

УДК 621.391

# ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЭКСПЕРТНОЙ ОЦЕНКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С НИЗКИМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ



**И.С. Шостко**

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – This article hanged on designing a wireless sensor network (WSN). The problem of optimal selection network components is discussed. Depending on the destination network to its elements have different private and general requirements. A general requirement for any WSN is the lowest power consumption of its elements. This indicator will always be minimized. Other parameters will vary depending on the functional purpose of the WSN. Depending on the selection criteria must choose modules with optimal technical performance. Application of methods of expert assessments simplifies this task. This article is an calculation of the expert evaluation modules for WSN with low power consumption and high performance. The problem is solved by the weighting coefficients. The essence of this method is to assign all the generalized indicators of weighting coefficients. Compare modules. Indicators of each module are evaluated on a 10-tibalnoy scale. Next, you need to multiply the scores obtained by the weight of this parameter. As a result, we obtain the total estimate of the parameters for each module.

**Анотація** – При проектуванні безпроводової сенсорної мережі (БСМ) виникає задача оптимального вибору її компонентів. Залежно від призначення мережі до її елементів пред'являють різні приватні і загальні вимоги. Загальною вимогою до будь якої БСМ є мінімальне енергоспоживання її елементів, тому цей показник завжди буде мінімізуватися, решта ж показників будуть змінюватися в залежності від функціонального призначення БСМ. Залежно від обраних критеріїв необхідно вибирати модулі з оптимальним співвідношенням технічних показників. Застосування методів експертних оцінок спрощує вирішення цього завдання.

**Анотация** – При проектировании беспроводной сенсорной сети (БСС) возникает задача оптимального выбора её компонентов. В зависимости от предназначения сети к её элементам предъявляются различные частные и общие требования. Общим требованием к любой БСС является минимальное энергопотребление её элементов, поэтому этот показатель всегда будет минимизироваться, остальные же показатели будут варьироваться в зависимости от функционального назначения БСС. В зависимости от выбранных критериев необходимо выбирать модули с оптимальным соотношением технических показателей. Применение методов экспертных оценок упрощает решение этой задачи.

## Введение

В настоящее время беспроводные сенсорные сети (БСС) все шире используются во многих областях жизнедеятельности человека, включая промышленный мониторинг и мониторинг окружающей среды, здравоохранение, контроль движения объектов и т.д. Возможность развертывания сети в сложных условиях, отсутствие проводных коммуникаций и минимальные размеры сенсорных устройств делают технологию БСС чрезвычайно гибкой и востребованной.

Устойчивая тенденция снижения стоимости беспроводных решений и повышение их эксплуатационных параметров позволяют позиционировать БСС в качестве высокоэффективных и перспективных решений для систем сбора телеметрических данных, средств дистанционной диагностики и обмена информации.

В числе наиболее распространённых прикладных задач, реализуемых на основе технологий БСС:

- мониторинг задымленности и обнаружение очагов возгорания лесных массивов и торфяников;
- сейсмический мониторинг и обнаружение потенциальной напряженности в тектонических пластах;
- мониторинг состояния и удаленный контроль периметра объектов в охраняемых системах;
- экологический мониторинг состояния окружающей среды (обнаружение и предсказание природных стихий);
- автоматический дистанционный контроль параметров радиационно опасных объектов, газо-нефтехранилищ и других потенциально опасных промышленных объектов;
- мониторинг дорожного трафика и объектов транспортной инфраструктуры (мостов, железнодорожных переездов, виадуков и т.д.);
- мониторинг состояния несущих конструкций зданий и сооружений;
- контроль местоположения, оповещение и организация надёжной связи при проведении спасательных операций;
- мониторинг промышленных объектов и характеристик технологических процессов;
- мониторинг медицинских и биологических параметров живых организмов.

При разработке этих проектов в большинстве случаев применяют готовые модули с интегрированной на одном кристалле системой (микроконтроллер вместе с приемопередатчиком), которые работают на основе стандарта IEEE 802.15.4. Стандарт IEEE 802.15.4 является фундаментом для более высокоуровневых протоколов (ZigBee, 6LoWPAN, DigiMesh, WirelessHART и др). Основными производителями модулей стандарта IEEE 802.15.4 являются следующие компании: Texas Instruments, Digi International Inc, Microchip, Atmel, ST Microelectronics, Freescale, Jennic, Analog Devices, Radiocrafts, Ember и др.

## **I. Постановка задачи**

При проектировании БСС возникает задача оптимального выбора технологии изготовления, поддерживаемых протоколов и функциональных возможностей модулей. В зависимости от предназначения БСС к элементам модуля предъявляются различные частные и общие требования. Рассмотрим некоторые из частных требований:

- к микроконтроллеру. Производительность микроконтроллера и скорость передачи данных: некоторым потребителям требуется собирать мегабиты данных в секунду, другим необходимо всего лишь несколько раз в сутки включать и выключать отдельные устройства.

- к приёмопередатчику. Дальность удаления мотов друг от друга: расположены ли моты на большой территории или сосредоточены в одном месте? Дистанция может составлять от нескольких метров для мотов, расположенных, например, внутри автомобиля или самолёта, до нескольких километров, например для контроля параметров распределительной сети водоснабжения. Чем дальше датчики находятся

друг от друга, тем мощнее потребуется передатчик, что влечет за собой дополнительные расходы энергии. Элементы сети могут располагаться внутри помещений или на открытом пространстве.

Общим требованием к любой БСС является минимальное энергопотребление её элементов, поэтому этот показатель всегда будет минимизироваться, остальные же показатели будут варьироваться в зависимости от функционального назначения БСС.

Для выбора модулей с оптимальными общими и частными показателями, предлагается использовать методы экспертных оценок.

## II. Анализ характеристик модулей для построения беспроводных сенсорных сетей стандарта IEEE 802.15.4

Каждый модуль представляет собой плату, на которой размещаются микроконтроллер, память (ROM, RAM), цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, радиочастотный приемопередатчик, источник питания и датчики (рис.1).

Питание модуля осуществляется от батареи.

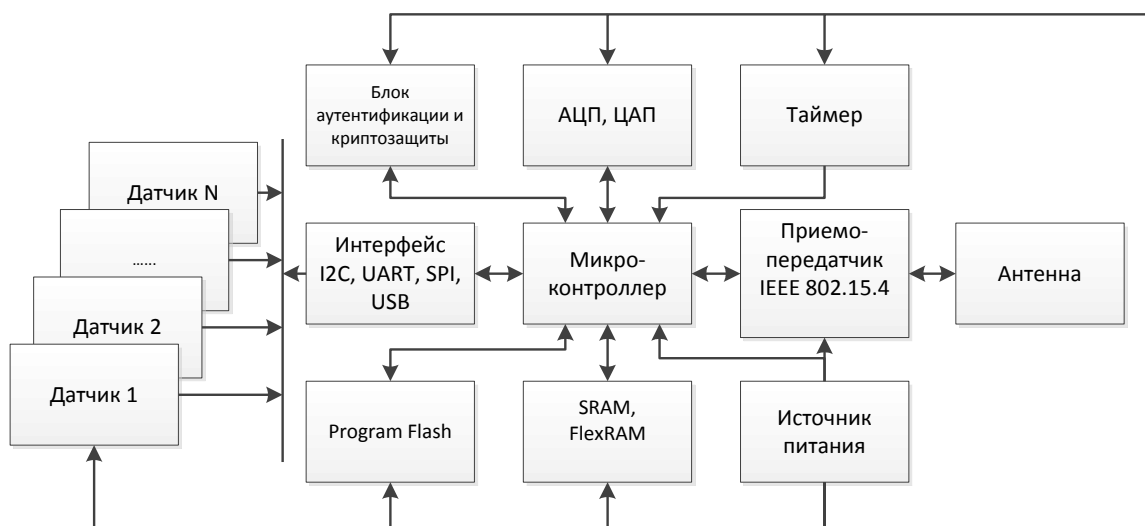


Рис. 1. Структурная схема модуля

Такой модуль используется только для сбора, первичной обработки и передачи сенсорных данных. Основная функциональная обработка данных осуществляется на узле, или шлюзе. Модули БСС могут обмениваться между собой информацией. Это, во-первых, сенсорная информация, считываемая с датчиков, а во-вторых, информация о состоянии устройств и результатах процесса передачи данных. Информация передается от одних модулей другим по цепочке, и в итоге ближайшие к шлюзу модули сбрасывают ему всю накопленную информацию. Если часть модулей выходит из строя, работа сенсорной сети после реконфигурации должна продолжаться. Но в этом случае, естественно, уменьшается число источников информации.

Важнейшим фактором при работе БСС является ограниченная емкость батарей, устанавливаемых на модули. Следует учитывать, что в ряде случаев заменить батареи невозможно. В связи с этим необходимо выполнять в таких модулях только

простейшую первичную обработку, ориентированную на уменьшение объема передаваемой информации, и, что самое главное, минимизировать число циклов приема и передачи данных. Для решения этой задачи разработаны специальные коммуникационные протоколы. Протоколы для БСС реализованы на основании разработанного ранее стандарта IEEE 802.15.4, который описывает физический уровень и уровень доступа к среде для беспроводных сетей передачи данных на небольшие расстояния (в закрытом пространстве до 75 м и на открытом пространстве до 1700 м) с низким энергопотреблением, но с высокой степенью надежности.

Для сравнения в статье выбраны модули, изготовленные разными производителями [1-8]. Характеристики модулей приведены в табл. 1-4, где введены обозначения: ток в режиме передачи ( $I_{0Tx}$ ), ток в режиме приема ( $I_{0Rx}$ ), ток в режиме сна ( $I_{0sleep}$ ), частота микроконтроллера ( $F_{proc}$ ); рабочая частота ( $f$ ), чувствительность приемника ( $Pr_{min}$ ), минимальная и максимальная выходная мощность передатчика ( $Pt_{min}$ ,  $Pt_{max}$ ), диапазон напряжения питания ( $\Delta U$ ).

Американская компания Texas Instruments предлагает большое количество как стандартизированных, так и проприетарных программно-аппаратных решений для построения БСС.

Таблица 1. Основные характеристики семейства модулей платформы Texas Instruments для построения БСС

1	Производитель	Texas Instruments			
2	Название модуля	CC2538	CC2530	CC2511	CC2510
3	Тип процессора / ( $F_{proc}$ , МГц)	ARM Cortex-M3/(150)	8051/(16)	8051/(16)	8051/(16)
4	Flash size, kBit	до 512	32, 64,128,256	16, 32	16, 32
5	RAM size, kBit	до 32	8	2, 4	2, 4
6	$\Delta U$ , В	2 – 3,6	2 – 3,6	2 – 3,6	2 – 3,6
7	$f$ , ГГц	2,394 – 2,507	2,394 – 2,507	2.4	2.4
8	$Pr_{min}$ , dBm	-97	-97	-103	-103
9	$Pt_{min} - Pt_{max}$ , dBm	+7	+4.5	+1	+1
10	$I_{0sleep}$ , мкА	1,3	0,4		
11	$I_{0Rx}$ , мА	20	20,5	14,7	14,7
12	$I_{0Tx}$ , мА	34	34		

Европейская компания ST Microelectronics выпускает для сетей стандарта IEEE 802.15.4 системы на кристалле (SoC) семейства STM32W [5]. Отличительной особенностью этого семейства является использование быстродействующего процессора ARM Cortex-M3. Модули STM32W позволяют использовать стеки сетевых протоколов, такие как RF4CE, ZigBee-PRO и 6LoWPAN.

Американская компания Atmel выпускает для сетей стандарта IEEE 802.15.4 приемопередатчики AT86RF212, AT86RF230, AT86RF231, AT86RF232 и AT86RF233. На

базе вышеперечисленных приемопередатчиков и собственных микроконтроллеров компания Atmel выпускает модули на кристалле ATmega128RFA1, ATmega128RFR2, ATmega256RFR2, ATSAMR21E18A и другие сборки [4].

Таблица 2. Основные характеристики модулей ST Microelectronics и Atmel

1	Производитель	ST Microelectronics	Atmel	
2	Название модуля	STM32W108C8	ATmega256/128/64RFR2	ATSAMR21E/G18A
3	Тип процессора/ ( $F_{proc}$ , МГц)	32-bit ARM® Cortex™-M3/(120)	8-bit AVR/(16)	Cortex-M0+/(48)
4	Flash size, kBit	64	64, 128, 256	64, 128, 256
5	RAM size, kBit	8	8, 16, 32	8, 16, 32
6	$\Delta U$ , В	2.1-3.6 V	1,8-3,6	
7	$f$ , ГГц	2,4	2,4	
8	$Pr_{min}$ , dBm	-99	-100	-101
9	$Pt_{min} - Pt_{max}$ , dBm	+3 - +7	3,5	4
10	$I_{0sleep}$ , мкА	0,4/0,8	0,6	
11	$I_{0Rx}$ , mA	27	12,5	11,8
12	$I_{0Tx}$ , mA	31	14,5	13,8

Таблица 3. Основные характеристики модулей Freescale и Jennic

1	Производитель	Freescale			Jennic	
2	Название модуля	MKW2xDxxx	MC1321x	MC1322x	JN5148	JN5168
3	Тип процессора/ ( $F_{proc}$ , МГц)	ARM Cortex- M4/ (50)	HCS08/ (40)		32-bit RISC CPU/(32)	32-bit RISC CPU/(16)
4	Flash size, kBit	256, 512	16,32,60	128	M25P40 (4Mbit device)	M25P40 (4Mbit device)
5	RAM size, kBit	64	1,2,4	96	128	128
6	$\Delta U$ , В	1,8-3,6	2-3,4	2-3,4	2.0-3.6V	2.0-3.6V
7	$f$ , ГГц	2,360-2,480	2,360- 2,480	2,360-2,480	2,4	2,4
8	$Pr_{min}$ , dBm	-102	-92	-96	-95	-95/-96/-100
9	$Pt_{min} - Pt_{max}$ , dBm	-35 -+8	-27 - +3	+5	-35 - +2,5	+2,5/+9,5/ +22
10	$I_{0sleep}$ , мкА	1	1	0,85	1,25	2,6
11	$I_{0Rx}$ , mA	19	37	22	17,5	17/22/22
12	$I_{0Tx}$ , mA	17	30	29	15	15,3/35/175

Таблица 4. Основные характеристики семейства модулей Ember и Digi International Inc

1	Производитель	Ember		Digi	
2	Название модуля	EM351/EM357	EM358x	XBee-PRO ZB SMT	XBee-PRO ZB
3	Тип процессора/ ( $F_{proc}$ , МГц)	32-bit ARM® Cortex -M3 / (6, 12, 24)		HCS08 (MC9S08QE32CFT) / (50.33)	
4	Flash size, kBit	128, 192	32	32	32
5	RAM size, kBit	12	2	2	2
6	$\Delta U$ , В	2,1-3,6		2,7-3,6	
7	$f$ , ГГц	2,4-2,5		2.4000 - 2.4835	
8	$Pr_{min}$ , dBm	-100/-102		-102	-102
9	$Pt_{min} - Pt_{max}$ , dBm	+3 - +8		18	+10 - +18
10	$I_{0sleep}$ , мкА	0,4 /0,8	1.0 - 1.25	1,5	3,5
11	$I_{0Rx}$ , mA	26	27	45	47
12	$I_{0Tx}$ , mA	31	31	114	205

### III. Выбор обобщённых параметров для сравнения

Для анализа эффективности БСС возьмём семь модулей от разных производителей (табл. 1-4): CC2538, STM32W108C8, ATmega256RFR2, JN5148, MKW2xDxxx, EM358x, XBee-PRO ZB. Входные данные для экспертной оценки заданы семью обобщёнными показателями, которые напрямую или косвенно влияют на снижение энергопотребления [9, 10] и увеличение производительности модулей. Значения и вес показателей приведены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты экспертной оценки модулей для БСС с низким энергопотреблением

№	Показатель	Вес	CC2538	STM32W 108C8	ATmega2 56RFR2	JN5148	MKW 2xDxxx	EM358x	XBee-PRO ZB
1	$I_{cp}$	0,3	1,50	1,40	3,00	2,49	2,25	1,40	0,32
2	$\eta$	0,1	0,53	0,23	0,41	0,42	0,23	0,23	1,00
3	$\Delta U$	0,2	1,78	1,78	1,67	1,78	2,00	1,78	1,00
4	$Q$	0,1	0,87	0,88	0,86	0,81	0,92	0,92	1,00
5	$\Delta P$	0,2	0,00	0,19	0,00	1,74	2,00	0,23	0,37
6	$St$	0,085	0,85	0,68	0,09	0,18	0,38	0,14	0,19
7	$L$	0,015	0,02	0,00	0,01	0,15	0,02	0,00	0,00
Сумма		1	5,54	5,16	6,04	7,58	7,80	4,69	3,88

Более подробно охарактеризуем приведенные в табл. 5 показатели:

#### 1. Средний ток потребления.

Величина потребляемого тока зависит от состояния модулей в БСС. В соответствии с технологией обеспечения множественного доступа элементов сети к её частотному каналу выберем маячковый (Beacon enabled mode) режим работы. Для ZigBee сети маячковый интервал задаётся в диапазоне от 15,36 мс до 251,66 с. Этот интервал делится на активный и неактивный период. Активный период будет всегда

равен 15,36 мс. Передача сообщений от источника к координатору и от координатора к получателю осуществляется только в течение активного периода. В течение неактивного периода энергопотребление будет определяться током  $I_{0sleep}$ . Внутри активного периода примем, что время, затраченное на передачу и приём  $t_{0Rx} = t_{0Tx}$ . Продолжительность неактивного периода зададим равной половине длительности активного периода. Тогда расчёт среднего тока потребления на интервале проводится по формуле:

$$I_{cp} = (I_{0Rx} + I_{0Tx} + I_{0Sleep}) / 3.$$

2. Коэффициент полезного действия в режиме передачи сигнала.

Отношение энергии сигнала, излучаемого передатчиком, к электрической энергии, потребляемой модулем в течение времени  $T$ :

$$\eta = \frac{\int_0^T p_t dt}{\int_0^T p_{el} dt} \cdot 100\%.$$

3. Диапазон изменения напряжения питания модуля  $\Delta U = U_{max} - U_{min}$ .

Максимальный ток  $I_{max}$ , который может потреблять модуль, зависит от номинальной ёмкости элемента питания. Элемент питания должен обеспечить импульс тока  $I_{0Tx}$  в течение  $t_{0Tx}$  при начальном напряжении  $U_{max}$  и конечном напряжении не менее  $U_{min}$ . При фиксированном значении номинальной ёмкости элемента питания модули, которые имеют больший запас  $\Delta U$  обладают преимуществом.

4. Энергетический потенциал приемопередатчика.

Энергетический потенциал приемопередатчика определяется как разность между максимальным значением выходной мощности передатчика и порогом чувствительности приёмника:

$$Q = P_{tmax} - P_{rmin}.$$

5. Диапазон регулирования мощности передатчика.

Разные производители предлагают конструкции модулей либо с фиксированным значением выходной мощности, либо предоставляют возможность изменять выходную мощность дискретно в пределах заданного диапазона  $\Delta P$ :

$$\Delta P = P_{tmax} - P_{tmin}.$$

6. Пиковая производительность микроконтроллера.

Для приближённой теоретической оценки этого показателя ограничимся расчётом пиковой производительности микроконтроллера, которая измеряется в флопсах. Для подсчёта максимального количества флопсов для микроконтроллера нужно учитывать, что современные микроконтроллеры в каждом своём ядре содержат несколько исполнительных блоков каждого типа (в том числе и для операций с плавающей запятой), работающих параллельно, и могут выполнять более одной инструкции за такт. Расчет пиковой производительности микроконтроллера выполняется по формуле:

$$C_m = F_{proc} \times N \times I,$$

где  $C_m$  – производительность в флопсах,

$F_{proc}$  – тактовая частота микроконтроллера в МГц,

$N$  – число процессоров (ядер),

$I$  – количество обрабатываемых инструкций за такт.

#### 7. Максимальный объём флэш-памяти ( $L$ ).

Увеличение объёма флэш-памяти позволяет накапливать данные, поступающие с датчиков, а затем пересылать информацию в сжатом виде. Таким образом, сокращается время работы приёмопередатчика.

### V. Расчёт экспертных оценок

Для выбора модулей с оптимальными обобщёнными показателями можно использовать один из четырех основных методов экспертных оценок и множества их разновидностей:

- 1) метод простой ранжировки (или метод предпочтения);
- 2) метод задания весовых коэффициентов;
- 3) метод парных сравнений;
- 4) метод последовательных сравнений.

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом задания весовых коэффициентов. Сущность этого метода заключается в присвоении всем обобщённым показателям весовых коэффициентов. Распределяем "Вес" между выбранными обобщёнными параметрами таким образом, чтобы в сумме он был равен 1. Наиболее приоритетным параметрам присваивается большее значение. Причем каждый параметр варьируется в диапазоне от 0,015 до 0,3. Сравниваем модули. Объекты сравнения по параметру "Средний ток потребления" сравниваются по 10-тибальной шкале. Максимальное значение 10 баллов присваивается, если данный тип модуля имеет минимальное значение среднего тока потребления в своем классе. Для остальных модулей балл  $X_i$  рассчитывается по формуле:

$$X_i = \frac{I_{cp \min}}{I_{cp i}} \cdot 10.$$

Объекты сравнения по остальным параметрам  $Z_i$  также сравниваются по 10-тибальной шкале. Максимальное значение 10 баллов присваивается, если данный тип модуля имеет максимальное значение параметра в своем классе. Для остальных модулей балл  $Y_i$  рассчитывается по формуле:

$$Y_i = \frac{z_i}{z_{\max}} \cdot 10.$$

Далее необходимо полученные баллы умножить на вес данного параметра. В строке "Сумма" складываем сумму "весов" параметров для каждого модуля.

Таким образом, модуль МКW2xDxxx оказался самым эффективным для БСС с низким энергопотреблением и высокой производительностью.

## Выводы

В зависимости от требований, предъявляемых к беспроводной сенсорной сети, необходимо выбирать для ее построения модули с оптимальным соотношением технических показателей. Применение методов экспертных оценок упрощает решение этой задачи.

В случае применения описанного в статье распределения весовых коэффициентов согласно табл. 5 наиболее эффективным для БСС с низким энергопотреблением и высокой производительностью является модуль МКW2xDxxx.

## Список литературы:

1. Texas Instruments. Products for ZigBee (IEEE 802.15.4 / ZigBee PRO). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ti.com/lscs/ti/wireless\\_connectivity/zigbee/products.page](http://www.ti.com/lscs/ti/wireless_connectivity/zigbee/products.page).
2. Digi International. XBee® ZB SMT. ZigBee® embedded surface mount RF modules for OEMs. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-smt#specs>.
3. ZigBee Alliance [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.zigbee.org/>.
4. Atmel. ATmega256RFR2 Data Sheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.atmel.com/images/atmel-8393-mcu\\_wireless-atmega256rfr2-atmega128rfr2-atmega64rfr2\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-8393-mcu_wireless-atmega256rfr2-atmega128rfr2-atmega64rfr2_datasheet.pdf).
5. ST Microelectronics. STM32W108C8 Data Sheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00024653.pdf>.
6. Freescale Semiconductor. МКW2xDxxx Data Sheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://cache.freescale.com/files/rf\\_if/doc/data\\_sheet/MKW2xDxxx.pdf](http://cache.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MKW2xDxxx.pdf).
7. Jennic. JN5148-001-Муу JenNet Data Sheet, ZigBee PRO and IEEE802.15.4 Module [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.jennic.com/files/product\\_briefs/JN-DS-JN5148MO-1v4.pdf](http://www.jennic.com/files/product_briefs/JN-DS-JN5148MO-1v4.pdf).
8. Silicon Laboratories. EM358x Data Sheet. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/EM358x.pdf>.
9. Шостко И.С., Соседка Ю.Э. Анализ энергопотребления модулей для беспроводных сенсорных сетей стандарта IEEE 802.15.4 // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч. - техн. сб. – 2014. – № 176. – С. 253 – 257.
10. Шостко И.С., Соседка Ю.Э. Анализ потребляемой мощности и продолжительности работы в автономном режиме элементов беспроводных сенсорных сетей // Сборник научных работ ХУВС «Системы обработки информации». – 2014. – Вып. 5 (121). – С. 100-105.