

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н. Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра системного анализа и  
автоматического управления

**УПРАВЛЕНИЕ ЗАПРОСАМИ ДАННЫХ В БЕСПРОВОДНОЙ  
СЕНСОРНОЙ СЕТИ**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 481 группы  
направления 27.03.03 — Системный анализ и управление  
факультета КНиИТ  
Коркина Артема Дмитриевича

Научный руководитель  
доцент, к. ф.-м. н.

\_\_\_\_\_

Е. С. Рогачко

Заведующий кафедрой  
к. ф.-м. н., доцент

\_\_\_\_\_

И. Е. Тананко

Саратов 2022

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Беспроводная сенсорная сеть – это сеть множества датчиков, объединенных между собой посредством радиоканала. Последние технологические достижения в области проектирования датчиков позволяют уменьшать их размер, вес, надежность и при этом понижать их стоимость [1]. Такое развитие позволяет расширять область применения беспроводных сенсорных сетей.

На данный момент беспроводные сенсорные сети применяют во множестве различных сфер, среди которых: системы обороны, противопожарные системы, мониторинг промышленного оборудования, сельское хозяйство, управление энергоснабжением.

С ростом доступности датчиков увеличиваются и объемы данных, обрабатываемых в беспроводных сенсорных сетях. По причине этого становится необходимостью поиск способов оптимизации функционирования таких сетей, чтобы эффективность при этом не снижалась, а экономичность оставалась на прежнем уровне или увеличивалась.

**Цель бакалаврской работы** — изучение математической модели беспроводной сенсорной сети с управлением запросами данных, разработка имитационной модели беспроводной сенсорной сети и поиск оптимальной стратегии управления запросами.

Поставленная цель определила **следующие задачи**:

1. Разработка программной реализации имитационной модели беспроводной сенсорной сети с управлением запросами с применением метода Q-обучения для поиска оптимальной стратегии управления запросами;
2. Исследование эффективности функционирования беспроводной сенсорной сети при различных стратегиях управления запросами.

**Методологические основы** исследования беспроводной сенсорной сети с управлением запросами данных, имитационного моделирования и метода Q-обучения представлены в работах R. J. Boucherie [2], M. Mitici, M. Onderwater, G. Maurits [3], Н. Б. Кобелева [4], N. Habib [5].

**Теоретическая значимость бакалаврской работы.** Была разработана имитационная модель беспроводной сенсорной сети и применен метод Q-обучения для нахождения оптимальной стратегии управления запросами. Такой подход отличается от применения марковских процессов принятия решений для решения задач управления в беспроводных сенсорных сетях, описанного в работах [2, 3].

**Практическая значимость бакалаврской работы.** Разработанная имитационная модель беспроводной сенсорной сети с примененным методом Q-обучения может использоваться для изучения функционирования реальных беспроводных сенсорных сетей с управлением запросами при различных параметрах, а также для нахождения оптимальной стратегии управления, что позволяет применить полученный опыт к реальной системе, значительно сэкономив временные и финансовые ресурсы.

**Структура и объем работы.** Бакалаврская работа состоит из введения, 5 разделов, заключения, списка использованных источников, трех приложений. Общий объем работы — 55 страниц, из них 41 страница — основное содержание, включая 13 рисунков и 3 таблицы, список использованных источников информации — 21 наименование.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Первый раздел «Описание функционирования беспроводной сенсорной сети с передачей данных по запросу»** посвящен описанию структуры беспроводной сенсорной сети с управлением запросами данных и формализованной схемы функционирования такой сети, представлению математической модели сети в виде марковского процесса принятия решений.

В подразделе 1.1 рассматриваются структура беспроводной сенсорной сети (далее – БСС), взаимодействие элементов сети между собой, типы поступающих требований и дисциплина их обслуживания в беспроводной сенсорной сети. Описывается стоимость обработки запроса данных и задача поиска оптимальной стратегии управления. Так же приводится формализованная схема функционирования беспроводной сенсорной сети с управлением запросами данных (рисунок 1).

Запросы обрабатываются следующим образом: когда запрос БСС инициирован, контроллер (далее – К) запрашивает значение датчика из сенсорной сети, и, при получении этого запроса, сеть через некоторый промежуток

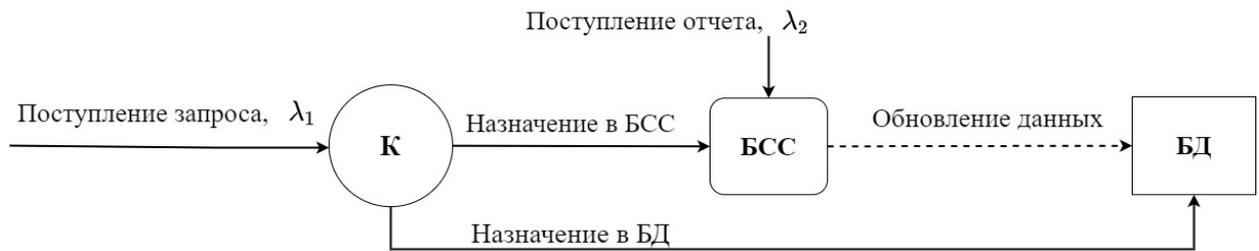


Рисунок 1 – Схема модели

времени возвращает самое последнее значение, таким образом предоставляя самую актуальную информацию о наблюдаемой среде [2]. В данной системе рассматривается дисциплина обслуживания с разделением обслуживающего ресурса, то есть сенсорная сеть может обрабатывать сразу несколько запросов одновременно, из-за чего скорость обработки одного запроса может изменяться, так как обслуживающий ресурс распределяется между всеми обслуживаемыми требованиями.

Запросы поступают с интенсивностью  $\lambda_1$ , а отчеты – с интенсивностью  $\lambda_2$ . Отчеты представляют собой требования, при поступлении которых БСС определяет состояние наблюдаемой среды и передает его в базу данных (далее – БД) в виде отчета, тем самым обновляя хранящиеся там данные. Длительности обслуживания требований в БСС экспоненциально распределены с параметром  $\mu$ , независимо от типа требования (запрос или отчет).

Когда инициируется запрос к БД, то на запрос возвращаются данные, хранящиеся в БД, которые были сохранены (обновлены) в предыдущий раз, когда сенсорная сеть сформировала и передала новый отчет. Таким образом, генерация новых отчетов периодически инициируется в сенсорной сети и после завершения генерации они обновляют БД полученными данными.

Задача управления запросами в беспроводной сенсорной сети заключается в том, чтобы ответы на поступающие запросы осуществлялись своевременно и содержали актуальные данные.

Подраздел 1.2 посвящен математическому описанию функционирования рассматриваемой сети в виде марковского процесса принятия решений.

Функционирование системы описывается марковским процессом принятия решений с непрерывным временем и непрерывным множеством состояний, определяемым набором:  $(S, A, q, C)$ :

— Пространство состояний:  $S = N_0 \times N_0 \times [0, \infty)$ , где  $(i, j, t) \in S$  обо-

значает состояние с  $i$  запросов и  $j$  отчетов в БСС, а так же время  $t$  с момента последнего завершения обслуживания отчета (возраст хранящихся данных).

- Действие: контроллер выполняет действие  $a$  из множества действий  $A = \{D, W\}$ , где  $a = D$  – назначение запроса в БД, а  $a = W$  – назначение в БСС.
- Функция стоимости:

$$C^a(i, j, t) = i + \lambda_1(t - T)^+ 1_{a=D}, \quad (x)^+ = \max\{0, x\}$$

где  $T$  – порог достоверности данных БД.

- Интенсивности переходов: при нахождении в состоянии  $(i, j, t) \in S$ :

$$q^a[(i, j, t), (i, j, t)'] = \begin{cases} \lambda_1, & (i, j, t)' = (i + 1, j, t), a = W \\ \lambda_1, & (i, j, t)' = (i, j, t), a = D \\ \lambda_2, & (i, j, t)' = (i, j + 1, t) \\ \mu\phi_1(i, j), & (i, j, t)' = (i - 1, j, t), i > 0 \\ \mu\phi_2(i, j), & (i, j, t)' = (i, j - 1, 0), j > 0 \end{cases}$$

где  $\phi_1(i, j) = \frac{i}{i+j}$ ,  $\phi_2(i, j) = \frac{j}{i+j}$  – доли запросов или отчетов от всех обслуживаемых требований в БСС [3].

В подразделе 1.3 описывается применение метода униформизации для преобразования марковского процесса принятия решений с непрерывным временем и непрерывным множеством состояний в марковский процесс принятия решений с дискретным временем и дискретным множеством состояний.

Подраздел 1.4 содержит описание итерационного метода (метода итераций по значениям) [2] нахождения оптимальной стратегии управления для марковского процесса принятия решений с дискретным временем и дискретным множеством состояний.

**Второй раздел «Описание имитационной модели беспроводной сенсорной сети с управлением запросами»** посвящен описанию разработанной имитационной модели беспроводной сенсорной сети с управлением запросами: ее компонентам, использованному механизму продвижения модельного времени, алгоритму ведущей программы.

В подразделе 2.1 описываются компоненты имитационной модели. Рассматриваются необходимые атрибуты требований, способ их хранения, методы подсчета статистических характеристик. Представлено описание получения экспоненциально распределенной случайной величины для генерации длительностей промежутков между последовательным поступлением требований и планируемых длительностей обслуживания. Также в подразделе подробно описана реализация дисциплины обслуживания с разделением обслуживающего ресурса и приведен схематический пример ее реализации (рисунок 2).

Рассмотрим атрибуты требований. В рассматриваемую систему поступают пуассоновский поток требований первого типа (запросы) с интенсивностью  $\lambda_1$  и пуассоновский поток требований второго типа (отчеты) с интенсивностью  $\lambda_2$ . В нашем случае используются следующие атрибуты требования:

- $t_n$  – момент поступления требования  $n$  в систему;
- $t_{end_n}$  – момент завершения обслуживания требования прибором;
- $I_n$  – тип требования (запрос или отчет).
- $u_n$  – остаточная длительность обслуживания.

Разность моментов  $t_n$  и  $t_{end_n}$  определяет длительность пребывания требования в системе обслуживания. Это необходимо для получения в дальнейшем статистически значимой оценки характеристики  $\bar{u}$  математического ожидания фактической длительности обслуживания требования:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_{end_i})$$

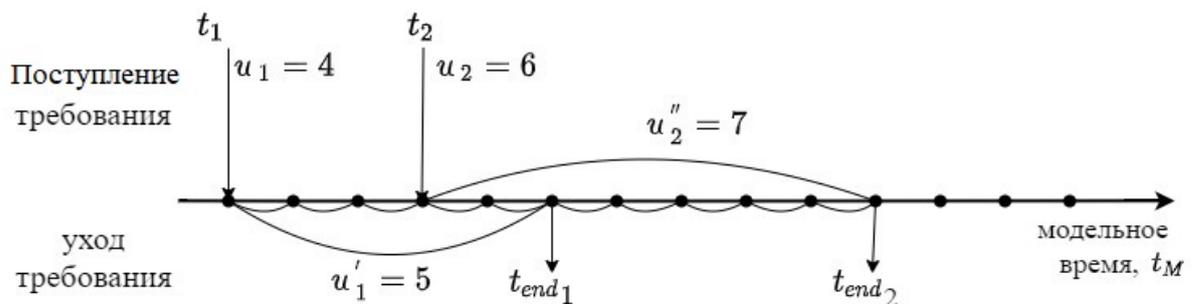


Рисунок 2 – Пример разделения обслуживающего ресурса

Рассмотрим компонент имитационной модели – Обслуживающий при-

бор. В имитационной модели в качестве обслуживающих приборов выступают БСС и БД, поэтому имеется два прибора: БСС обслуживает поступающие в нее требования с интенсивностью  $\mu$ , БД обслуживает требования мгновенно.

При поступлении требования на обслуживание в прибор БСС генерируется планируемая длительность обслуживания, которая является случайной величиной, распределенной экспоненциально с параметром  $\mu$ .

Поскольку обработка требований в БСС осуществляется в соответствии с дисциплиной обслуживания с разделением обслуживающего ресурса, то при разработке программной реализации имитационной модели предпочтительно использовать продвижение модельного времени с постоянным шагом  $\Delta t$ , это позволит для всех обслуживаемых одновременно требований в цикле (по очереди) уменьшать остаточное время обслуживания, пока не завершится назначенное при поступлении время обслуживания. На каждом шаге приращения модельного времени интенсивность обслуживания требований может изменяться в зависимости от нагруженности БСС (состояния системы):

$$\mu_{actual} = \frac{\mu}{i + j},$$

где  $\mu$  – изначально заданная интенсивность обслуживания,  $\mu_{actual}$  – фактическая интенсивность обслуживания в некоторый момент времени.

Так как планируемая (остаточная) длительность обслуживания  $u_n$  хранится в качестве атрибута для каждого поступившего требования  $n$ , то на каждой итерации приращения модельного времени будем уменьшать ее на отношение размера шага приращения к сумме всех требований, ожидающих завершения обслуживания в приборе, пока не выполнится условие  $u_n \leq 0$  – это и будет моментом завершения обслуживания требования в приборе:

$$l_t = \begin{cases} \Delta t, & \text{при } i + j \leq 1 \\ \frac{\Delta t}{i+j}, & \text{при } i + j > 1 \end{cases},$$

где  $l_t$  – величина уменьшения атрибута остаточной длительности обслуживания требования в момент модельного времени  $t_M$ .

Подраздел 2.2 посвящен описанию механизма продвижения модельного времени. Рассматриваются виды таких механизмов, их различия, достоинства и недостатки. В разработанной имитационной модели использован меха-

низм продвижения времени с постоянным шагом (принцип  $\Delta t$ ). При каждой коррекции значения таймера времени время увеличивается на одно и то же значение  $\Delta t$ , выбираемое перед началом моделирования [4].

Подраздел 2.3 содержит описание алгоритма ведущей программы имитационной модели, который состоит из блока 1 «инициализация входных параметров» и блока 2 «цикл продвижения модельного времени», связывающего компоненты имитационной модели. В блоке 2 при каждом приращении значения таймера модельного времени производится проверка на поступление нового требования; создание объекта поступившего требования и назначение на обслуживание в один из приборов; вычисление величины уменьшения остаточной длительности обслуживания; уменьшение остаточной длительности обслуживания требований, находящихся в БСС. Подраздел содержит схему цикла продвижения модельного времени.

**Третий раздел «Метод Q-обучения для нахождения оптимальной стратегии управления запросами в беспроводной сенсорной сети»** посвящен описанию метода Q-обучения. В данном разделе описывается содержание этого метода и его алгоритм.

Использование метода Q-обучения для нахождения оптимальной стратегии управления подразумевает то, что каждый раз при фиксировании стоимости назначения запроса вычисляется новое значение полезности Q для пары действия и состояния, в котором оно предпринято  $(S_t, A_t)$  [5]. Все значения  $Q(S_t, A_t)$  хранятся в матрице значений полезности Q.

$$Q(S_t, A_t)^{new} = Q(S_t, A_t) + \alpha[R_t + \gamma \cdot \max_a Q(S_{t+1}, A_t) - Q(S_t, A_t)],$$

где:

$\gamma$  – коэффициент дисконтирования;

$\alpha$  – скорость обучения;

$Q(S_t, A_t)$  – прошлое значение функции полезности для пары  $(S_t, A_t)$ ;

$\max Q(S_{t+1}, A_t)$  – значение функции полезности наилучшего действия в следующем состоянии.

В соответствии с  $\varepsilon$ -жадной стратегией выбора действия, в каждый момент модельного времени, когда в систему поступает запрос, совершается случайное действие с вероятностью  $1 - \varepsilon$  и совершается оптимальное дей-

ствие согласно с текущим значением функции полезности:  $\operatorname{argmax}_a Q(S_t, A_t)$  с вероятностью  $\varepsilon$  [6]. Таким образом либо исследуется среда, либо действие осуществляется исходя из уже имеющегося опыта на данный момент.

**Четвертый раздел «Описание программы имитационной модели»** посвящен описанию программной реализации имитационной модели беспроводной сенсорной сети с управлением запросами данных с примененным алгоритмом Q-обучения для поиска оптимальной стратегии управления.

Подраздел 4.1 посвящен описанию структуры и назначения программы имитационной модели. Подраздел содержит подробное описание переменных, методов и классов программы. Программа имитационной модели с применением метода Q-обучения выполнена на языке программирования *Python* в интегрированной среде разработки Spyder (Anaconda). Назначением программы является поиск оптимальной стратегии управления запросами в имитационной модели беспроводной сенсорной сети с управлением запросами данных.

В подразделе 4.2 представлен пример использования программы. Программа имеет графический интерфейс. В качестве входных данных используются заданные пользователем параметры сети:

$\lambda_1$  – интенсивность поступающего потока запросов;

$\lambda_2$  – интенсивность поступающего потока отчетов;

$\mu$  – интенсивность обслуживания БСС;

$T$  – порог достоверности данных БД;

$T_{total}$  – время моделирования.

После завершения работы программы выводятся следующие результаты: количество поступивших в систему запросов; количество поступивших в систему отчетов; количество запросов, назначенных на обслуживание в БСС; количество запросов, назначенных на обслуживание в БД;  $\bar{u}$  – оценка математического ожидания длительности обслуживания требования;  $\bar{r}$  – оценка математического ожидания стоимости назначения. Также производится вывод форматированной матрицы значений Q в текстовый файл с пометками о соответствующем состоянии сети.

**Пятый раздел «Результаты исследований беспроводной сенсорной сети с управлением запросами»** посвящен исследованиям зависимости оценки  $\bar{r}$  математического ожидания стоимости назначения запроса на обслуживание от величины порога достоверности T при различных стра-

тегиях управления. Целью исследований является сравнение эффективности функционирования сети при фиксированных стратегиях управления и оптимальной.

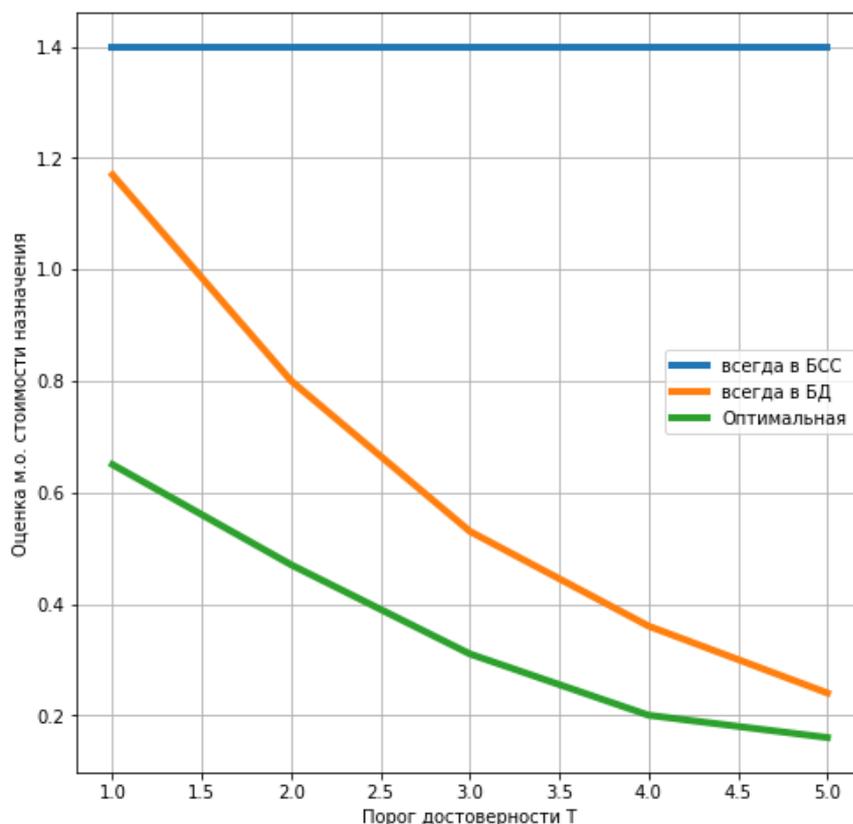


Рисунок 3 – Зависимость  $\bar{r}$  от  $T$  при различных стратегиях управления

В ходе сравнительного анализа полученных результатов экспериментов (рисунок 3) были сделаны следующие выводы:

1) При использовании фиксированной стратегии назначения запроса на обслуживание всегда в БСС характеристика  $\bar{r}$  с увеличением порога достоверности данных  $T$  не изменяется. Такой результат объясняется тем, что в БСС поступали на обслуживание оба потока требований: отчетов и запросов. Так как БСС была более нагружена, чем при любой другой стратегии управления, то оценка математического ожидания стоимости назначения, в сравнении со значениями, полученными при использовании других стратегий управления, имеет наибольшее значение при всех  $T$ .

2) При использовании фиксированной стратегии назначения запроса на обслуживание всегда в БД характеристика  $\bar{r}$  с увеличением порога достоверности  $T$  уменьшается. Можно сделать вывод, что чем выше значение порога достоверности  $T$ , тем более выгодно назначать запрос на обслуживание в БД.

3) При найденной оптимальной стратегии управления запросами значение  $\bar{r}$  значительно меньше при всех  $T$ , чем при фиксированных стратегиях, то есть при следовании оптимальной стратегии система функционировала более эффективно. Так как с увеличением порога достоверности  $T$  назначение запросов на обслуживание в БД становится более выгодным, то очевидно, что при  $T = 5$  запросы назначались в БД чаще, чем при  $T = 1$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе была изучена структура беспроводной сенсорной сети с управлением запросами, был рассмотрен метод Q-обучения для поиска оптимальной стратегии управления запросами такой сети. Была описана математическая модель сети в виде марковского процесса принятия решений. Разработана имитационная модель, для которой был описан и применен алгоритм Q-обучения. Также была разработана программная реализация сформулированной имитационной модели с поиском оптимальной стратегии управления, а также ее модификация с возможностью применения фиксированных стратегий управления. С помощью программ были проведены исследования различных стратегий управления, в которых осуществлены оценки эффективности стратегий и сравнительный анализ при различных параметрах сети.

### **Основные источники информации:**

- 1 Granger, C. Wireless Sensor Networks: Technology and Applications / C. Granger. – Wilmington: Scitus Academics, 2016. – 112 p.
- 2 Boucherie, R. J. Markov Decision Processes in Practice / R.J. Boucherie. – Dordrecht: Springer, 2017. – 545 p.
- 3 Mitici, M., Onderwater, M., Maurits, G. An Optimal Query Assignment for Wireless Sensor Networks / M. Mitici, M. Onderwater, G. Maurits. – Huizen: Department of Applied Mathematics, 2001. – 15 p.
- 4 Кобелев, Н. Б. Имитационное моделирование: Учебное пособие / Н. Б. Кобелев, В. В. Девятков. – М.: Инфра-М, 2016. – 213 с.
- 5 Habib, N. Hands-On Q-Learning with Python / N. Habib. – Birmingham: Packt Publishing, 2019. – 212 p.
- 6 Lewis, F. L. Handbook of Reinforcement Learning and Control / F. L. Lewis. – Dordrecht: Springer, 2021. – 54 p.