

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 НЕНАДЕЖНОГО УЗЛА СЕНСОРНОЙ СЕТИ  
НЕОДНОРОДНОЙ СЕТЬЮ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 271 группы

направления 09.04.01 Информатика и вычислительная техника

факультета компьютерных наук и информационных технологий

Султанова Вячеслава Витальевича

Научный руководитель

зав. кафедрой к.ф.-м.н., доцент

И.Е. Тананко

Заведующий кафедрой

к.ф.-м.н., доцент

И.Е. Тананко

Саратов 2019

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Сенсорные сети способствуют решению ряда прикладных задач, таких как осуществление контроля за состоянием природы (например, за температурой, влажностью, давлением, скоростью и направлением ветра), применимы в медицине (установление контроля за состоянием здоровья пациента), в сфере жилищно-коммунального хозяйства (наблюдение за показанием счетчиков воды, электричества, тепла), в производственных, торговых и складских системах (слежение за перемещением, количеством и качеством продукции), в транспортных системах (слежение за перемещением и скоплением транспортных средств), в сфере безопасности (например, контроль за перемещением людей и техники, организация помощи в проведении спасательных операций, установление пожарной и охранной сигнализации), в организации оперативной связи, в сфере строительства (мониторинг состояния зданий и сооружений), а так же могут использоваться для предсказания отказа оборудования в аэрокосмических системах.

Приведенные выше сценарии раскрывают огромный потенциал беспроводных сенсорных сетей. Благодаря сбору подробной информации о физическом мире сенсорные сети могут чрезвычайно обогатить наши знания об устройстве мира, открывая возможности для создания совершенно новых вычислительных приложений.

Технология сенсорных сетей привлекает большое внимание высокой надежностью, дешевизной элементов узлов, входящих в состав сети. Применяются недорогие маломощные источники питания. К плюсам использования таких сетей можно отнести расширение типов используемых датчиков в узлах сети.

Таким образом, беспроводные сенсорные сети определили новый класс распределенных коммуникационных систем, требующих анализа их свойств и разработки методов оценки основных характеристик. Целью данной работы

является моделирование процессов, протекающих в беспроводных CeMO для всестороннего описания их основных режимов работы и анализа узких мест [3]. Для этого, в качестве базового объекта изучения, будет рассматриваться сходная по структуре открытая CeMO, состоящая из двух CMO и с тремя классами требований.

Особый интерес представляют такие характеристики сетей как м. о. числа требований, м. о. длительности пребывания требований в узлах сети. Не менее важными являются характеристики надежности устройств сети и их влияние на функционирование системы в целом. Среди таких характеристик следует отметить м. о. числа потерянных пакетов. Отключения узлов сети могут возникать из-за разряда источников питания и переполнения буфера потерянных пакетов.

**Цель магистерской работы** – моделирование ненадежного узла сенсорной сети неоднородной сетью массового обслуживания.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. разработка аналитической модели надежного узла беспроводной сенсорной сети неоднородной сетью массового обслуживания;
2. разработка имитационной модели узла беспроводной сенсорной сети неоднородной сетью массового обслуживания;
3. моделирование ненадежного узла беспроводной сенсорной сети;
4. проведение ряда экспериментов над разработанными моделями и сравнение результатов моделирования.

**Методологические основы** магистерской работы представлены в работах по теории массового обслуживания [1, 2, 3] Б.В. Гнеденко, Л. Клейнрока и В. А. Жожикашвили. В работе Ю.И. Митрофанова [4] получены распределения стационарных вероятностей состояний открытой неоднородной CeMO. В работе В.А. Григорьева, О.И. Лагутенко и Ю.А. Распаева [5] изложены принципы функционирования сенсорных сетей. Аналитические модели сетевых систем и их устройство описаны в книге Г.П. Башарина, Ю.В. Гайдамаки, К.Е. Самуйлова и Н.В. Ярковой [6]. Теоретические основы

моделирования систем изложены в работе И.Е. Тананко и В.И. Долгова [7], а также, принципы имитационного моделирования систем описаны в работе В. Кельтона и А. Лоу [8].

**Научная новизна магистерской работы** заключается в том, что впервые получены и проанализированы стационарные характеристики ненадежного узла беспроводной сенсорной сети благодаря разработанным моделям: аналитической и имитационной.

**Теоретическая и/или практическая значимость магистерской работы.** В магистерской работе разработаны аналитическая и имитационная модель ненадежного узла беспроводной сети массового обслуживания, получены стационарные характеристики узла и произведен их сравнительный анализ.

**Структура и объём работы.** Магистерская работа состоит из определений, обозначений и сокращений, введения, 10 разделов, заключения, списка использованных источников и 1 приложения. Общий объем работы – 62 страницы, из них 51 страница – основное содержание, включая 16 рисунков и 4 таблиц, список использованных источников информации – 21 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первый раздел «Технологии в составе беспроводной сенсорной сети»** посвящен описанию технологии ретранслируемой ближней радиосвязи 802.15.4/ZigBee, самоорганизующихся отказоустойчивых распределенных систем наблюдения и управления процессами и ресурсами. Данная технология легла в основу элементной базы рассматриваемых беспроводных сенсорных сетей и используется как стандарт для набора высокоуровневых протоколов связи в системах, где определяющими являются показатели дешевизны компонентов, простоты внедрения, масштабируемости, надежности, низкого потребления энергии. А также в сетях с низкой скоростью передачи данных.

**Второй раздел «Теоретические основы моделирования систем массового обслуживания»** содержит в себе базовое описание сетей массового

обслуживания и их классификацию. Сеть массового обслуживания – это совокупность взаимосвязанных систем массового обслуживания, обеспечивающих в процессе функционирования сети прием, хранение, обработку и выдачу требований, поступающих в системы обслуживания. Также СеМО делятся на открытые, замкнутые и смешанные. Открытые подразумевают обслуживание требований, поступивших из источника бесконечной ёмкости и возврат обратно в источник [1, 2].

*Подраздел «Условные обозначения»* описывает подробное обозначение структурных элементов в теории сетей массового обслуживания.

$L$  – число СМО в СеМО;

$K$  – число классов требований в СеМО;

$A$  – параметр, определяющий тип СеМО;

$W = (W_i)$  – вектор типов ф. р. длительностей обслуживания в СМО сети,  
 $i = 1, \dots, L$ ;

$\kappa = (\kappa_i)$  – вектор числа приборов в системах обслуживания СеМО,  
 $i = 1, \dots, L$ ;

$\Theta = (\Theta_{ik,jl})$  – маршрутная матрица,  $k, l = 1, \dots, K$ ;

$D = (D_i)$  – вектор дисциплин обслуживания в системах обслуживания СеМО,  $i = 1, \dots, L$ ;

$\mu_{ik}(n_i)$  – интенсивность обслуживания в системе  $C_i$   $k$ -требований при условии, что система  $C_i$  находится в состоянии  $n_i$ ;

$\lambda_0$  – интенсивность внешнего потока требований, поступающих в сеть из источника и из сети в источник;

$\xi$  – число уровней абсолютного приоритета требований в СеМО;

$\pi = (\pi_k)$  – вектор уровней приоритета требований,  $k = 1, \dots, K$ ,  $\pi_k$  – уровень абсолютного приоритета  $k$ -требований;

Таким образом, сеть массового обслуживания  $\Gamma$  определяется следующим набором:

$$\Gamma = \langle L, K, A, W, \Theta, \kappa, \mu, D, \xi, \pi \rangle .$$

**Третий раздел «Сети ВСМР. Теорема ВСМР»** описывает основные типы сетей массового обслуживания в зависимости от характеристик.

В СМО первого типа дисциплина обслуживания FCFS и требования всех классов имеют одну и ту же экспоненциальную функцию распределения длительности обслуживания. Интенсивность обслуживания может зависеть от состояния системы и когда в системе находится  $m$  требований будет обозначаться через  $\mu(m)$ .

В СМО четвертого типа дисциплина обслуживания LCFSPR, имеется один обслуживающий прибор, различные классы требований могут иметь различные функции распределения длительности обслуживания.

Доказана теорема ВСМР [3]. Для сети массового обслуживания, которая является открытой, замкнутой или смешанной, и каждая система обслуживания в которой является первого, второго, третьего или четвертого типа, стационарные вероятности состояний определяются выражением  $P(\zeta = (\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_L)) = \tilde{G} d(\zeta) f_1(\zeta_1) f_2(\zeta_2) \dots f_L(\zeta_L)$ , где  $\tilde{G}$  является нормализующей константой, выбранной так, чтобы сумма стационарных вероятностей состояний равнялась 1.  $d(\zeta)$  является функцией числа требований в сети, а каждая  $f_i$  является функцией, которая зависит от типа системы обслуживания  $C_i$ .

**Четвертый раздел «Схема и устройство работы узла сенсорной сети»** содержит схематичное представление структуры работы узла беспроводной сенсорной сети с описанием соответствия элементов схемы реальным элементам узла сети.

**Пятый раздел «Аналитическая модель узла сенсорной сети»** посвящен реализации аналитической модели узла беспроводной сенсорной сети. Представлено уравнение равновесия, получены стационарные вероятности состояний [4, 5, 6]:

$$P(q) = \left(1 - \frac{\lambda_{01}}{\mu_{11}} - \frac{\lambda_{02}}{\mu_{12}}\right) \left(1 - \frac{\lambda_{02} + \lambda_0}{\mu_2}\right) \left(\frac{\lambda_{01}}{\mu_{11}}\right)^{q_{11}} \left(\frac{\lambda_{02}}{\mu_{12}}\right)^{q_{12}} \left(\frac{\lambda_{02} + \lambda_0}{\mu_2}\right)^{q_2},$$

для всех  $q_{11}, q_{12}, q_{22}, q_{23} = 0, 1, 2, \dots$

Подраздел «Характеристики узла сенсорной сети в аналитической модели» описывает получение стационарных характеристик сети массового обслуживания:

- м. о. числа требований в системах  $S_1$  и  $S_2$

$$\bar{q}_1 = P_1(0, 0) \sum_{n=1}^{\infty} n \sum_{m=0}^n \binom{n}{m} \left(\frac{\lambda_{01}}{\mu_{11}}\right)^m \left(\frac{\lambda_{02}}{\mu_{12}}\right)^{n-m},$$

$$\bar{q}_2 = \sum_{k=1}^{\infty} k P_2(k);$$

- время реакции сети обслуживания

$$\bar{\tau}_0 = (\bar{q}_1 + \bar{q}_2) / \lambda_0;$$

- м. о. длительности пребывания требований в системе  $S_1$

$$\bar{u}_1 = \bar{q}_1 / \lambda_0;$$

- м. о. длительности пребывания требований в системе  $S_2$

$$\bar{u}_2 = \bar{q}_2 / (\lambda_0 + \lambda_{02});$$

- м. о. числа потерянных пакетов

$$Q = \lambda_{01} / \beta.$$

**Шестой раздел «Имитационная модель узла сенсорной сети»** содержит описание разработки имитационной модели [7, 8] беспроводной сенсорной сети. Определены моменты возникновения событий. Характеристики событий в имитационном моделировании:

- условие возникновения;
- тип события, определяющий алгоритм обработки этого события;
- нулевая длительность.

Подраздел «Структура имитационной модели узла сенсорной сети» описывает атрибуты требований, генерируемых в имитационной модели. При разработке данной имитационной модели принято решение различать 7 типов событий:

1. поступление требования первого класса в очередь микропроцессора;
2. поступление требования второго класса в очередь приемопередатчика;
3. поступление требования второго класса в очередь микропроцессора;
4. поступление требования третьего класса в очередь микропроцессора;
5. завершение обслуживания третьего класса;
6. завершение обслуживания требований второго класса в микропроцессоре;
7. завершение обслуживания в приемопередатчике.

Подраздел «Характеристики узла сенсорной сети в имитационной модели» описывает получение стационарных характеристик сети.

Оценка вероятности того, что в системе обслуживания находится ровно  $k$  требований, равна:

$$\tilde{p}_k = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{R_k} \tau_i^{(k)},$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$

Оценка величины  $\bar{n}$  вычисляется по формуле:

$$\tilde{n} = \sum_{k=1}^{\infty} k \tilde{p}_k.$$

Оценка математического ожидания длительности пребывания требований в системе обслуживания:

$$\tilde{u} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (t_{i\text{зав}} - t_{i\text{ном}}),$$

где  $K$  – число обслуженных требований на момент завершения выполнения имитационной модели;

$t_{i\text{зав}}$  – момент завершения обслуживания  $i$  – го по счету требования прибором;



$t_{inocm}$  – момент постановки требования в очередь  $Q$ ,  $i = 1, 2, \dots, K$ .

**Седьмой раздел «Обоснование данных для имитационной модели»** содержит рассуждения, которые используются при формировании входных значений, используемых при моделировании узла сети через описание реальных элементов и свойств системы.  $\lambda_{01} = 0.01$ ,  $\lambda_{02} = 10$ ,  $\mu_{11} = 200000$ ,  $\mu_{12} = 400000$ ,  $\mu_{22} = \mu_{23} = 25000$ ,  $T_{mod} = 100000\lambda_0$ , где  $\lambda_0 = \lambda_{01} + \lambda_{02}$ .

**Восьмой раздел «Модели узла сенсорной сети»** описывает процесс разработки имитационной модели узла и средств реализации. Содержится описание управляющей программы и её функций. Представлена UML диаграмма моделирующей программы.

**Девятый раздел «Результаты моделирования»** демонстрирует результаты аналитического и имитационного моделирования на основе данных, сформулированных в седьмом разделе работы. А также проведено сравнение значений моделей. В результате, сделан вывод, что при достаточно низких интенсивностях поступления требований от датчиков узлов сети, разница между выходными результатами моделей будет незначительна и нет необходимости прибегать к имитационному моделированию.

Произведен ряд испытаний над моделями с входными значениями относительно единице времени равной одной секунде  $\lambda_{01} = 0.01, 0.05, \dots, 10$ , следовательно,  $\lambda_{02} = 20000$ ,  $\lambda_0 = 20010$ . В дальнейшем, при моделировании принято, что единица времени равна одной микросекунде, то есть 0.000001 секунды, с учетом этих утверждений, входящие интенсивности также изменятся. На приведенных графиках видна разница в результатах моделирования. Сделан вывод, что для более точного и надежного анализа процессов функционирования беспроводных сенсорных сетей на предельных нагрузках, требуется прибегать к имитационному моделированию, так как длительности обслуживания в данном случае, постоянны, в отличие от длительностей, которые при аналитическом моделировании являются экспоненциально распределенными.

**Десятый раздел «Моделирование ненадежной беспроводной сенсорной сети»** посвящен реализации модели ненадежного узла. Представлено моделирование отказов, скорректированы выражения стационарных характеристик узлов сети. В виде таблиц и графиков представлены сравнительные результаты моделирования с целью анализа и сопоставления с результатами работы узла в надежной беспроводной сенсорной сети.

Вывод: с увеличением нагрузки на узел сети, близкой к максимальным значениям, число потерянных пакетов стремительно растет за счет снижения интенсивности.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе были решены следующие задачи:

- изучены основные свойства открытой СеМО с двумя СМО первого типа и тремя классами требований, которая является прототипом беспроводной сенсорной сети, рассмотренной в данной работе;
- построена аналитическая модель узла СеМО;
- изучены основные принципы имитационного моделирования систем массового обслуживания;
- разработана имитационная модель узла сенсорной сети с двумя системами массового обслуживания;
- получены и обработаны статистические данные разработанных моделей - основные характеристики узла, такие как м. о. числа требований в каждой СМО, м. о. длительности пребывания требований;
- изучен аспект ненадежности данного класса СеМО и его влияние на полученные характеристики систем.
- приведены сводные данные по искомым характеристикам и по ним построены графики.

Все вышеперечисленные результаты позволяют понять и изучить важнейшие процессы, протекающие в беспроводных CeMO, а также спрогнозировать поведение сети при различных режимах её работы. Возможность оценки числа потерь данных дает понимание точности и достоверности вычислений, которые проходят в процессе сбора данных датчиками узлов.

Собранная статистика дает понимание, того что данный класс сетей надежен и может быть использован для оптимизации множества технологических процессов и сложных инженерных систем.

Данная работа дает основу для изучения нового класса сетей, которые в настоящее время непрерывно развиваются.

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

1 Тананко, И. Е., Султанов, В. В. Моделирование узла сенсорной сети неоднородной сетью массового обслуживания // Компьютерные науки и информационные технологии: материалы Междунар. науч. конф., Саратов, 2–3 июля 2018 г. / отв. ред. В. А. Твердохлебов. – Саратов: Издат. центр "Наука", 2018, с. 385-388.

2 Тананко, И. Е., Султанов, В. В. Исследование характеристик имитационной модели ненадежного узла сенсорной сети // Компьютерные науки и информационные технологии: материалы Междунар. науч. конф., Саратов, 2–3 июля 2018 г. / отв. ред. В. А. Твердохлебов. – Саратов: Издат. центр "Наука", 2018, с. 388-390.

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

1 Гнеденко, Б. В., Введение в теорию массового обслуживания [Текст] / Б. В. Гнеденко, И. Н. Коваленко. – М.: Наука, ГРФМЛ, 1987. – 336 с.

2 Клейнрок, Л. Теория массового обслуживания [Текст] / Л. Клейнрок; Пер. И. И. Грушко. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

3 Митрофанов, Ю. И. Анализ сетей массового обслуживания [Текст]: учеб. пособие / Ю. И. Митрофанов. С: Научная книга, 2005. – 175 с.

4 Григорьев, В. А. Сети и системы радиодоступа [Текст] / В. А. Григорьев, О. И. Лагутенко, Ю. А. Распаев. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.

5 Башарин Г.П., Гайдамака Ю.В., Самуйлов К.Е., Яркина Н.В. Модели для анализа качества обслуживания в сетях связи следующего поколения: Учеб. пособие. – М.: РУДН, 2008. – 137 с.

6 Жожикашвили, В. А. Сети массового обслуживания. Теория и применение к сетям ЭВМ [Текст] / В. А. Жожикашвили, В. М. Вишневский. – М.: Радио и связь, 1988. – 192 с.

7 Тананко, И. Е., Долгов, В. И. Основы моделирования систем [Текст]: учеб. пособие / И. Е. Тананко, В. И. Долгов. – С: Наука, 2018.

8 Кельтон, В., Лоу, А. Имитационное моделирование. Классика CS 3-е изд. [Текст] / В. Кельтон, А. Лоу. СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. – 847 с.: ил.