – прием). Слева по оси ординат значение энергопотребления в милливаттах для двух модулей, с которыми проведен реальный эксперимент (интеллектуальное реле ZEN10C1DR-D и модуль Arduino Nano). Справа по оси ординат значение энергопотребления в миллиамперах для

модуля микроконтроллера JN1521-IG, с которым проведен виртуальный эксперимент. Различные значения по осям ординат взяты для удобства расчета максимального времени работы узла. Соотношение между показателями энергопотребления узлов для разных производителей отличается. Для примера расчета энергопотребления в различных режимах рассмотрим микроконтроллер JN1521-IG, данные которого получены с помощью виртуального имитационного моделирования.

Из таблиц наглядно видно, что модуль в активном режиме потребляет в несколько раз больше электроэнергии, чем в режиме сна. Отправка и прием данных также увеличивают энергопотребление. На подготовку к передаче собранных данных этот микроконтроллер тратит около 2 мс, на передачу тратится 4 мс, столько же тратится на

прием данных. Время активного режима работы микроконтроллера составляет 18 мс. Таким образом, один цикл работы устройства без учета режима сна будет составлять 28 мс. Следовательно, в секунду в активном режиме, в режиме передачи и в режиме приема микроконтроллер будет работать ($1000 \text{ мс}/28 \text{ мс} = 35.7$) \approx 36 раз. При расчете среднего потребления тока за одну секунду не учитывался режим сна, при котором оно минимально, отсюда можно определить среднее потребление тока микроконтроллером, мА:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_{\text{раб}} I_{\text{потр}}^n)}{T \cdot 1000},$$

где $t_{\text{раб}}$ – время работы микроконтроллера в конкретном режиме, мс; $I_{\text{потр}}$ – ток потребления микроконтроллера в конкретном режиме, мА; n – количество включений в секунду, раз; $T = 1$ с – время, за которое будет рассчитываться среднее потребление тока;

$$I_{\text{ср}} = [(18 \cdot 12 \cdot 36) + (3 \cdot 123 \cdot 36) + (3 \cdot 46 \cdot 36) + (2 \cdot 10 \cdot 36)] / [1 \cdot 1000] = 26.75 \text{ мА},$$

где 18, 3, 3, 2 – времена работы микроконтроллера, определенные с помощью библиотеки *Castalia*, мс; 12, 123, 46, 10 – токи потребления микроконтроллера, определенные с помощью библиотеки *Castalia*, мА; 36 – количество включений микроконтроллера в секунду.

Большинство микроконтроллеров имеют низкий ток потребления в активном режиме, что позволяет использовать в них обычные аккумуляторы. Микроконтроллер JN1521-IG имеет рабочее напряжение питания 2.3...3.6 В. При расчете времени работы будем предполагать, что модуль работает от двух аккумуляторов Ni-Mh AA (HR06) с емкостью 2000 мА·ч и напряжением 1.2 В. Тогда максимальное время работы будет составлять

$$t_{\text{раб}} = \frac{n_1 C_{\text{акб}}}{I_{\text{ср}}},$$

где n_1 – количество аккумуляторов, шт; $C_{\text{акб}}$ – емкость одного аккумулятора, мА·ч;

$$t_{\text{раб}} = \frac{2 \cdot 2000}{26.75} = 149.5 \text{ ч}.$$

Основная энергия этого времени расходуется при передаче данных. Соответственно, если сделать возможность ухода микроконтроллера в спящий режим быстрее или чаще, максимальное время работы будет больше. Для повышения энергоэффективности модули должны включаться в соответствии с заданным расписанием.

Еще одним способом повышения энергоэффективности может быть использование солнечной энергии [10]. Узлы, работающие от такого источника, могут обрабатывать данные, получать и передавать пакеты, а также выполнять другие задачи, не потребляя энергию аккумулятора. Поэтому хотелось бы, чтобы узлы, работающие от солнечной энергии, выполняли наиболее энергозатратные задачи. В сетях на основе кластеров головные узлы кластеров отвечают за выполнение основных и наиболее энергоемких задач. Следовательно, привлекателен выбор узлов, работающих на солнечной энергии, в качестве руководителей кластеров, однако это осложняется тем, что источник энергии – непостоянный.

Заключение. Механизмы уменьшения потребления энергии узлами зависят от модели сбора информации. Также на потребление энергии узла влияет алгоритм работы узла, построенный по модели сбора информации. Результаты исследования представляют интерес с точки зрения описания реального «живого» потребления узлов телекоммуникационной сети. Энергопотребление зависит от многих факторов, поэтому для того чтобы оценить время «жизни» сети, используют модели энергопотребления, которые способны реально описать потребление узлов телекоммуникационной сети.

При помощи предложенного подхода к анализу энергопотребления узлов телекоммуникационной сети натурального и виртуального моделирования можно получить оценку энергетических характеристик и предложить методы, направленные на повышение энергоэффективности узлов телекоммуникационных сетей.

Список литературы

1. Миськов Д. В., Малиев Д. А., Шмелева А. Н. Глобальные телекоммуникационные системы // Точная наука. 2023. № 142. С. 38–43.

2. The using of ZigBee protocol to organize the «Smart Home» system for aged people / M. S. Stepanov, L. S. Poskotin, D. V. Shishkin, T. Turgut, A. R. Muzata //

T-Comm. 2021. Vol. 15, no. 10. P. 64–70. doi: 10.36724/2072-8735-2021-15-10-64-70.

3. Корнеева Т. В. Сенсорные сети для систем контроля и управления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 8. С. 28–41.

4. Рылов С. А. IIoT аппаратная архитектура распределенных систем управления непрерывными промышленными производствами и агрокомплексами // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 1(50). С. 105–113. doi: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-105-113.

5. Росляков А. В. Оценка энергопотребления будущих сетей // Электросвязь. 2016. № 8. С. 43–50.

6. Адамов А. П., Адамова А. А. Беспроводные сенсорные сети с нулевой мощностью // Тр. междунар. симп. «Надежность и качество». 2018. Т. 1. С. 261–264.

7. Русанов П. И., Юрочкин А. Г. Особенности работы беспроводных сенсорных сетей // Вестн. Воро-

нежского ин-та высоких технологий. 2019. № 4(31). С. 79–81.

8. Думов М. И., Хабаров С. П. Моделирование беспроводных сетей в среде OMNeT++ с использованием INET framework // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19, № 6. С. 1151–1161. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1151-1161.

9. Никишин К. И. Моделирование беспроводной сенсорной сети с использованием OMNeT++ // Вестн. Рязанского гос. радиотехнического ун-та. 2021. № 78. С. 46–54. doi: 10.21667/1995-4565-2021-78-46-54.

10. Шахов В. В., Мигов Д. А., Соколова О. Д. Беспроводные сенсорные сети, оснащенные средствами получения энергии из окружающей среды // Проблемы информатики. 2014. № 4(25). С. 69–79.

Информация об авторах

Шамин Алексей Анатольевич – канд. экон. наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, ул. Октябрьская, д. 22а, Княгинино, Нижегородская область, 606340, Россия.

E-mail: al.shamin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4138-6256>

Колбанев Михаил Олегович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: nev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>

Семенов Дмитрий Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, ул. Октябрьская, д. 22а, Княгинино, Нижегородская область, 606340, Россия.

E-mail: xxxmy@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9228-6864>

Сбитнев Евгений Александрович – старший преподаватель кафедры «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» Нижегородского государственного инженерно-экономического университета, ул. Октябрьская, д. 22а, Княгинино, Нижегородская область, 606340, Россия.

E-mail: evgenij.sbitnev@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7114-6934>

Авторский вклад:

Шамин А. А. – общее руководство проектом.

Колбанев М. О. – научное руководство, формулирование основной концепции исследования.

Семенов Д. А. – осуществление критического анализа и доработка текста.

Сбитнев Е. А. – подготовка текста статьи, проведение анализа и подготовка первоначальных выводов, анализ полученных результатов, проведение экспериментов.

References

1. Mis'kov D. V., Maliev D. A., Shmeleva A. N. Global'nye telekommunikacionnye sistemy // Tochnaja nauka. 2023. № 142. S. 38–43. (In Russ.).

2. The using of ZigBee protocol to organize the «Smart Home» system for aged people / M. S. Stepanov, L. S. Poskotin, D. V. Shishkin, T. Turgut, A. R. Muzata //

T-Comm. 2021. Vol. 15, no. 10. P. 64–70. doi: 10.36724/2072-8735-2021-15-10-64-70.

3. Korneeva T. V. Sensornye seti dlja sistem kontrolja i upravlenija // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2016. № 8. S. 28–41. (In Russ.).

4. Rylov S. A. IoT apparatnaja arhitektura raspredelennyh sistem upravlenija nepreryvnymi promyshlennymi proizvodstvami i agrokomplesami // Jelektrotehnologii i jelektrooborudovanie v APK. 2023. T. 70, № 1(50). S. 105–113. doi: 10.22314/2658-4859-2023-70-1-105-113. (In Russ.).

5. Rosljakov A. V. Ocenka jenergopotreblenija budushnih setej // Jelektrosvjaz'. 2016. № 8. S. 43–50. (In Russ.).

6. Adamov A. P., Adamova A. A. Besprovodnye sensornye seti s nulevoj moshhnost'ju // Tr. mezhdunar. simp. «Nadezhnost' i kachestvo». 2018. T. 1. S. 261–264. (In Russ.).

7. Rusanov P. I., Jurochkin A. G. Osobennosti raboty besprovodnyh sensornyh setej // Vestn. Voronezhskogo in-ta vysokih tehnologij. 2019. № 4(31). S. 79–81. (In Russ.).

8. Dumov M. I., Habarov S. P. Modelirovanie besprovodnyh setej v srede OMNeT++ s ispol'zovaniem INET framework // Nauch.-tehn. vestn. informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki. 2019. T. 19, № 6. S. 1151–1161. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-6-1151-1161. (In Russ.).

9. Nikishin K. I. Modelirovanie besprovodnoj sensornoj seti s ispol'zovaniem OMNET++ // Vestn. Rjazanskogo gos. radiotehnicheskogo un-ta. 2021. № 78. S. 46–54. doi: 10.21667/1995-4565-2021-78-46-54. (In Russ.).

10. Shahov V. V., Migov D. A., Sokolova O. D. Besprovodnye sensornye seti, osnashhennye sredstvami poluchenija jenergii iz okruzhajushhej sredy // Problemy informatiki. 2014. № 4(25). S. 69–79. (In Russ.).

Information about the authors

Alexey A. Shamin – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of «Infocommunication Technologies and Communication Systems», Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University, Oktyabrskaya St., 22a, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, 606340, Russia.

E-mail: al.shamin@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4138-6256>

Mikhail O. Kolbanev – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: mokolbanev@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-4825-6972>

Dmitriy A. Semenov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of «Infocommunication Technologies and Communication Systems», Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University, Oktyabrskaya St., 22a, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, 606340, Russia.

E-mail: xxxmy@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9228-6864>

Evgeny A. Sbitnev – Senior Lecturer of the Department of «Infocommunication Technologies and Communication Systems», Nizhny Novgorod Engineering-Economic State University, Oktyabrskaya St., 22a, Knyaginino, Nizhny Novgorod region, 606340, Russia.

E-mail: evgenij.sbitnev@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7114-6934>

Author's contribution:

Chamin A. A. – managed the research project.

Kolbanev M. O. – research supervision, developed the theoretical framework.

Semenov D. A. – critical analysis and revision of the text.

Sbitnev E. A. – writing of the draft, analysis and preparation of the initial ideas, analyzed data, implementation of experiments.

Статья поступила в редакцию 21.12.2023; принята к публикации после рецензирования 20.02.2024; опубликована онлайн 23.04.2024.

Submitted 21.12.2023; accepted 20.02.2024; published online 23.04.2024.
