

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

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

Кафедра системного анализа и  
автоматического управления

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ  
УЗЛОВ В МНОГОИНТЕРВАЛЬНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 481 группы  
направления 27.03.03 — Системный анализ и управление  
факультета КНиИТ  
Чеботарева Андрея Сергеевича

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.** Объектом изучения в бакалаврской работе являются многоинтервальные беспроводные сети с управлением энергопотреблением. На данный момент беспроводные сети применяются во множестве различных сфер [1-2], для которых энергоэффективность является одним из наиболее важных требований, предъявляемых к беспроводным сетям, так как большинство мобильных узлов питаются от аккумуляторов. Поэтому необходимо планировать передачу пакетов для оптимизации задержки передачи и потребления энергии в беспроводной сети так, чтобы эффективность передачи не снижалась, а энергозатраты оставались на прежнем уровне или уменьшались.

**Цель бакалаврской работы** — изучение математической модели многоинтервальной беспроводной сети в виде замкнутой сети массового обслуживания и разработка алгоритмов программы для анализа функционирования многоинтервальной беспроводной сети с управлением энергопотреблением узлов.

Поставленная цель определила **следующие задачи:**

1. Изучить математическую модель многоинтервальной беспроводной сети в виде замкнутой сети массового обслуживания с управлением интенсивностями обслуживания;
2. Разработать алгоритм метода перебора стратегий управления интенсивностями обслуживания для поиска оптимальной стратегии, минимизирующей среднюю стоимость функционирования сети;
3. Выполнить программную реализацию алгоритма;
4. С помощью разработанной программы провести исследование зависимости средней стоимости функционирования сети от параметров сети.

**Методологические основы** моделирования многоинтервальных беспроводных сетей представлены в работах L. Xia, B. Shihada [3], В. М. Вишневецкого, А. И. Ляхова, С. Л. Портного, И. В. Шахновича [4].

**Практическая значимость бакалаврской работы.** Разработанная программа анализа многоинтервальной беспроводной сети с управлением энергопотреблением узлов может использоваться для нахождения оптимальной стратегии управления интенсивностями передачи узлов сети.

**Структура и объем работы.** Бакалаврская работа состоит из введе-

ния, 4 разделов, заключения, списка использованных источников и приложения. Общий объем работы — 53 страницы, из них 46 страницы — основное содержание, включая 9 рисунков и 5 таблиц, список использованных источников информации — 20 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первый раздел «Многоинтервальные беспроводные сети с управлением энергопотреблением узлов»** посвящен структуре многоинтервальной беспроводной сети с управлением энергопотреблением узлов и формулированию для сети задач анализа и оптимизации.

В подразделе 1.1 описываются беспроводные сети на основе ячеистой топологии. Беспроводная ячеистая сеть образуется на основе множества соединений «точка–точка» узлов, находящихся в области радиопокрытия друг друга. Ключевое свойство самоорганизации ячеистых сетей заключается в том, что, во-первых, соединения между узлами устанавливаются автоматически; во-вторых, любой узел может выполнять функции транзитной передачи пакетов (маршрутизации) для других участников сети.

Сеть на основе ячеистой топологии характеризуется высокой надежностью, большой пропускной способностью и сниженным энергопотреблением. Высокая надежность обеспечивается избыточностью узлов. Использование нескольких альтернативных маршрутов повышает пропускную способность сети. Снижение энергопотребления достигается снижением мощности сигналов посредством передачи данных через большее количество узлов, разделенных меньшими расстояниями.

В подразделе 1.2 рассматривается энергоэффективность используемых беспроводных технологий. Большинство целевых сегментов рынка беспроводной связи характеризуется периодической передачей небольшого количества информации между датчиком и центральным устройством. Среди приложений, в которых требуется реализовать такой сценарий применения беспроводной связи, можно отметить бытовые приборы, устройства автоматизации, дистанционное управление, человеко-машинные интерфейсы, интеллектуальные счетчики, платежные системы и многие другие. Все эти приложения должны отвечать следующим требованиям: сверхмалое энергопотребление, низкая стоимость и компактные размеры. Требование ультранизкого потреб-

ления объясняется главным образом тем, что системы должны работать длительное время от батарей или устройств аккумуляции энергии.

Пиковое энергопотребление является критичным показателем при проектировании низкопотребляющих устройств с длительным сроком эксплуатации. Главная причина в том, что определенные типы батарей не способны мгновенно выдерживать высокий ток. Вопросы энергоэффективности актуальны для тех заказчиков, которые заинтересованы в увеличении срока службы батарей и вместе с тем — в высоком уровне обслуживания пользователей.

В подразделе 1.3 приведено описание частично энергокритической многоинтервальной беспроводной сети.

Энергоэффективность является одним из наиболее важных требований, предъявляемых к беспроводным сетям, так как большинство мобильных узлов питаются от аккумуляторов. С другой стороны, малая длительность задержки данных является еще одним важным требованием для многих приложений. Большая скорость передачи данных может уменьшить задержку передачи при увеличении потребления энергии. Таким образом, фундаментальная проблема заключается в том, как планировать передачу пакетов для оптимизации задержки передачи и потребления энергии в беспроводной сети.

Рассмотрим частично энергокритическую беспроводную сеть. Сеть состоит из  $M$  узлов. Количество энергокритических узлов обозначается как  $M_1$ , а количество неэнергокритических узлов —  $M - M_1$ . Без ограничения общности предполагаем, что первые  $M_1$  узлов являются энергокритическими. То есть узел  $i$  является энергокритическим, а узел  $j$  является неэнергокритическим,  $i = 1, 2, \dots, M_1$ ,  $j = M_1 + 1, \dots, M$ . Предполагается, что пакеты данных, которые должны быть переданы, генерируются независимо в каждом узле. Процесс генерации данных предполагается процессом Пуассона, а интенсивность потока генерируемых пакетов данных в узле  $i$  обозначается  $\lambda_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ . Предполагается, что размер пакета имеет экспоненциальное распределение с математическим ожиданием  $= 1$ . Таким образом, время передачи каждого пакета подчиняется экспоненциальному распределению. Поскольку сеть имеет многоинтервальные маршруты передачи, сгенерированный пакет будет ретранслироваться между узлами в соответствии с протоколом маршрутизации. Когда пакет прибывает в узел  $i$ , этот пакет будет ретранслирован на соседний узел  $j$  с вероятностью маршрути-

зации  $q_{ij}, i, j = 1, 2, \dots, M$ . С другой стороны, пакет может прибыть в конечный пункт назначения, скажем, узел  $i$  и покинет сеть с вероятностью  $q_{i0}$ ,  $i = 1, 2, \dots, M$ . Очевидно, что  $\sum_{j=0}^M q_{ij} = 1$  для всех  $i = 1, 2, \dots, M$ .

Когда узел занят передачей пакетов, вновь полученные пакеты будут помещены в очередь в буфере. Для простоты предполагаем, что общий размер буфера всех узлов имеет верхний порог, обозначаемый  $N$ .

Поскольку размер пакета распределен экспоненциально, время передачи пакета данных также распределено экспоненциально. Интенсивности передачи неэнергокритических узлов фиксированы и обозначим их  $\mu_i, i = M_1 + 1, \dots, M$ . Интенсивности передачи энергокритических узлов варьируются в зависимости от количества пакетов в буфере. Назовём это зависимыми от нагрузки интенсивностями передачи и обозначим их  $\mu_{i,n_i}$ , где  $n_i$  - количество пакетов в узле  $i$  (включая передаваемый пакет),  $i = 1, 2, \dots, M_1$ ,  $n_i = 0, 1, \dots, N$ . Очевидно,  $\mu_{i,0} = 0$ . Энергокритические узлы могут регулировать свои интенсивности передачи в интервале  $[0, \mu_i^{max}]$ ,  $i = 1, 2, \dots, M_1$ .

Известно, что потребление энергии в беспроводном соединении сильно зависит от интенсивности передачи. Для экономии энергии узлы могут использовать более низкую интенсивность передачи. Однако низкие интенсивности передачи уменьшают пропускную способность сети и увеличат сквозную задержку передачи. Схема принятия узлом  $i$  решения об изменении интенсивности передачи на основе информации о длине очереди в узле показана на рисунке 1. Функция стоимости принимаемых решений  $f(n_1, n_2, \dots; \mu_{n_1}, \mu_{n_2}, \dots)$  определяется в следующем разделе.

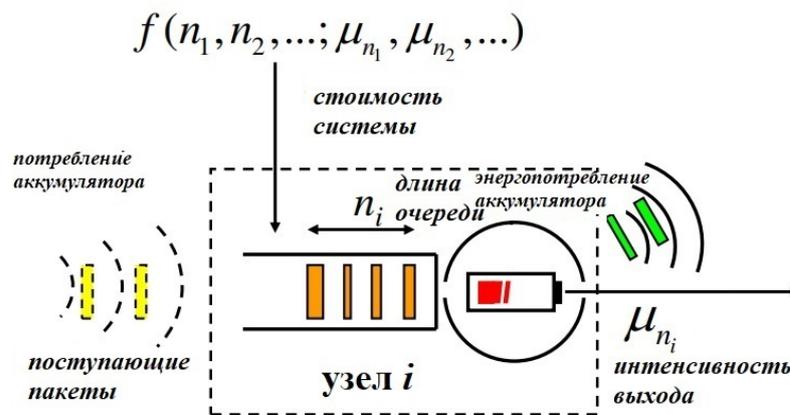


Рисунок 1 – Схема принятия решения узлом

Второй раздел «Анализ модели многоинтервальной беспроводной сети с управлением энергопотреблением узлов» посвящен анализу модели многоинтервальной беспроводной сети с управлением энергопотреблением узлов.

В подразделе 2.1 описывается модель многоинтервальной беспроводной сети в виде замкнутой сети массового обслуживания. Определим виртуальный узел 0 для моделирования генерации внешних данных. Интенсивность обслуживания узла 0 равна  $\mu_0 := \sum_{i=1}^M \lambda_i$ . Вероятности маршрутизации от узла 0 к другим узлам равны  $q_{0i} := \lambda_i/\mu_0, i = 1, 2, \dots, M$ . Длина очереди узла 0 определяется как  $n_0 := N - \sum_{i=1}^M n_i$ . Следовательно, многоинтервальная беспроводная сеть может быть смоделирована замкнутой сетью массового обслуживания (замкнутой сетью Джексона) с  $M + 1$  одноприборными узлами и  $N$  требованиями [5]. Состояние сети обозначается как  $n := (n_0, n_1, \dots, n_M)$ . Пространство состояний обозначается как

$$S = \{n : \sum_{i=0}^M n_i = N\}.$$

Функция стоимости  $f$  является вектор-столбцом, и его элемент  $f^{\mu_n}(n)$  определяется следующим образом:

$$f^{\mu_n}(n) = c \sum_{i=1}^M n_i + b \sum_{i=1}^{M_1} 1_{n_i>0} \mu_{i,n_i}, n \in S,$$

где  $\mu_n$  - вектор интенсивностей обслуживания всех узлов в состоянии  $n$ , т.е.  $\mu_n := (\mu_{1n_1}, \mu_{2n_2}, \dots, \mu_{Mn_M})$ ,  $1_{n_i>0}$  - индикаторная функция, которая определяется как  $1_{n_i>0} = 1$ , когда  $n_i > 0$ , в противном случае  $1_{n_i>0} = 0$ ,  $b$  - коэффициент энергопотребления энергокритических узлов,  $c$  - стоимость пребывания за единицу времени для каждого пакета в сети.

Функционирование сети Джексона описывается марковским процессом с непрерывным временем. Матрица интенсивностей переходов этого марковского процесса обозначается  $B$ . Для любого состояния  $n \in S$  значения элементов вектор-строки  $B(n, :)$  определяются как

$$B(n, n) = - \sum_{i=0}^M 1_{n_i>0} \mu_{i,n_i};$$

$$B(n, n_{-i+j}) = 1_{n_i > 0} \mu_{i, n_i} q_{ij},$$

где  $n_{-i+j}$  - смежное состояние для состояния  $n$  и определяется как  $n_{-i+j} := (n_0, \dots, n_i - 1, \dots, n_j + 1, \dots, n_M)$  для  $n_i > 0, i, j = 0, 1, \dots, M$ ;  $B(n, n') = 0$  для всех остальных состояний  $n'$ . Отметим, что для неэнергокритических узлов и узла 0 их интенсивности обслуживания  $\mu_{i, n_i}$  фиксированы и равны  $\mu_i, i = 0, M_1 + 1, \dots, M$  для всех  $n_i$ .

Стационарное распределение сети обозначается вектор-строкой  $\pi$ , а его элемент  $\pi(n), n \in S$  - это стационарная вероятность состояния  $n$ . Средняя стоимость функционирования сети равна

$$\eta = \pi f.$$

Определим стратегию управления сети как набор интенсивностей передачи  $L := \{\mu_{i, n_i}, \text{ для всех } i = 1, \dots, M_1, n_i = 1, \dots, N\}$ . Множество стратегий определяется как  $\Psi := \{\text{все } L\}$ . Разным стратегиям  $L$  соответствуют разные  $\pi$ , разные  $f$  и разные  $\eta$ . Цель оптимизации - найти оптимальную стратегию  $L^*$ , которая минимизирует среднюю стоимость  $\eta$ .

$$L^* = \arg \min_{L \in \Psi} \{\eta^L\} = \arg \min_{L \in \Psi} \{\pi^L f^L\},$$

где  $\eta^L, \pi^L$  и  $f^L$  - это средняя стоимость, стационарное распределение сети и функция стоимости при стратегии  $L$  соответственно.

**Теорема [3].** *Средняя стоимость функционирования сети  $\eta$  является монотонной по отношению к интенсивности передачи  $\mu_{i, n_i}, i = 1, 2, \dots, M_1, n_i = 1, 2, \dots, N$ .*

**Следствие.** *Оптимальная интенсивность передачи  $\mu_{i, n_i}^*$  равна либо 0, либо  $\mu_i^{max}, i = 1, 2, \dots, M_1, n_i = 1, 2, \dots, N$ .*

В подразделе 2.2 приводится децентрализованный алгоритм решения задачи оптимизации энергопотребления для рассматриваемой сети, основанный на доказанном пороговом свойстве оптимальной стратегии управления интенсивностями передачи [3], и его онлайн - реализация. Для беспроводных сетей децентрализованное управление предпочтительнее централизованного управления, поскольку оно обладает лучшей масштабируемостью и гибкостью. Децентрализованный алгоритм позволяет найти оптимальный порог

для конкретного энергокритического узла, то есть найти такое значение числа пакетов в узле, при превышении которого интенсивность передачи в узле принимает и сохраняет максимальное значение.

В подразделе 2.3 описывается метод свертки для анализа замкнутой сети массового обслуживания, являющейся моделью рассматриваемой многоинтервальной беспроводной сети. Для сетей массового обслуживания большой размерности со сложной топологией и большим количеством требований расчёт стационарного распределения вероятностей состояний сети и других ее стационарных характеристик требует значительных вычислительных ресурсов и временных затрат. Поэтому на практике используют специальные методы расчёта, одним из которых является метод свёртки [5].

**Третий раздел «Описание алгоритма и программы для нахождения оптимальной стратегии управления интенсивностями обслуживания»** посвящен описанию алгоритма и программы метода перебора стратегий управления интенсивностями обслуживания для поиска оптимальной стратегии, минимизирующей среднюю стоимость функционирования сети.

В подразделе 3.1 описывается алгоритм метода поиска оптимальной стратегии управления. В работе [3] сформулирована теорема, которая устанавливает такие свойства оптимальной стратегии, как монотонность функции средней стоимости сети  $\eta$  по отношению к интенсивности обслуживания  $\mu_{i,n_i}$ . Основываясь на следствии из этой теоремы, которое говорит о том, что оптимальная интенсивность обслуживания  $\mu_{i,n_i}^*$  равна либо 0, либо  $\mu_i^{max}$ , предлагается метод поиска оптимальной стратегии управления интенсивностями обслуживания. Метод сводится к последовательному перебору всех возможных стратегий и выбору той, что даёт наименьшее значение  $\eta$ .

В подразделах 3.2 и 3.3 приведено описание разработанной программы, ее идентификаторов и подпрограмм. Программа реализует алгоритм метода перебора стратегий управления интенсивностями обслуживания и предназначена для анализа и оптимизации модели рассматриваемой многоинтервальной беспроводной сети с управлением энергопотреблением узлов. С применением программы осуществляется поиск оптимальной стратегии  $L^*$ , минимизирующей среднюю стоимость функционирования сети  $\eta$ . Код программы написан на языке Python [6] с помощью интегрированной среды разработки

Spyder.

В подразделе 3.4 описывается интерфейс и приводится пример использования программы. Программа имеет оконный интерфейс. При запуске открывается окно, где предлагается ввести следующие параметры сети: количество узлов в сети, количество энергокритических узлов в сети, число пакетов в сети, маршрутные вероятности, интенсивности потоков, генерируемых в узлах, максимальные интенсивности обслуживания данных в узлах, коэффициент энергопотребления энергокритических узлов, стоимость пребывания за единицу времени для каждого пакета в сети. После ввода параметров сети необходимо нажать на кнопку «Найти оптимальную стратегию». В результате на экран выводится значение оптимальной средней стоимости функционирования сети, все оптимальные стратегии управления, а также график "Зависимость средней стоимости функционирования сети от стратегии управления".

**Четвертый раздел «Результаты исследования модели беспроводной сети с оптимальным управлением энергопотреблением узлов»** содержит результаты исследований частично энергокритической многоинтервальной беспроводной сети.

В работе исследовались зависимость средней стоимости от стратегии управления; зависимость средней стоимости функционирования сети от интенсивности обслуживания  $\mu_{2,n_2}$ ; зависимость оптимальной средней стоимости функционирования сети от коэффициента  $b$  энергопотребления энергокритических узлов; зависимость оптимальной средней стоимости функционирования сети от интенсивности потока пакетов, генерируемых во втором узле.

В последнем исследовании было установлено, что при увеличении  $\lambda_2$  значение оптимальной средней стоимости функционирования сети возрастает (рисунок 2). Это объясняется увеличением числа требований в системах в сети в среднем и, как следствие, увеличением интенсивности их обслуживания и затрат на это.

Значения средней стоимости функционирования сети  $\eta$  при различных интенсивностях обслуживания  $\mu_{2,n_2}$  показаны на рисунке 3. Из рисунка видно, что  $\eta$  изменяется монотонно (увеличивается или уменьшается соответственно) относительно  $\mu_{2,n_2}$ .

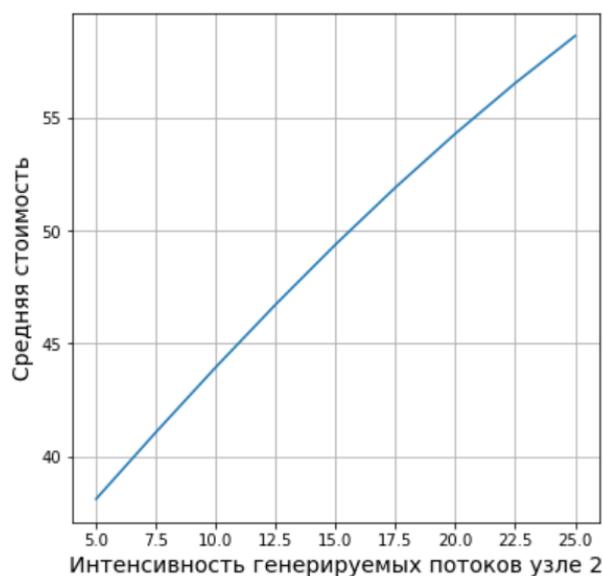


Рисунок 2 – Зависимость оптимальной средней стоимости от интенсивности потока пакетов, генерируемых в узле 2

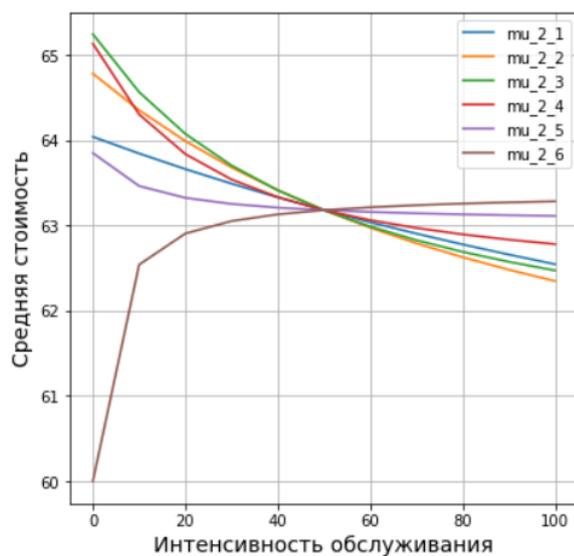


Рисунок 3 – Зависимость средней стоимости от интенсивности обслуживания в узле 2

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бакалаврской работе были изучены многоинтервальные беспроводные сети, их топологии и характеристики. Была описана математическая модель многоинтервальной беспроводной сети с управлением энергопотреблением узлов в виде замкнутой сети массового обслуживания, и для нее был разработан алгоритм метода перебора стратегий управления интенсивностями обслуживания для поиска оптимальной стратегии, минимизирующей среднюю стоимость функционирования сети. В качестве основной вычисляемой характе-

ристики сети была рассмотрена средняя стоимость функционирования сети.

Была написана программа на языке Python в интегрированной среде разработки Spyder, реализующая алгоритм метода поиска оптимальной стратегии управления. Данная программа позволяет задать параметры модели многоинтервальной беспроводной сети и получить оптимальную стратегию управления интенсивностями обслуживания, минимизирующую среднюю стоимость функционирования сети.

С помощью программы были проведены исследования модели многоинтервальной беспроводной сети с оптимальным управлением энергопотреблением узлов. Исследовалась зависимость средней стоимости функционирования сети от параметров сети.

### **Основные источники информации:**

1 Бражук, А. Построение беспроводных локальных сетей на основе ячеистой топологии / А. Бражук. // Беспроводные технологии. - 2006. - Т. 1. - С. 24–25.

2 Романов, С. Беспроводные технологии с низким энергопотреблением / С. Романов. // Время электроники. - 2012. - Т. 1. - С. 33–36.

3 Xia L., Shihada B. A Jackson Network Model and Threshold Policy for Joint Optimization of Energy and Delay in Multi-Hop Wireless Networks / L. Xia, B. Shihada // European Journal of Operational Research. - 2014. - Т. 242. С. 2-20.

4 Вишневский, В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский, А.И. Ляхов, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. — М.: Техносфера, 2005. - 592 с.

5 Митрофанов, Ю.И. Анализ сетей массового обслуживания / Ю.И. Митрофанов. — Саратов: Научная книга, 2005. – 175 с.

6 Златопольский, Д. М. Основы программирования на языке Python / Д.М. Златопольский. — М: ДМК Пресс, 2017. – 284 с.