

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и автоматического управления

**МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ИНТЕРНЕТА  
ВЕЩЕЙ И АНАЛИЗ ЕЁ ВЕРОЯТНОСТНО-ВРЕМЕННЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы  
направления 09.04.01 — Информатика и вычислительная техника  
факультета компьютерных наук и информационных технологий  
Горбачёва Алексея Павловича

Научный руководитель

доцент к. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_

Е. С. Рогачко

Заведующий кафедрой

к. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_

И. Е. Тананко

Саратов 2024

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Концепция Интернета вещей (IoT) является логичным продолжением идеи Интернета людей. IoT объединяет вычислительные устройства, сенсоры и исполнительные устройства, взаимодействуя через сетевые протоколы, такие как TCP/IP. Эта технология играет важную роль в будущем развитии инфокоммуникационной отрасли, объединяя объекты окружающей среды за счет существующих сетей связи.

Беспроводные сенсорные сети (БСС) становятся ключевой технологией IoT, обеспечивая надежный и эффективный сбор данных. Однако развитие БСС сталкивается с такими вызовами, как управление ресурсами, маршрутизация данных и управление множеством сенсорных устройств.

Для оценки характеристик качества функционирования (Quality of Service, QoS) беспроводных сенсорных сетей широко используются математические модели, учитывающие различные аспекты функционирования сетей, например, модели теории массового обслуживания и имитационные модели. Ограниченность энергоресурсов сенсорных узлов может приводить к выходу узлов из строя и нарушению маршрутов передачи данных, при этом характеристики качества функционирования сети ухудшаются. Поэтому одной из актуальных задач исследования беспроводных сенсорных сетей является оценка их надежности и энергопотребления и разработка алгоритмов маршрутизации данных, увеличивающих длительность эффективного функционирования отдельных узлов и сети в целом.

**Цель магистерской работы** — построение модели беспроводной сенсорной сети с ненадежными узлами, являющейся базовой технологией построения сетей Интернета вещей.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. изучение принципов функционирования БСС и аспектов моделирования протекающих в них процессов;
2. описание и реализация аналитической и имитационной моделей объектов данного класса с целью дальнейшего анализа характеристик качества функционирования сети;
3. проведение экспериментов с аналитической моделью с целью вычисления вероятностно-временных характеристик сети;
4. применение имитационной модели для вычисления вероятностно-времен-

ных характеристик сети;

5. сбор, обработка и анализ полученных результатов моделирования.

**Методологические основы** моделирования беспроводных сетей Интернета вещей, а именно беспроводных сенсорных сетей, представлены в работах С. А. Аббас [1], М. Юнис [2], Г. К. Мансурова, М. Г. Попова, А. С. Дмитриева [3], И. Е. Тананко, Н. П. Фокиной [4], А. Сейеди [5].

**Теоретическая значимость магистерской работы.** Предложен метод анализа модели кластера беспроводной сенсорной сети, представленной в виде открытой сети массового обслуживания с ненадёжными системами обслуживания и деградируемой структурой сети. Найдено стационарное распределение вероятностей состояний исследуемой сети, получены формулы для расчёта её основных стационарных характеристик.

**Практическая значимость магистерской работы.** В ходе выполнения выпускной квалификационной работы были описаны и реализованы аналитическая и имитационная модели кластерной беспроводной сенсорной сети, узлы которой могут выходить из строя. С помощью предложенных моделей исследователь может получать оценки характеристик качества функционирования сети при заданных параметрах.

**Структура и объем работы.** Магистерская работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка использованных источников и 2 приложений. Общий объем работы — 86 страниц, из них 51 страница — основное содержание, включая 10 рисунков и 2 таблицы, список использованных источников информации — 50 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первый раздел «Базовые принципы построения сетей Интернета вещей»** посвящен описанию основных понятий концепции Интернета вещей.

В подразделе 1.1 приведены определения сети Интернета вещей, описаны основные концептуальные сетевые модели Y.2060 от МСЭ-Т (Международного союза электросвязи) и IoT-A (Internet of Things – Architecture) от Европейского интеграционного проекта, рассмотрены уровни их структуры и реализуемые возможности построения, управления и взаимодействия с другими объектами [6].

Подраздел 1.2 посвящен рассмотрению популярных стандартов и протоколов передачи данных, используемых в сетях Интернета вещей. Также описана классификация технологий передачи данных в сетях Интернета вещей: по типу среды передачи данных на проводные и беспроводные и по назначению на WPAN (Wireless Personal Area Network), WSN (Wireless Sensor Network), TAN (Tiny Area Network) [7]. Представлено описание структуры и условий применимости стандартов передачи данных IEEE Std 802.15.4 и ZigBee.

В подразделе 1.3 описаны особенности оценки основных показателей качества функционирования Quality of Service (QoS) беспроводных сенсорных сетей. Показателями QoS сети являются такие характеристики, как задержка передачи данных, вероятность потери данных и пропускная способность. Обработка данных и осуществление передач являются наиболее энергозатратными процессами функционирования сенсорных узлов и поскольку узлы работают от аккумулятора, постоянная активность узла ограничивает срок его службы. Поэтому одним из ключевых факторов, влияющих на показатели QoS, является энергозависимость сенсорных узлов.

**Второй раздел «Обзор математических моделей для оценки качества функционирования сетей Интернета вещей»** посвящен обзору существующих работ, посвящённых моделированию сетей Интернета вещей и, в частности, беспроводных сенсорных сетей.

В подразделе 2.1 приводится обзор работ, в которых применялся метод имитационного моделирования. Данный метод широко используется при анализе качества функционирования QoS беспроводных сенсорных сетей. Имитационные модели имеют ряд преимуществ: простоту реализации, низкую стоимость, оценку различных параметров, влияющих на всю сеть, в реальном времени.

Подраздел 2.2 посвящен рассмотрению работ, исследование БСС в которых основано на стохастических моделях с использованием цепей Маркова. Процесс изменения уровня энергии в узлах беспроводной сенсорной сети, анализ которого необходим для решения задачи увеличения срока жизни и надёжности сети за счёт оптимизации энергосбережения, зависит от множества факторов, а потому является стохастическим процессом, который может быть описан при помощи цепей Маркова.

В подразделе 2.3 рассматриваются работы, модели в которых основаны на использовании систем массового обслуживания, а в подразделе 2.4 — на использовании сетей массового обслуживания. Модели, представляющие поведение отдельных узлов беспроводной сенсорной сети и изменение их состояния, анализ которых производится с целью оптимизации производительности каждого отдельного узла подробно описываются при помощи систем массового обслуживания. Функционирование же всей беспроводной сенсорной сети в целом с целью анализа таких показателей QoS, как пропускная способность сети и время реакции, может быть описано с помощью сетей массового обслуживания.

**Третий раздел «Анализ качества функционирования беспроводной сети Интернета вещей с помощью ненадёжной сети массового обслуживания»** посвящён изучению основных структурных и функциональных особенностей рассматриваемых беспроводных сенсорных сетей, описанию математической модели беспроводной сенсорной сети в виде открытой экспоненциальной сети массового обслуживания с ненадёжными системами и деградируемой структурой, методу её анализа с использованием цепи Маркова. Также приведены результаты применения модели для анализа беспроводной сенсорной сети медицинского назначения.

В подразделе 3.1 описываются особенности структуры и функционирования беспроводных сенсорных сетей. В частности, рассматривается метод кластеризации сети, применяемый для увеличения области покрытия сенсорами БСС и увеличения устойчивости сети при дополнительной нагрузке. Кластеризация происходит путём разбиения узлов на группы, в каждой из которых присутствует свой маршрутизатор, выполняющий функции головного узла.

Структура рассматриваемой беспроводной сенсорной сети представляет собой множество сенсорных узлов, сгруппированных в кластеры, которые управляются маршрутизаторами. Сенсорные узлы осуществляют сбор информации из окружающей среды. Маршрутизаторы агрегируют данные со всех активных сенсорных узлов своего кластера, а затем, в свою очередь, передают эти данные сетевому координатору, передача данных в каждом кластере является многоинтервальной.

Маршрутизатор изменяет таблицу маршрутизации, в соответствии с ко-

торой осуществляется передача данных внутри кластера, на основе информации об изменении состояния узлов. Маршрутизатор обновляет маршруты передачи данных таким образом, чтобы они не проходили через неработоспособные узлы.

Предполагается, что если выполняется одно из следующих двух условий неработоспособности кластера: во-первых, нарушена связность кластера, во-вторых, время реакции кластера превысило предельно допустимое заданное значение, то все неработоспособные узлы должны быть одновременно оперативно восстановлены, например, заменены.

Подраздел 3.2 посвящён описанию математической модели рассматриваемой БСС. Модель представляет собой открытую сеть массового обслуживания с ненадёжными системами и деградируемой структурой. Она состоит из  $L$  одноприборных систем массового обслуживания  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , которые соответствуют сенсорным узлам беспроводной сенсорной сети. Требования, соответствующие пакетам данных, поступают в сеть из источника  $S_0$ , который представляет одновременно и окружающую среду сбора данных, и маршрутизатор, являющийся конечным пунктом отправки пакетов данных с сенсорных узлов. Предполагается, что входящий в сеть поток требований является пуассоновским с интенсивностью  $\lambda_0$ . Длительность обслуживания требований в системе  $S_i$  является случайной величиной с экспоненциальным распределением с параметром  $\mu_i$ . Переходы требований между системами сети массового обслуживания и источником определяются маршрутной матрицей  $\Theta = (\theta_{ij})$ ,  $i, j = 0, 1, \dots, L$ .

Все системы  $S_i$  имеют длительность наработки на отказ, которая является случайной величиной с экспоненциальным распределением с параметром  $\gamma_i$ . При выходе системы из строя все требования, которые находились в ней, теряются. Затем происходит изменение маршрутной матрицы таким образом, чтобы требования не поступали в неработоспособную систему. Состояние сети задаётся вектором  $b = (b_i)$ ,  $i = 1, \dots, L$ , где  $b_i = 1$ , если система  $S_i$  работоспособна, иначе  $b_i = 0$ ;  $b \in B$ , где  $B$  — множество всех состояния сети.

При выходе очередной системы  $S_i$  из строя, сеть переходит из состояния  $b$  в смежное ему состояние  $\tilde{b}$ , которое отличается от  $b$  только одной компонентой —  $b_i = 1$ , а  $\tilde{b}_i = 0$ . При этом элементы маршрутной матрицы  $\Theta(b)$

заменяются на элементы матрицы  $\Theta(\tilde{b})$  согласно следующим выражениям:

$$\begin{aligned}\theta_{kl}(\tilde{b}) &= \frac{\theta_{kl}(b)}{1 - \theta_{ki}(b)}, & k, l = 0, \dots, L, & \quad k, l \neq i, \\ \theta_{il}(\tilde{b}) &= 0, & l = 0, \dots, L, & \quad l \neq i, \\ \theta_{ki}(\tilde{b}) &= 0, & k = 0, \dots, L, & \quad k \neq i, \\ \theta_{ii}(\tilde{b}) &= 1.\end{aligned}$$

В качестве основной изучаемой стационарной характеристики сети выбрано математическое ожидание (м. о.) длительности реакции сети  $\tau_0$ . Предполагается, что если выполняется неравенство  $\tau_0(b) \geq \tau'_0$ , где  $\tau'_0$  — заданное ограничение, или связность сети в состоянии  $b$  нарушается (тогда  $\tau_0(b) = \infty$ ), то происходит мгновенное восстановление неработоспособных систем, и они переходят в работоспособное состояние.

В подразделе 3.3 описывается метод анализа рассмотренной сети массового обслуживания. Сеть описывается множеством различных реализаций сети, каждая из которых задаётся вектором структуры  $b \in B$  и маршрутной матрицей  $\Theta(b)$  при остальных одинаковых параметрах.  $D \subset B$  — подмножество векторов структур  $b$ , для которых маршрутные матрицы являются неприводимыми.

Эволюция сети представляется в виде двух параллельных процессов: процесса выходов из строя систем обслуживания с мгновенным их восстановлением по событию и вложенного в него процесса функционирования сети с фиксированной структурой. Первый процесс описывается цепью Маркова  $M$  с непрерывным временем и пространством состояний  $D$ . Состояние, соответствующее структуре сети, все системы которой работоспособны, обозначено  $b^{(1)}$ . Интенсивности переходов из  $b^{(i)} \in D$  в  $b^{(j)} \in D$  обозначены  $\alpha(b^{(i)}, b^{(j)})$ , а интенсивности выходов из  $b^{(i)} \in D$  —  $\alpha(b^{(i)})$ . Выражения для их вычисления приведены в работе [4].

Элементы инфинитезимального оператора  $A = (a_{ij})$  цепи Маркова  $M$  вычисляются следующим образом:

$$a_{ij} = \alpha(b^{(i)}, b^{(j)}) \quad \forall b^{(i)}, b^{(j)} \in D : i \neq j,$$

$$a_{ii} = -\alpha(b^{(i)}).$$

Стационарное распределение вероятностей состояний цепи  $\pi = (\pi(b))$ ,  $b \in D$ , вычисляется как решение уравнения  $\pi A = 0$  с условием нормировки  $\sum_{b \in D} \pi(b) = 1$ .

Стационарные характеристики  $\chi_k$  систем массового обслуживания  $S_k$  рассматриваемой сети с деградируемой структурой вычисляются по формуле  $\chi_k = \sum_{b \in D} \chi_k(b) \pi(b)$ ,  $k = 1, \dots, L$ , где  $\chi_k(b)$  — характеристика системы  $S_k$  для реализации сети, заданной вектором структуры  $b$ ;  $\chi_k(b)$  может быть найдена по известным формулам для сети Джексона [4].

Вычисление характеристик модели позволяет получить оценки характеристик качества функционирования кластерной беспроводной сенсорной сети, в частности м. о. длительности реакции сети и её пропускную способность.

Подраздел 3.4 содержит результаты экспериментов с программной реализацией описанной модели. Реализация аналитической модели ненадёжной сети массового обслуживания осуществлена с использованием языка Python и его модулей *numpy*, *scipy*, *networkx*, *matplotlib*, *itertools* и *math*. Программа позволяет вычислять следующие вероятностно-временные характеристики рассматриваемой ненадёжной сети при заданных параметрах: М. О. времени реакции сети  $\tau_0$ , стационарное распределение вероятностей состояний систем  $p_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , м. о. среднего числа требований в системах  $n_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , м. о. среднего числа требований в сети  $\bar{n}$ , коэффициенты использования систем  $\psi_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , м. о. требований в очередях систем  $b_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , м. о. занятых приборов систем  $h_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , м. о. длительности пребывания требований в системах  $u_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , пропускную способность сети  $\Lambda$ .

При изменении интенсивности  $\lambda_0$  входящего в сеть потока, была исследована зависимость двух основных характеристик сети, а именно м. о. длительности реакции сети  $\tau_0$  и м. о. числа требований в сети  $\bar{n}$ . Было проведено сравнение с зависимостью характеристик  $\tau_0$  и  $\bar{n}$  от  $\lambda_0$  для сети массового обслуживания с надёжными системами. При увеличении значения  $\lambda_0$ , значения  $\tau_0$  и  $\bar{n}$  также увеличиваются, в случае надёжной сети данные характеристики имеют меньшую скорость роста, чем в случае ненадёжной сети, до тех пор, пока не нарушается связность сети или не достигается пороговое значение  $\tau_0'$  и сохраняется стационарный режим.



**Четвёртый раздел «Имитационная модель ненадёжной сети массового обслуживания»** посвящён обзору инструментов, предназначенных для построения имитационных моделей, описаны основные алгоритмы имитационной модели рассматриваемой БСС и структура её программной реализации. Также приведены результаты экспериментов с моделью.

В подразделе 4.1 представлен обзор специализированных и универсальных средств имитационного моделирования. К специализированным инструментам относятся сетевые симуляторы NS-2, NS-3, OMNeT++, а также средства среды MatLab. Из рассмотренных средств общего назначения рассматривались язык программирования Python и некоторые его специализированные библиотеки.

В подразделе 4.2 описываются основные принципы построения имитационной модели и представлены алгоритмы программных процессов, моделирующих функционирование элементов рассматриваемой БСС [8]. В начале проведения симуляции управление находится у ведущей программы  $P_0$ . В ходе её выполнения управление может передаваться программным процессам  $P_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , которые соответствуют системам сети.

Подраздел 4.3 содержит описание метода нахождения оценок вероятностно-временных характеристик сети. В ходе имитационного моделирования в ведущей программе производится сбор статистических данных (сохраняются определенные параметры требований) и вычисление оценок характеристик качества функционирования сети. Например, каждый программный процесс  $P_i$  сохраняет суммарное время  $t_k^i$ ,  $i = 1, \dots, L$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , нахождения в системе  $S_i$  ровно  $k$  требований. Это позволяет найти оценки  $\hat{p}_i^k$  стационарных вероятностей состояний систем  $S_i$  сети по следующей формуле:  $\hat{p}_i^k = t_k^i / t_{max}$ , где  $t_{max}$  — общее время моделирования.

Тогда оценка м. о. числа требований в системе  $S_i$  вычисляется по формуле  $\hat{n}_i = \sum_{k=1}^{\infty} k \hat{p}_i^k$ , а оценка м. о. числа требований в сети:  $\hat{n} = \sum_{i=1}^L \hat{n}_i$ .

В момент изменения статуса процесса  $P_i$  на неработоспособный сохраняется количество находившихся в очереди системы  $S_i$  требований. Оценка вероятности потери требований вычисляется как  $\hat{p}_{lost} = Q/M$ , где  $Q$  — это общее число требований, потерянных в результате выхода систем из строя, а  $M$  — общее число требований, обслуженных в сети за время  $t_{max}$ .

Пропускная способность сети тогда может быть вычислена в следую-

щим образом:  $\Lambda = (M - Q)/t_{max}$ .

Для каждого требования, обслуженного в сети за время  $t_{max}$ , сохраняется момент генерации  $t_{birth}$  и момент выхода из сети  $t_{death}$ . Оценка м. о. длительности реакции сети вычисляется по формуле:

$$\hat{\tau}_0 = \frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (t_{death}^l - t_{birth}^l).$$

Подраздел 4.4 посвящён описанию программной реализации имитационной модели и её структуры. Для реализации использовались язык Scala и его пакеты *math*, *utils*, *collection*, пакет языка Java для работы с файловой системой *io*, язык Python и его библиотеки *os*, *numpy* и *matplotlib*. Программа позволяет вычислять оценки следующих вероятностно-временных характеристик рассматриваемой ненадёжной сети при заданных параметрах: среднее время реакции сети  $\hat{\tau}_0$ , стационарное распределение вероятностей состояний систем  $\hat{p}_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , вероятность потери требований  $p_{lost}$ , среднее число требований в системах  $\hat{n}_i$ ,  $i = 1, \dots, L$ , среднее число требований в сети  $\hat{n}$ , пропускная способность сети  $\Lambda$ .

В подразделе 4.5 приведены результаты проведения экспериментов с разработанной имитационной моделью для анализа вероятностно-временных характеристик беспроводной сенсорной сети медицинского назначения, рассмотренной в подразделе 3.4.

Была исследована зависимость оценок двух характеристик сети, м. о. длительности реакции сети  $\hat{\tau}_0$  и м. о. числа требований в сети  $\hat{n}$ , от интенсивности  $\lambda_0$  входящего в сеть потока. Для сравнения приведена зависимость характеристики  $\tau_0$  от  $\lambda_0$  для той же сети, полученная в результате проведения экспериментов с аналитической моделью, описанных в подразделе 3.4. Результаты, полученные с помощью обеих моделей сравнимы, максимальная относительная погрешность найденных оценок значений характеристик составила 3%, что свидетельствует о применимости обеих моделей для анализа вероятностно-временных характеристик рассматриваемой беспроводной сенсорной сети.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложены аналитическая и имитационная модели беспроводной сенсорной сети, узлы которой могут выходить из строя. Также были рассмотрены принципы построения сетей IoT, изучены существующие классы математических моделей, описывающих работу беспроводных сенсорных сетей, проведены эксперименты с предложенными моделями на примере сети медицинского назначения.

Аналитическая модель построена на основе открытой экспоненциальной сети массового обслуживания с ненадёжными системами. Метод анализа характеристик сети основан на классическом методе анализа сетей Джексона и описании процесса выхода систем из строя цепью Маркова. Алгоритмы модели были реализованы на языке Python. Полученная модель позволяет вычислить ряд стационарных характеристик сети, включая такие показатели QoS, как пропускная способность сети и время реакции сети.

В работе были описаны принципы построения имитационных моделей ненадёжных сетей массового обслуживания, а также разработаны алгоритмы программных процессов, являющихся компонентами моделей такого класса систем. Была построена имитационная модель на основе аналитической модели БСС, представленной в виде открытой экспоненциальной сети массового обслуживания с деградируемой структурой, и была реализована при помощи средств языка программирования Scala. Программная реализация модели позволяет получать оценки ряда вероятностно-временных характеристик сети в зависимости от введённых параметров.

**Отдельные части магистерской работы были опубликованы и представлены на конференции:**

- 1 Горбачёв, А. П. Использование библиотеки SimPy языка Python для построения имитационных моделей систем массового обслуживания / А. П. Горбачёв // Информационные технологии в образовании. – 2022. – №5. – С. 104-108.
- 2 Горбачёв, А. П. Применение сети массового обслуживания с деградируемой структурой для моделирования кластера беспроводной сенсорной сети / А. П. Горбачёв, И. Е. Тананко, Е. С. Рогачко // Системы управления, информационные технологии и математическое моделирование : Материалы V Всероссийской научно-практической конференции с меж-

дународным участием, Омск, 25–26 апреля 2023 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2023. – С. 172-177.

- 3 Горбачев, А. П. Особенности имитационного моделирования сетей массового обслуживания с ненадёжными системами / А. П. Горбачев, И. Е. Тананко // Информационные технологии в образовании. – 2023. – № 6. – С. 108-113.

#### **Основные источники информации:**

- 1 Аббас, С. А. Средства моделирования динамических сетей интернета вещей / С. А. Аббас, В. В. Чернокульский, А. М. То, Н. А. Жукова // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2020. - Т. 7. - С. 62-69.
- 2 Younis, M. Energy-aware routing in cluster-based sensor networks / M. Younis, M. Youssef, K. Arisha // Proceedings of the 10th IEEE International symposium on modeling, analysis and simulation of computer and telecommunications systems. – 2002. – P. 129-136.
- 3 Мансуров, Г. К. Экспериментальная сверхширокополосная беспроводная сенсорная сеть медицинского назначения / Г. К. Мансуров, М. Г. Попов, А. С. Дмитриев, А. И. Рыжов, В. А. Лазарев, Н. В. Малютин // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60. – №. 9. – С. 1-11.
- 4 Тананко, И.Е. Метод анализа открытой сети массового обслуживания с деградируемой структурой и мгновенным восстановлением систем / И. Е. Тананко, Н. П. Фокина // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Математика. Механика. Информатика. – 2020. – Т. 20. – №. 2. – С. 266-276.
- 5 Seyedi, A. Modeling and analysis of energy harvesting nodes in wireless sensor networks / A. Seyedi, B. Sikdar // 2008 46th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing. – IEEE, 2008. – P. 67-71.
- 6 Росляков, А. В. Интернет вещей: учебное пособие / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин, А. Ю. Гребешков. - Самара : ФГОБУ ВПО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», 2015. – 136 с.
- 7 Вишневский, В. М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей / В. М. Вишневский. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
- 8 Тананко, И. Е. Основы моделирования систем: Учебное пособие / И. Е. Тананко. – Саратов: ООО Издат. центр «Наука», 2018. – 116 с.