

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПЕТРА
ВЕЛИКОГО

ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И МЕХАНИКИ
ВЫСШАЯ ШКОЛА ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ И ФИЗИКИ

**Отчет
по лабораторной работе №2
по дисциплине
“Компьютерные сети”**

**Реализация протокола динамической маршрутизации
Open Shortest Path First**

Выполнил:

Студент: Шварц Александр
Группа: 5040102/40201

Принял:

к. ф.-м. н., доцент
Баженов Александр Николаевич

Санкт-Петербург
2026 г.

Содержание

1 Введение	2
2 Теоретические основы	2
2.1 Протокол OSPF	2
2.2 Рассматриваемые топологии	2
3 Реализация	3
4 Результаты экспериментов	3
4.1 Начальная сходимость	3
4.2 Масштабируемость	3
4.3 Таблицы маршрутизации	4
4.4 Примеры маршрутов	5
4.5 Стохастические разрывы связей	5
4.6 Разрыв и восстановление одиночного канала	6
5 Анализ результатов	6
5.1 Сравнение топологий	6
5.2 Устойчивость к разрывам	6
5.3 Корректность пересходимости	6
6 Выводы	7
Приложение: исходный код	7

1 Введение

Протокол OSPF (Open Shortest Path First) — протокол динамической маршрутизации, основанный на алгоритме состояния канала (link-state). Каждый маршрутизатор поддерживает полную карту сети (Link State Database, LSDB) и вычисляет кратчайшие пути с помощью алгоритма Дейкстры (SPF — Shortest Path First).

Цель работы — реализовать систему взаимодействующих маршрутизаторов с протоколом OSPF, исследовать сходимость протокола на различных топологиях (линейная, кольцо, звезда) и проанализировать перестройку таблиц маршрутизации при стохастических разрывах связей.

2 Теоретические основы

2.1 Протокол OSPF

OSPF работает в три этапа:

1. **Генерация LSA.** Каждый маршрутизатор формирует объявление состояния канала (Link State Advertisement, LSA), содержащее список его активных соседей с указанием стоимости каналов.
2. **Рассылка LSA (Flooding).** LSA рассылаются всем маршрутизаторам сети через механизм лавинной рассылки: каждый маршрутизатор пересыпает новые LSA всем своим соседям.
3. **Вычисление SPF.** После формирования полной LSDB каждый маршрутизатор независимо запускает алгоритм Дейкстры для построения дерева кратчайших путей и заполнения таблицы маршрутизации.

2.2 Рассматриваемые топологии

- **Линейная:** маршрутизаторы соединены последовательно ($0-1-2-\dots-(N-1)$). Количество каналов: $N - 1$. Диаметр сети: $N - 1$.
- **Кольцо:** маршрутизаторы образуют цикл ($0-1-\dots-(N-1)-0$). Количество каналов: N . Диаметр сети: $\lfloor N/2 \rfloor$.
- **Звезда:** центральный маршрутизатор (0) соединён со всеми остальными. Количество каналов: $N - 1$. Диаметр сети: 2.

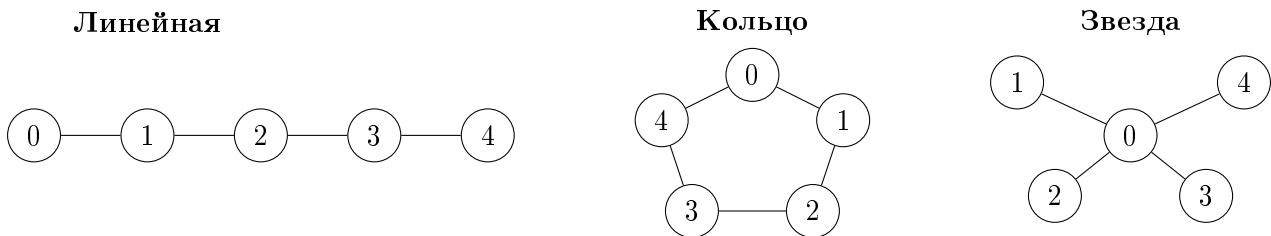


Рис. 1: Рассматриваемые топологии сети (пример для $N = 5$)

3 Реализация

Система реализована на языке C++ и включает следующие компоненты:

- **Router** — маршрутизатор с собственной LSDB, таблицей маршрутизации и реализацией алгоритма Дейкстры;
- **Network** — сеть, управляющая топологией, каналами и процессом сходимости;
- **LSA** — структура объявления состояния канала (идентификатор источника, номер последовательности, список соседей);
- **Link** — канал связи с возможностью деактивации.

Модель симуляции. Сходимость моделируется итеративно: на каждом такте маршрутизаторы обмениваются LSA с непосредственными соседями. Процесс продолжается до тех пор, пока ни одна LSDB не обновляется. После этого каждый маршрутизатор запускает алгоритм Дейкстры. Корректность таблиц маршрутизации верифицируется сравнением с эталонными кратчайшими путями, полученными BFS.

4 Результаты экспериментов

4.1 Начальная сходимость

Таблица 1: Начальная сходимость протокола ($N = 10$)

Топология	Тактов до сходимости	Достигимых пар	Средняя длина пути
Линейная	10	90/90	3.67
Кольцо	6	90/90	2.78
Звезда	3	90/90	1.80

Время сходимости определяется диаметром сети: LSA от самого удалённого маршрутизатора должен достичь всех остальных узлов. В линейной топологии диаметр равен $N - 1 = 9$, поэтому сходимость занимает 10 тактов (9 тактов рассылки + 1 проверочный). В звезде диаметр равен 2, и сходимость наступает за 3 такта.

4.2 Масштабируемость

Таблица 2: Время сходимости и средняя длина пути при различном числе маршрутизаторов

N	Линейная		Кольцо		Звезда	
	Такты	Ср. путь	Такты	Ср. путь	Такты	Ср. путь
5	5	2.00	3	1.50	3	1.60
10	10	3.67	6	2.78	3	1.80
20	20	7.00	11	5.26	3	1.90
50	50	17.00	26	12.76	3	1.96

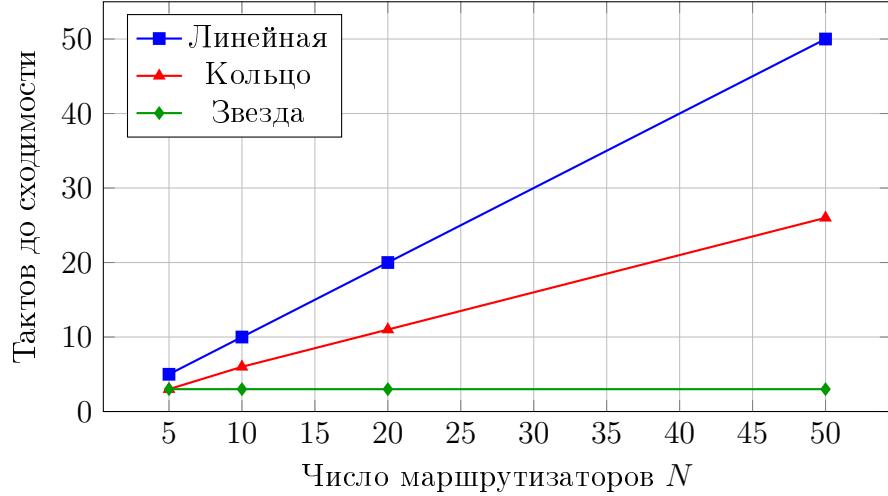


Рис. 2: Время сходимости OSPF в зависимости от числа маршрутизаторов

Время сходимости линейной топологии растёт как $O(N)$, кольца — как $O(N/2)$, а звезды остаётся *постоянным* (3 такта) независимо от N , поскольку любой LSA достигает всех узлов за 2 шага через центральный маршрутизатор.

4.3 Таблицы маршрутизации

Пример таблиц маршрутизации для маршрутизатора 0 ($N = 10$):

Таблица 3: Таблица маршрутизации маршрутизатора 0 для разных топологий

Назначение	Линейная		Кольцо		Звезда	
	Сл. хоп	Цена	Сл. хоп	Цена	Сл. хоп	Цена
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	1	2	2	1
3	1	3	1	3	3	1
4	1	4	1	4	4	1
5	1	5	1	5	5	1
6	1	6	9	4	6	1
7	1	7	9	3	7	1
8	1	8	9	2	8	1
9	1	9	9	1	9	1

В линейной топологии все пакеты от маршрутизатора 0 направляются через следующий хоп 1. В кольце маршрутизатор 0 выбирает кратчайшее направление: через хоп 1 для узлов 1–5, через хоп 9 для узлов 6–9. В звезде все пункты назначения достижимы напрямую через центр (хоп = назначение), с ценой 1.

4.4 Примеры маршрутов

Таблица 4: Маршруты от узла 0 к узлам 5 и 9

Топология	$0 \rightarrow 5$	$0 \rightarrow 9$
Линейная	$0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$	$0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow 9$
Кольцо	$0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$	$0 \rightarrow 9$
Звезда	$0 \rightarrow 5$	$0 \rightarrow 9$

4.5 Стохастические разрывы связей

Каждый активный канал разрывается независимо с вероятностью p , после чего маршрутизаторы перестраивают таблицы. Результаты усреднены по 20 запускам.

Таблица 5: Влияние стохастических разрывов на связность сети ($N = 10$)

p	Линейная (9 каналов)			Кольцо (10 каналов)			Звезда (9 каналов)		
	Разр.	Связн.	Такты	Разр.	Связн.	Такты	Разр.	Связн.	Такты
0.00	0.0	1.00	10.0	0.0	1.00	6.0	0.0	1.00	3.0
0.10	0.9	0.73	8.3	0.9	0.92	8.2	0.9	0.84	3.0
0.20	1.6	0.59	7.2	1.7	0.72	6.9	1.6	0.71	3.0
0.30	2.5	0.43	5.8	2.8	0.52	5.8	2.5	0.58	3.0
0.50	4.3	0.23	3.9	4.8	0.27	4.1	4.3	0.35	3.0

Разр. — среднее число разорванных каналов; **Связн.** — доля достижимых пар; **Такты** — время пересходимости.

Во всех экспериментах таблицы маршрутизации после пересходимости были *корректны* (проверено сравнением с эталонными кратчайшими путями).

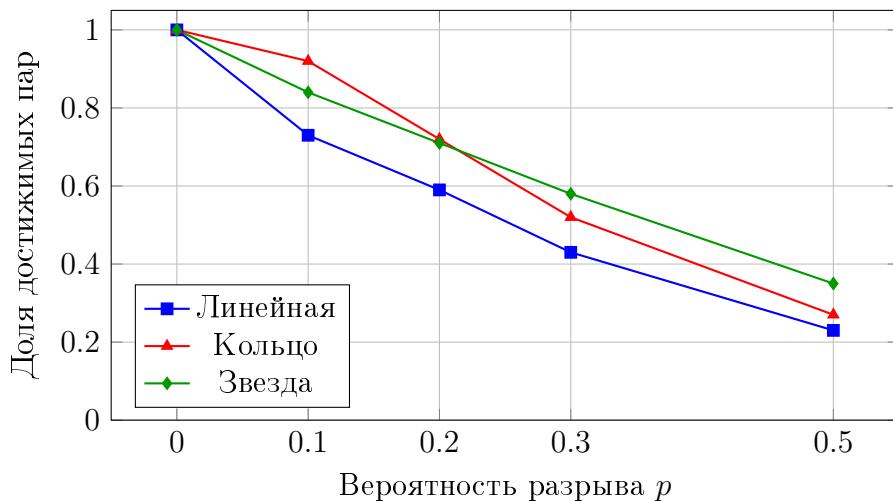


Рис. 3: Доля достижимых пар при стохастических разрывах связей

4.6 Разрыв и восстановление одиночного канала

Таблица 6: Поведение протокола при разрыве и восстановлении одного канала

Топология	Событие	Тактов	Достижимых пар	Таблицы корректны
Линейная	Начальное	10	90	Да
	Разрыв канала 0–1	9	72	Да
	Восстановление	10	90	Да
Кольцо	Начальное	6	90	Да
	Разрыв канала 0–1	10	90	Да
	Восстановление	6	90	Да
Звезда	Начальное	3	90	Да
	Разрыв канала 0–1	3	72	Да
	Восстановление	3	90	Да

Ключевое наблюдение: при разрыве канала в кольцевой топологии сеть *не теряет связность* (все 90 пар остаются достижимыми), так как кольцо обеспечивает альтернативный путь. Однако время пересходимости возрастает с 6 до 10 тактов, поскольку сеть фактически превращается в линейную. В линейной и звёздной топологиях разрыв канала изолирует узел 1 (72 из 90 пар).

5 Анализ результатов

5.1 Сравнение топологий

Звезда обеспечивает минимальное время сходимости ($O(1)$) и кратчайшие маршруты (средняя длина ≈ 2), но имеет единую точку отказа — центральный маршрутизатор. При его выходе из строя сеть полностью распадается.

Кольцо обеспечивает отказоустойчивость при одиночных разрывах: любой единичный разрыв канала не нарушает связность. Время сходимости составляет $O(N/2)$.

Линейная топология наиболее уязвима: любой разрыв канала разделяет сеть на два несвязных сегмента. Время сходимости максимально — $O(N)$.

5.2 Устойчивость к разрывам

При вероятности разрыва $p = 0,10$ кольцо сохраняет 92% достижимых пар (против 73% у линейной топологии), благодаря наличию двух путей между любыми узлами. Звезда занимает промежуточное положение (84%).

При высоких вероятностях разрыва ($p = 0,50$) все топологии значительно теряют связность. Звезда оказывается более устойчивой (35%) по сравнению с линейной (23%) и кольцом (27%), поскольку каждый узел в звезде напрямую связан с центром и независим от остальных каналов.

5.3 Корректность пересходимости

Во всех проведённых экспериментах (все топологии, все вероятности разрывов, 20 запусков на точку) таблицы маршрутизации после пересходимости были корректны. Это под-

твёрдит правильность реализации механизмов лавинной рассылки LSA и алгоритма SPF.

6 Выводы

1. Реализован протокол OSPF с рассылкой LSA, алгоритмом Дейкстры и hop-by-hop маршрутизацией.
2. **Время сходимости** определяется диаметром сети: $O(N)$ для линейной, $O(N/2)$ для кольца, $O(1)$ для звезды.
3. **Кольцо обеспечивает наилучшую отказоустойчивость** при одиночных разрывах: связность сохраняется полностью за счёт альтернативного пути.
4. **Звезда наиболее эффективна** по времени сходимости и длине маршрутов, но уязвима к отказу центрального узла.
5. Протокол корректно перестраивает таблицы маршрутизации при стохастических разрывах любой конфигурации.
6. При высоких вероятностях разрыва ($p \geq 0,30$) связность всех топологий падает ниже 60%, что указывает на необходимость резервных каналов в реальных сетях.

Приложение: исходный код

Исходный код симулятора доступен в репозитории:

<https://github.com/AleksandrShvartz/NetworksLabs>