Лекция 3

Магнитные и твердотельные накопители: устройство, интерфейсы и производительность

6B06201 - Радиотехника, электроника и телекоммуникации

А.А. Хохлов • Алматы, 2026

Цель лекции

- Сформировать знания о физических принципах хранения цифровой информации на магнитных и твердотельных накопителях, особенностях их конструкции и эксплуатационных характеристиках.
- Изучить устройство жёстких дисков HDD, принципы магнитной записи, организацию дорожек, секторов и логической адресации данных.
- Рассмотреть архитектуру SSD, особенности NAND Flash, типы ячеек памяти, механизмы трансляции адресов, управления износом и исправления ошибок. Изучить интерфейсы SATA, SAS, PCIe и протокол NVMe, а также основные показатели производительности, ресурса и надёжности накопителей.
- Сформировать понимание критериев выбора HDD и SSD для различных корпоративных рабочих нагрузок.

Результаты обучения

По завершении лекции обучающийся сможет:

- Объяснять устройство и принципы функционирования HDD и SSD, характеризовать их основные конструктивные и технологические различия.
- Описывать организацию NAND Flash, назначение FTL, Garbage Collection и Wear Leveling, а также показатели ресурса TBW и DWPD.
- Сравнивать накопители и интерфейсы SATA, SAS, PCIe и NVMe по производительности, надёжности и применимости к различным задачам хранения.

Накопители - физическая основа СХД

Долговременное хранение информации и обслуживание операций I/O

HDD - магнитный носитель

Вращающиеся пластины, магнитные головки и механическое позиционирование.

SSD - полупроводниковый носитель

Микросхемы NAND Flash и контроллер; отсутствие механических операций позиционирования.

Ёмкость и стоимость

Задержка и IOPS

Ресурс и нагрузка

Как устроен жёсткий диск HDD?

Магнитная запись на вращающихся пластинах



Механические узлы

Шпиндель с двигателем, дисковые пластины, блок головок и механизм позиционирования.

Контроллер HDD

Преобразует логические запросы хоста в физические операции чтения и записи.

Дорожки, секторы и LBA

Физическая организация скрыта от операционной системы

Дорожка

Концентрическая область на поверхности магнитной пластины.

Сектор

Адресуемый участок хранения в пределах дорожки.

LBA

Логический номер блока, с которым работает хост.

Запрос хоста (LBA) → **Контроллер HDD** → **Физический сектор**

Почему HDD медленнее при случайном I/O?

Задержка складывается из механических и электронных составляющих

Поиск дорожки

Перемещение блока головок

Ожидание сектора

Вращение магнитной пластины

Передача данных

Чтение или запись требуемого блока

Показатели: IOPS • пропускная способность (МБ/с) • время отклика

Интерфейсы магнитных накопителей

SATA

Массовые системы хранения; приоритет ёмкости и экономичности. Характеристики зависят от класса диска.

SAS

Корпоративные решения: очереди запросов, масштабирование подключений и возможные резервные пути.

Отличать интерфейс накопителя от сети SAN между сервером и СХД.

Устройство твердотельного накопителя SSD

Нет вращающихся пластин и движущихся головок



Работа контроллера

Отображение адресов, распределение запросов по каналам NAND, управление ресурсом и ошибками.

Дополнительные элементы

DRAM-буфер может хранить метаданные; конфигурация зависит от модели.

Иерархия NAND Flash

Чтение и программирование страниц, стирание целых блоков



Особенность записи

Нельзя произвольно изменять ранее записанную страницу: новая версия создаётся в другой области.

Параллельные каналы

Контроллер распределяет запросы между кристаллами и каналами NAND.

SLC, MLC, TLC и QLC

Различие - количество бит информации в одной ячейке

SLC	MLC	TLC	QLC
1 бит	2 бита	3 бита	4 бита

Рост плотности увеличивает потенциальную ёмкость, но усложняет запись и контроль ошибок.

Реальные характеристики определяются также контроллером, резервной областью и прошивкой.

FTL и управление ресурсом SSD

FTL

Транслирует LBA в адреса физических страниц NAND.

Garbage Collection

Переносит действительные страницы и освобождает блоки.

Wear Leveling

Распределяет износ между физическими блоками.

TRIM и ECC

TRIM сообщает о ненужных блоках; ECC выявляет и исправляет ошибки.

Ресурс и диагностика SSD

TBW

Оценка допустимого суммарного объёма записи в течение заявленного ресурса.

DWPD

Количество полных перезаписей ёмкости накопителя в сутки за расчётный срок.

SMART: температура • износ памяти • ошибки интерфейса • резервные блоки

HDD и SSD в рабочих нагрузках

HDD: экономичная ёмкость

Архивы, резервные копии и большие наборы данных с преобладанием последовательного доступа.

SSD: малые задержки

Базы данных, виртуальные машины и интенсивные случайные операции чтения/записи.

Многоуровневое хранение: «горячие» данные - SSD, редко используемые - HDD.

SATA, SAS, PCIe и NVMe

Интерфейс и протокол - не одно и то же

SATA / SAS

Поддерживают HDD и SSD; важна совместимость с контроллерами и дисковыми полками.

PCIe + NVMe

PCIe - высокоскоростная шина; NVMe - протокол доступа к энергонезависимой памяти.

NVMe over Fabrics переносит команды NVMe через сетевую фабрику.

Итоги и контрольные вопросы

- HDD ограничены механикой, SSD - устройством NAND и ресурсом записи.
- IOPS, задержку и пропускную способность оценивают вместе.
- Выбор интерфейса согласуют с контроллером и рабочей нагрузкой.
- Надёжность накопителя не заменяет резервные копии и восстановление.

Вопрос: почему SSD с высоким паспортным IOPS может замедляться при записи?