

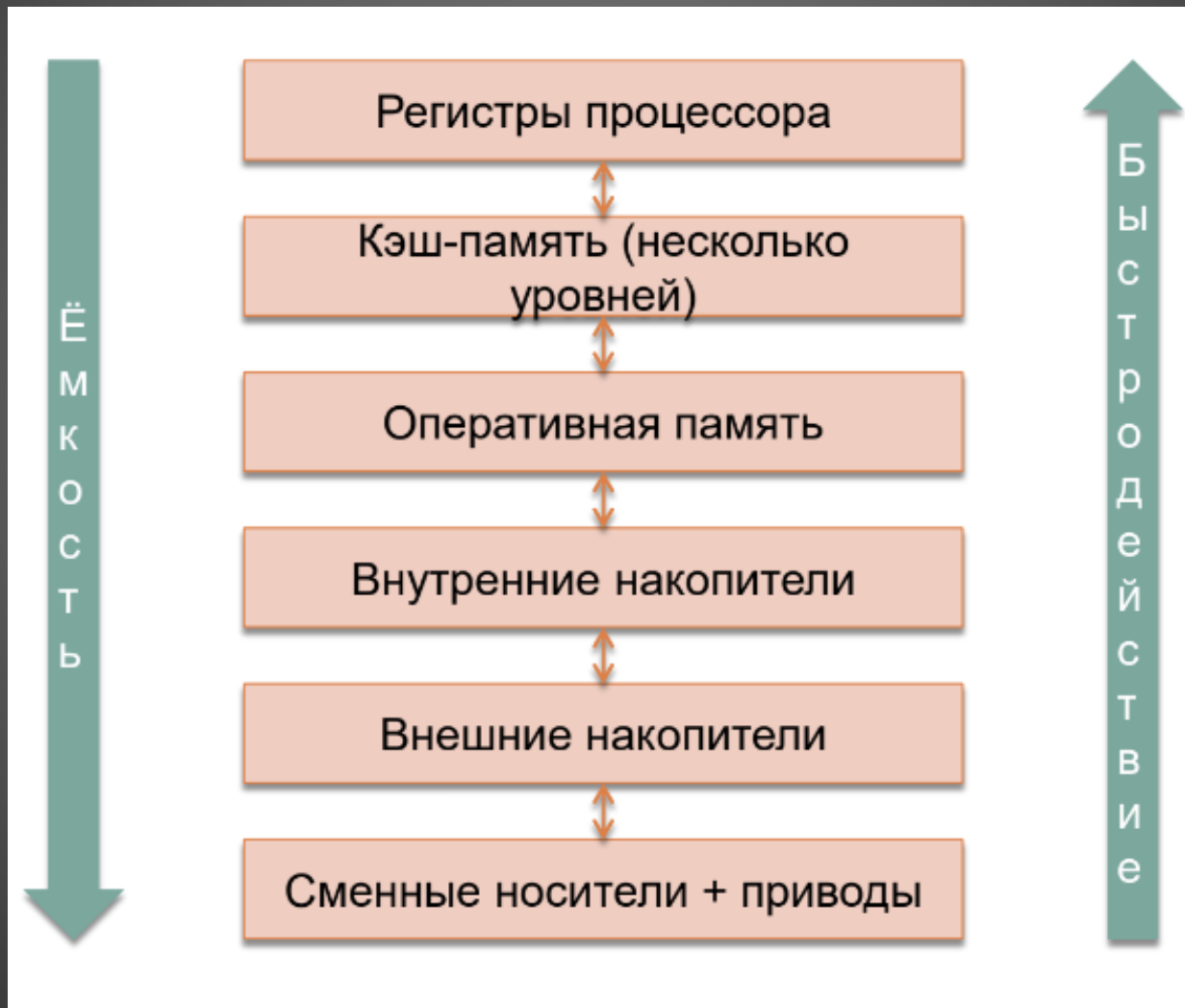
Раздел 2. Лекция 1.

Магнитные и твердотельные
накопители. Часть 1

Основные вопросы лекции

1. Архитектура подсистемы памяти ПЭВМ.
2. Классификация устройств хранения данных, их основные характеристики и интерфейсы.
3. Обзор магнитных накопителей. Конструкция и принцип действия жесткого диска. Физическая организация информации на магнитных пластинах. Перспективы развития. Классификация и особенности применения жестких дисков.

1. Иерархия устройств памяти



1. Технологии накопления и хранения данных



2. Классификация

По исполнению:

- внутренние (внутри корпуса системы, без отдельного питания);
- внешние (в отдельном корпусе).

По конструкции:

- со сменными носителями;
- со встроенными движущимися носителями (обычно дисками);
- твердотельные накопители (без движущихся деталей).

По принципу адресации и доступа:

- блочные с произвольным доступом;
- блочные с последовательным доступом (чаще всего ленточные);
- потоковые (практически то же, что и последовательного типа).

По типу использованного физического явления:

- магнитные (магнитная ориентация ячеек);
- оптические (оптические свойства материалов);
- электронные (хранение электронного заряда в ячейках);
- комбинированные (разные принципы для чтения и записи).

2. Устройства внешней памяти

Относятся к периферийной части системы, доступны через контроллеры, подключаются к периферийным шинам.

Предназначены для загрузки данных в оперативную память, которая не может вместить весь требуемый объем целиком.

Единица адресации значительно больше байта. Чаще всего используется понятие «сектора» (по аналогии с сектором диска, поскольку большинство устройств первого поколения имело вращающиеся диски). Типичный объем сектора – 512 байт.

Устройства внешней памяти могут иметь различную конструкцию и варианты исполнения, однако в любом случае они не доступны процессору напрямую, через команды загрузки и сохранения операндов (Load/Store). Системная адресация к ним тоже не применима.

2. Характеристики внешней памяти

- **Емкость** (capacity) - максимальное количество информации, которое может в ней храниться. Измеряется в байтах. Принята десятичная, а не двоичная система обозначений: К, М, Г, Т, Р.
- **Скорость доступа** (access time) - время от поступления запроса до фактического выполнения операции. Для чтения и записи, как правило, различаются.
- **Время позиционирования** (seek time) - для механических устройств — время перемещения считывающего элемента к требуемой ячейке.
- **Удельная стоимость хранения данных** - это стоимость в расчете на емкость.

2. Скорость доступа

Время обращения при чтении: $t_0^{чт} = t_д + t_{чт} + t_{рег}$

Время обращения при записи: $t_0^{зн} = t_д + t_{п} + t_{зн}$

$t_д$ - промежуток времени между началом операции обращения и моментом начала процесса чтения / записи;

$t_{чт}$ - продолжительность физического процесса считывания;

$t_{рег}$ - время регенерации (восстановления), если в процессе чтения информации произошло ее разрушение;

где $t_{п}$ - время подготовки, расходуемое на приведение запоминающих элементов в исходном состоянии, если это необходимо;

$t_{зн}$ - время, необходимое для физического изменения состояния запоминающих элементов при записи информации.

$$\text{Цикл памяти : } t_{ц} = \max \left(t_0^{чт}, t_0^{зн} \right).$$

2. Время ожидания (latency)

С точки зрения производительности память удобно характеризовать двумя параметрами:

- временем ожидания;
- пропускной способностью.

Время ожидания – это время, уходящее на пересылку в память или из памяти одного слова данных.

Если данные считываются и записываются пословно, то латентность полностью характеризует производительность памяти.

Для пакетных операций, в ходе которых пересылаются блоки данных, полное время, уходящее на выполнение операции, зависит от скорости пересылки отдельных слов и размера блока данных. Поэтому при блочной пересылке под временем ожидания подразумевается время пересылки первого слова данных. Обычно это слово пересылается значительно дольше следующих слов блока.

2. Пропускная способность

Скорость обмена данными - количество бит или байт, пересылаемых за одну секунду.

При пакетном способе обмена для оценки пропускной способности необходимо знать, сколько времени уходит на пересылку блока данных.

Различают:

- внутреннюю (internal) скорость, ограниченную физическими процессами;
- внешнюю (external), ограниченную пропускной способностью интерфейса.

Скорость чтения/записи (read/write performance): зависит от характера поступающих запросов. У ряда устройств эти скорости существенно различаются.

Пропускная способность подсистемы памяти, состоящей из одной или более микросхем, **зависит от скорости доступа** к хранящимся в памяти данным и **от количества параллельно доступных бит**.

Однако реальная пропускная способность памяти определяется не только её быстродействием. Она зависит и **от пропускной способности соединений**, то есть в наиболее типичном случае от пропускной способности шины. (Связано это с затратами на кодирование, избыточность (для определения и коррекции ошибок), квитирование, арбитраж, получение доступа к среде передачи, «зазоры», процедуры установление соединения, передачу различной управляющей информации (маркеры, номера пакетов, служебные поля в пакетах и т.д.).

2. Физические основы функционирования

В основе работы запоминающего устройства может лежать любой физический эффект, обеспечивающий приведение системы к двум или более устойчивым состояниям. Физические свойства полупроводников, когда **прохождение тока** через полупроводник или его отсутствие трактуются как наличие логических сигналов 0 или 1.

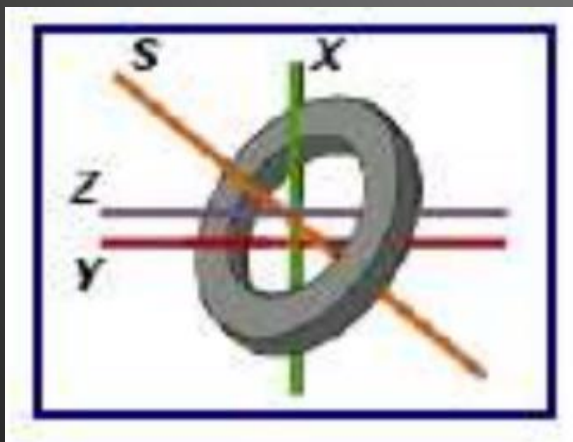
Устойчивые состояния, определяемые **направлением намагниченности**, позволяют использовать для хранения данных разнообразные магнитные материалы:

- **наличие или отсутствие заряда в конденсаторе** также может быть положено в основу системы хранения.
- **отражение или рассеяние света** от поверхности CD, DVD или Blu-ray диска также позволяет хранить информацию.
- **комбинированный** вариант.

2. Устройства на основе магнитного принципа хранения

Устройства на основе магнитного принципа хранения данных исторически появились одними из первых (наряду с перфокартами, использующими комбинированный механически-оптический метод) и применялись в качестве и внутренних накопителей, и устройств со сменными носителями (для персонального пользования), и средств ведения архивов и резервного копирования. Этому способствовали прежде всего низкая себестоимость производства и возможность применения движущихся носителей (дисков или ленты).

X, Y — провода возбуждения,
S — считывания,
Z — запрета.

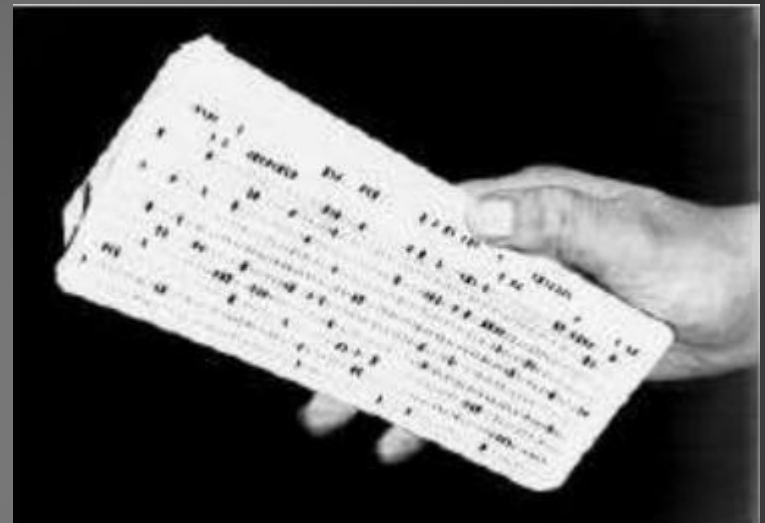


2. Перфокарта, перфолента

Комбинированный механико-оптический метод хранения информации

Особенности:

- 80 символов;
- скорость считывания от 20-50 перфокарт/мин в первых и до 2000 в более новых машинах, таких как ЭВМ ЕС-серии (конец 70-х годов);
- запись информации («пробивка дырок») со скоростью 10-250 перфокарт в минуту;
- информационная емкость зависела от длины рулона и составляла обычно 10-100КБ;
- скорость считывания составляла до 1500 строк в секунду, скорость записи до 200.



2. Устройства на основе оптических дисков

Устройства на основе оптических дисков быстро вытеснили магнитные из сферы устройств копирования и резервного хранения данных ввиду высокой плотности данных и отсутствия механического контакта (луч лазера фокусируется линзой на требуемом расстоянии).

Диск обычно плоский, его основа сделана из поликарбоната, на который нанесен специальный слой, который и служит для хранения информации.

Для считывания информации используется обычно луч лазера, который направляется на специальный слой и отражается от него. При отражении луч модулируется мельчайшими выемками питами (от англ. pit — ямка, углубление) на специальном слое, на основании декодирования этих изменений устройством чтения восстанавливается записанная на диск информация.



2. Устройства электронной памяти

Устройства электронной памяти изначально имеют самую высокую себестоимость, однако выигрывают благодаря твердотельной конструкции, высокой скорости доступа и высокой плотности (последний параметр очень важен для устройств хранения персональной информации).

Плотность упаковки определяется площадью запоминающего элемента и зависит от числа транзисторов в схеме элемента и используемой технологии. Наибольшая плотность упаковки достигнута в кристаллах динамической МОП - памяти.

2. Основные типы устройств внешней памяти

Внутренние устройства:

- Жесткий диск типа «винчестер» (HDD).
- Твердотельный диск (SSD).
- Накопитель на основе модулей DRAM (RAM disc).

Внешние сменные устройства без сменных носителей:

- USB флэш-диск (USB Flash device).
- Внешний жесткий диск (External HDD).
- Твердотельный диск форм-фактора PC Card/ExpressCard.
- Накопитель на основе DRAM форм-фактора PC Card/ExpressCard.

Устройства со сменными носителями, внешние и внутренние:

- Гибкий диск + дисковод (Floppy Disc + FDD).
- Оптический диск + оптический привод (Optical Disc + ODD).
- Карточка памяти + картовод (Flash Card + Card Reader).

Устройства архивной памяти:

- Ленточные накопители (Tape Storage Devices).
- Голографические устройства (Holographic Storage Media).
- Устройства на основе оптических дисков (Optical Disc Storage).

2. Основные интерфейсы устройств внешней памяти

Для внутренних устройств (по возрастанию производительности):

- FDC (для подключения FDD).
- (Parallel) ATA и производные (для HDD, SSD и ODD).
- (Parallel) SCSI (для HDD и ODD).
- Serial ATA (для HDD, SSD и ODD).
- FC-AL (для HDD).
- Serial Attached SCSI (для HDD).
- USB (для разных устройств).
- PCI Express (для SSD, RAM Disc).

Для внешних устройств:

- устаревшие интерфейсы (LPT, COM, SCSI).
- USB (для USB Flash, HDD, ODD).
- IEEE 1394.
- PCMCIA, CompactFlash (фактически ATA, но в другом форм-факторе).
- External SATA (eSATA) (для HDD).

2. Заключение

Классификация внешних устройств памяти:

- по отношению к системе;
- по конструкции;
- по принципу адресации и доступа;
- по типу исполняемого физического явления.

3. Жесткий диск (HDD)

Жесткий диск (HDD, Hard Disk Drive) - это запоминающее устройство, основанное на принципе магнитной записи.

Жесткий диск типа «винчестер» – самое массовое устройство внешней памяти с несменными носителями, имеющее внутреннее исполнение.

В исходном варианте он хранит операционную систему, другое системное ПО, код и данные прикладного ПО. HDD является неотъемлемой частью практически любой ЭВМ в стоечном, напольном, настольном или мобильном исполнении. Если он отсутствует физически, то тогда, как правило, эмулируется, т.к. прочно входит в архитектуру всех систем.

С другой стороны, это самое сложное и капризное устройство, к которому применяются самые высокие требования надежности. Из-за наличия движущихся частей HDD подвержен в наибольшей степени влияниям извне – он чувствителен практически ко всем факторам окружающей среды (как минимум к температуре, влажности, атмосферному давлению, запыленности, вибрациям, ударам, перегрузкам).

3. Принцип магнитной записи

Для хранения данных на жестких дисках использован хорошо известный принцип упорядочивания направления намагничивания частиц ферромагнетиков под действием внешнего магнитного поля.

В качестве среды записи и хранения информации в жестких дисках выступают ферромагнетики, отличительной особенностью которых является наличие микроскопических однородно намагниченных объемов вещества, называемых **доменами**.

Один бит магнитной информации - это один **магнитный домен** ферромагнитного материала, направление вектора намагниченности в котором может быть изменено внешним полем.

Запись одного бита информации осуществляется путём подачи тока в электрическую катушку записывающей головки. Изменяя направление прохождения тока через элемент, можно получить участки на носителе с магнитными доменами, ориентированными в разных направлениях.

Задача элемента чтения — обнаружить изменения направления намагниченности участков диска.

3. Электромагнетизм

- 1831 г. – Майкл Фарадей – закон электромагнитной индукции и введение термина «магнитное поле»
- 1834 г. – Э.Х. Ленц - направление индукционного тока и связанного с ним магнитного поля
- 1873 г. – Дж. К. Максвелл - «Трактат об электричестве и магнетизме»
- 1888 г. – Г.Р. Герц - экспериментальное обнаружение электромагнитных волн

3. Уравнение Максвелла

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = 4\pi\rho$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

МАКСВЕЛЛ Джеймс Клерк

Закон Гаусса - Электрический заряд является источником электрической индукции

Закон индукции Фарадея – изменение магнитной индукции порождает вихревое электрическое поле.

Теорема о циркуляции магнитного поля – электрический ток и изменение электрической индукции порождают вихревое магнитное поле.

\mathbf{E} - напряженность электрического поля; \mathbf{H} - напряженность магнитного поля;

$\mathbf{D} = e\mathbf{E}$ - электрическая индукция; $\mathbf{B} = m\mathbf{H}$ - магнитная индукция;

ρ - плотность свободных зарядов; \mathbf{j} - плотность тока свободных зарядов; c - скорость света.

Здесь ∇ — дифференциальные операторы **рот** (rot) и **див** (div), действующие на векторы \mathbf{H} , \mathbf{E} , \mathbf{B} и \mathbf{D} .

3. Максвелла уравнения

- Максвелла уравнения связывают величины, характеризующие электромагнитное поле, с его источниками, то есть с распределением в пространстве электрических зарядов и токов.

В пустоте электромагнитное поле характеризуется двумя векторными величинами, зависящими от пространственных координат и времени:

- напряжённостью электрического поля E ;
- магнитной индукцией B .

Эти величины определяют силы, действующие со стороны поля на заряды и токи, распределение которых в пространстве задается плотностью заряда ρ (зарядом в единице объема) и плотностью тока j (зарядом, переносимым в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению движения зарядов).

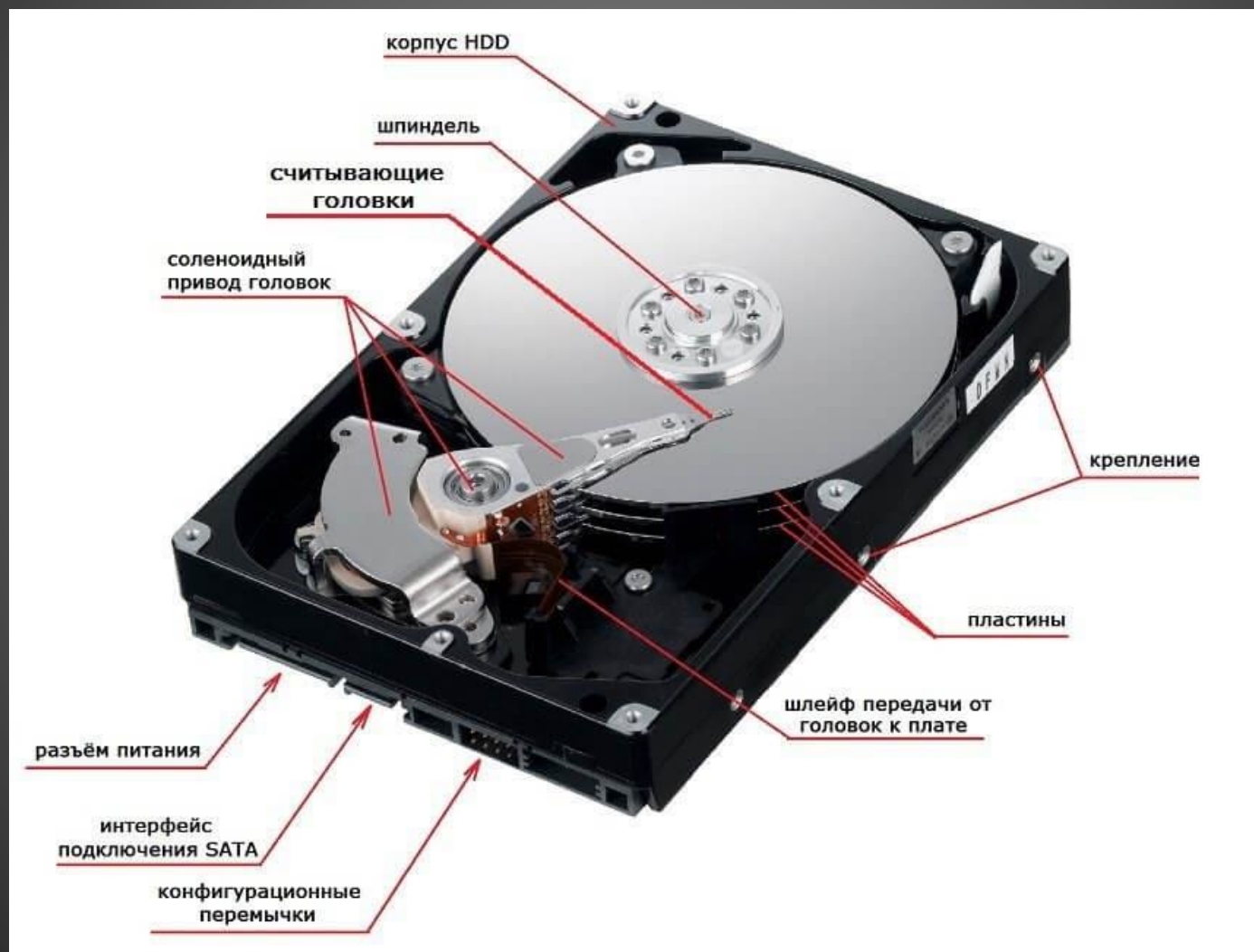
Для описания электромагнитных процессов в материальной среде (в веществе), кроме векторов E и B , вводятся вспомогательные векторные величины, зависящие от состояния и свойств среды: электрическая индукция D и напряженность магнитного поля H .

- Максвелла уравнения позволяют определить основные характеристики поля (E , B , D и H) в каждой точке пространства в любой момент времени, если известны источники поля j и ρ как функции координат и времени. Максвелла уравнения могут быть записаны в интегральной или в дифференциальной форме.

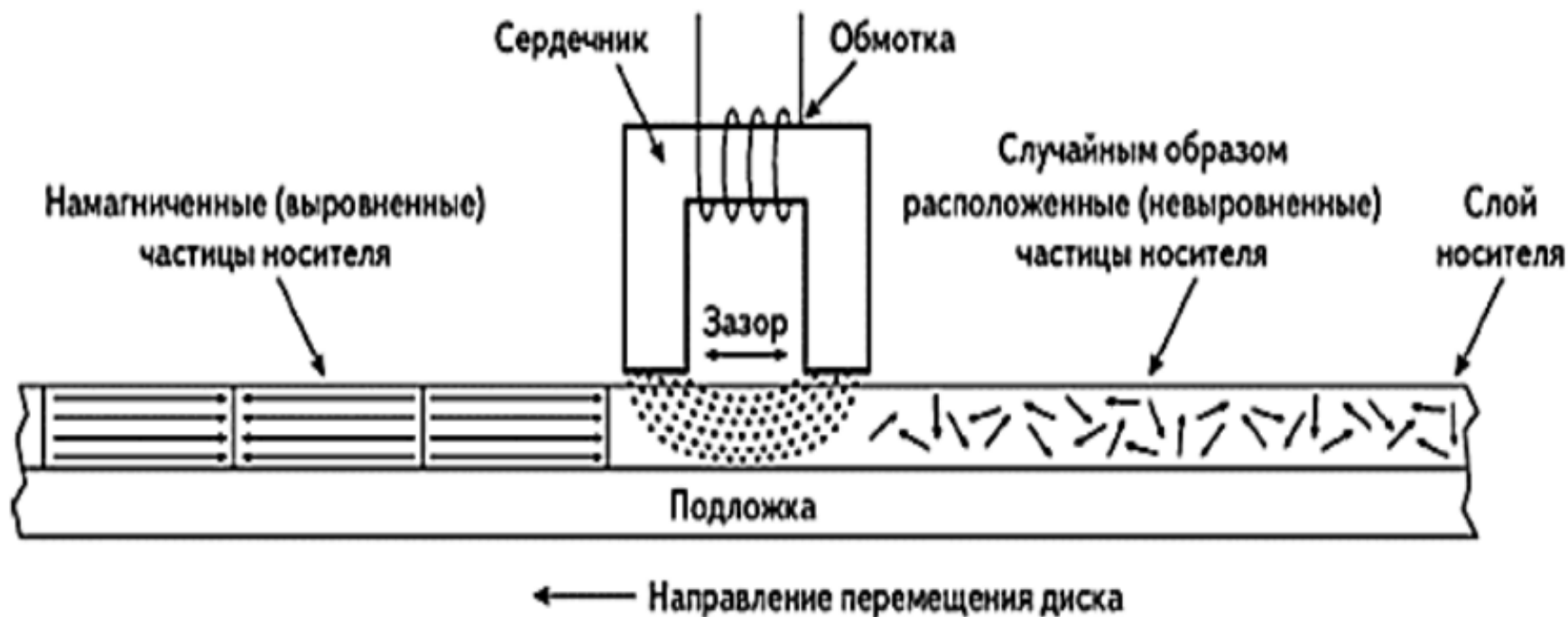
3. Принцип магнитной записи



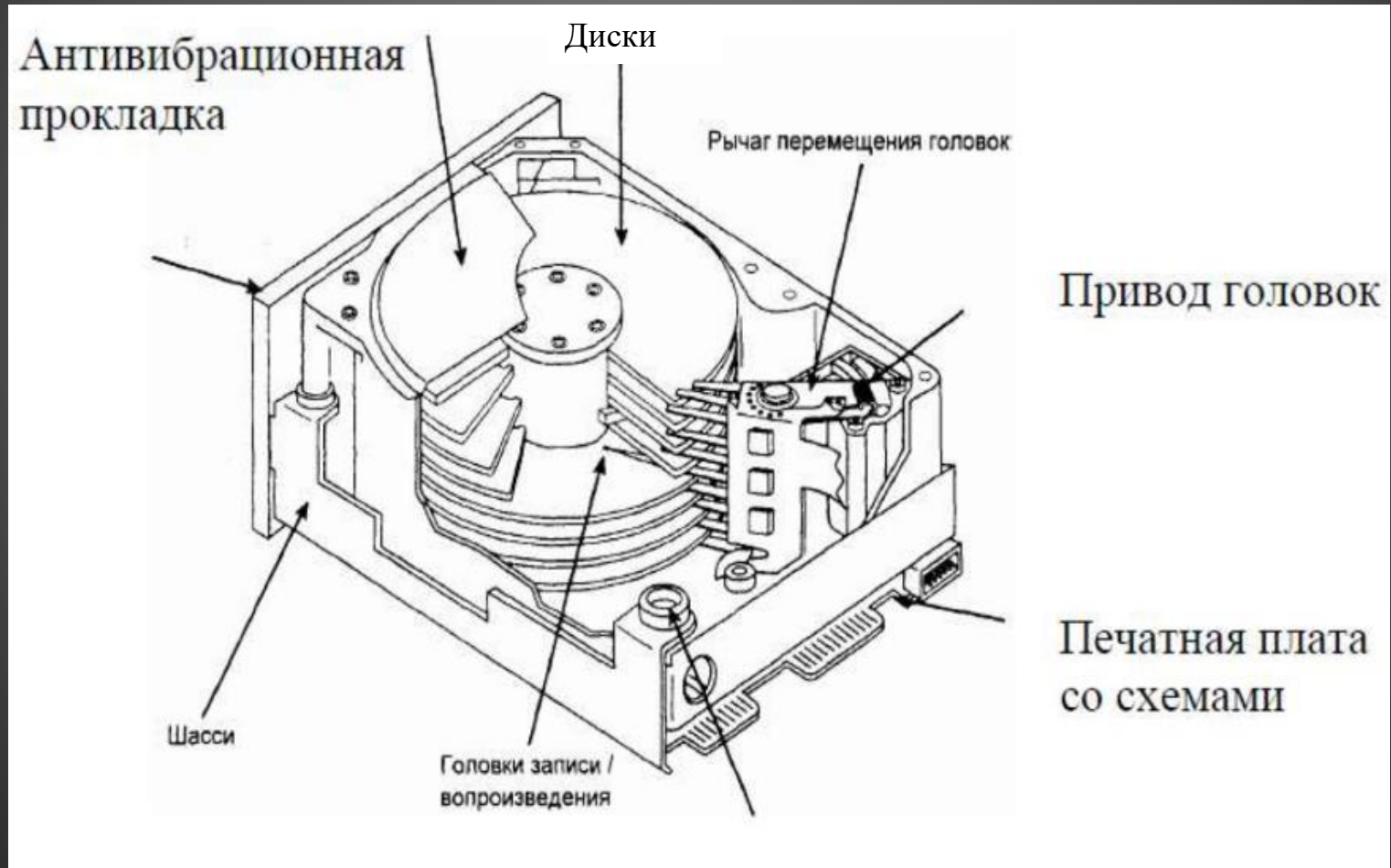
3. Физическое исполнение HDD



3. Принцип магнитной записи



3. Элементы конструкции жесткого диска



3. Элементы конструкции

Магнитные пластины:

- Подложка (substrate) – из алюминия или стекла.
- Несущий слой – сложный ферромагнитный сплав (напр. CoPtCrB).
- Защитный углеродный слой (от коррозии).
- Слой вязкой смазки.

Шпиндельный двигатель:

- Жидкостные (гидродинамические) подшипники.
- Контроллер, расположенный внутри гермоблока.
- Питание от +12/+5В.

Подвес головок чтения/записи:

- Головка (Head Gimbal Assembly) состоит из подвеса (suspension) и воздушного подшипника (ползуна).
- Головка закреплена на держателе (Arm) поворотной конструкции.
- Ползун содержит два элемента – индуктивный (для записи) и магниторезистивный (для чтения).

3. Элементы конструкции

Мотор катушки линейного электропривода (Voice Coil Motor):

- Поворотный механизм с применением управления током и постоянного магнита, состоящего из двух половин.
- Подача тока в катушки актуатора создает ЭДС, которая поворачивает держатель с подвесом головки.

Схемы предусиления чтения и формирования тока записи, коммутатор головок, закрепленные на сборке головок.

Плата электроники, содержащая:

- Цифровой сигнальный процессор (ЦСП, Digital signal processor, DSP, DSP-процессор), обрабатывающий сигналы чтения/записи.
- Микросхема буферной памяти, хранящая кэш и (иногда) микрокод.
- Микроконтроллер, выполняющий роль управляющего контроллера, интерфейсного контроллера и контроллера жесткого диска.
- Разъемы – интерфейсный и питания.
- Конфигурационные переключки (не обязательно).
- Служебный разъем (не обязательно, вместо него чаще применяют резервные контакты в группе переключек).

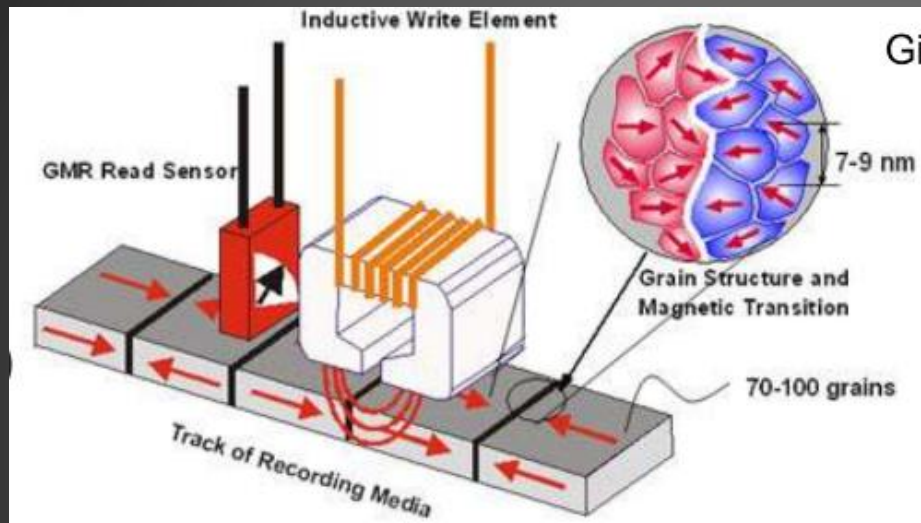
3. Носитель данных

В жестком диске типа «винчестер» для хранения данных применяют вращающиеся пластины круглой формы. Вращение необходимо для выполнения последовательной линейной адресации секторов, так как позиционер осуществляет лишь радиальную адресацию.

Используя различные методы напыления (гальваническое, ионное, плазменное и т.д.), на отполированный (гладкий) диск из стекла или металла наносится несколько слоев, включая ферромагнитный «бутерброд».

Физического разбиения на ячейки не имеется: границы «бит» (магнитных доменов), поле которых ориентировано в том или ином направлении, формируются в процессе записи данных, закодированных особым образом. Отсюда возникает проблема синхронизации. Она решается путем форматирования поверхности – нанесения меток (границ групп секторов и дорожек) специального вида.

3. Головки чтения-записи



Giant Magnetoresistive — GMR

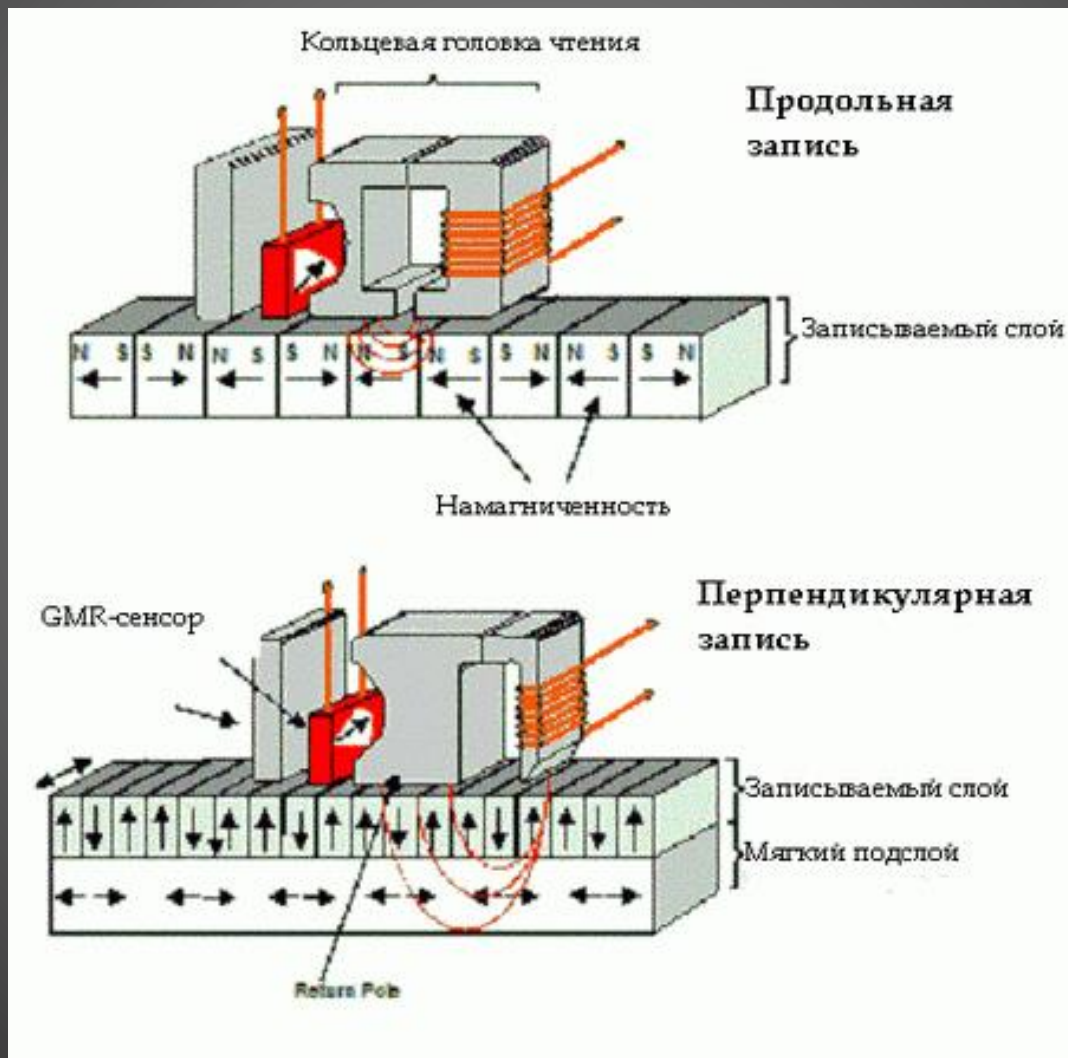
Рабочий элемент головки чтения/записи представляет собой комбинацию индуктивного элемента записи и магниторезистивного элемента чтения.

Катушка индуктивности создает магнитное поле заданной полярности.

Магниторезистивный элемент чтения измеряет изменение падения напряжения в полупроводнике, возникающее при прохождении последнего в магнитном поле.

Принцип работы элемента TMR: туннельный ток через изоляционный слой между двумя ферромагнетиками зависит от взаимной ориентации направлений их намагниченности.

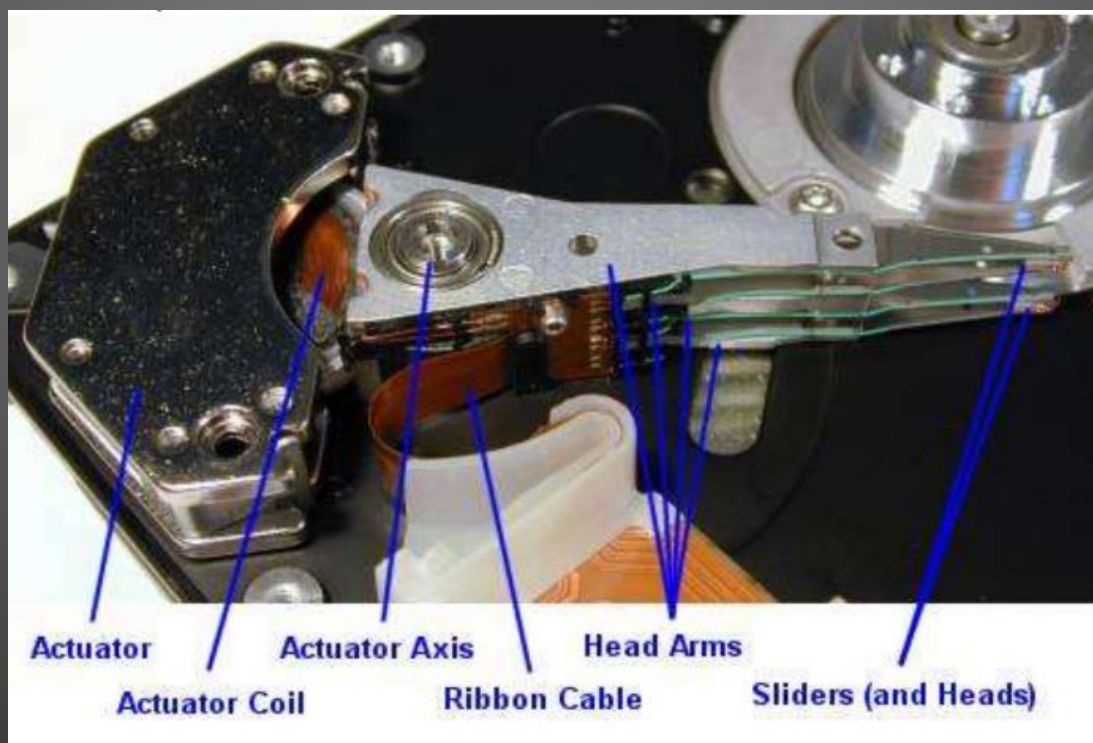
3. Типы магнитной записи



3. Конструкция держателя головки

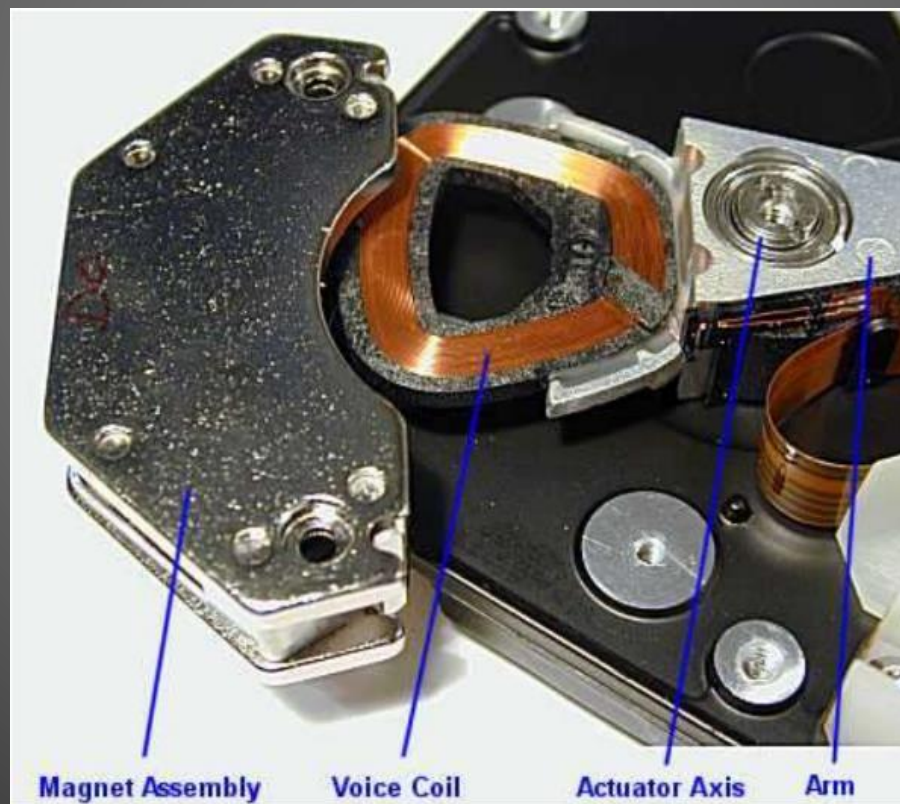
Рабочий элемент помещен в аэродинамический ползун (Air bearing slider), который создает подъемную силу и удерживает головку на воздушной подушке на заданной высоте.

Подшипник закреплен на гибком подвесе, а тот, в свою очередь – на одном плече держателя (Arm), выполненного в виде поворотного рычага.



3. Конструкция держателя головки

Актuator (привод головок чтения/записи) представляет собой мощный постоянный магнит, в поле которого помещена катушка индуктивности, намотанная на другом плече держателя.



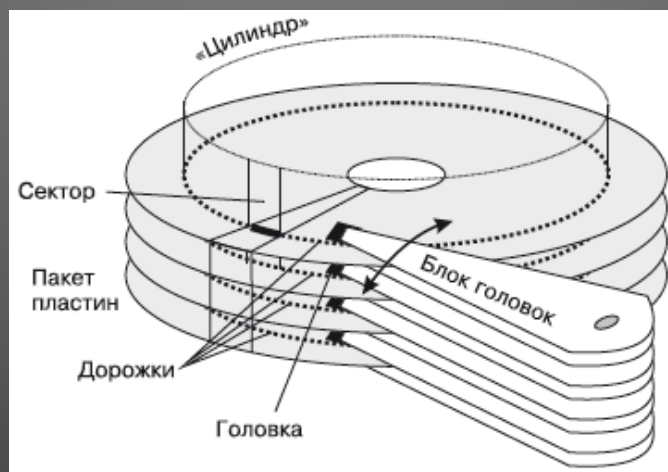
3. Принцип работы актуатора

Подача напряжения на катушку вызывает поворот держателя и перемещение рабочего элемента головки относительно радиуса магнитной пластины.

Поиск и удержание головки над заданной дорожкой осуществляется по **сервометкам** – внедренным между секторами ячейкам с сигналом особой формы.

Сигнал сервометок выделяется из общего сигнала чтения, по принципу обратной связи формируется сигнал отклонения актуатора при ослаблении или усилении сигнала сервометок заданной дорожки и соседних дорожек.

Сервометки записываются на заводе в условиях стерильности специальными устройствами – Servowriters. Запись и модификация сервометок в процессе работы винчестера невозможна.



3. Управление перемещением головок

При управлении головками используется принцип сервосистемы с закрытым контуром (Closed Loop Servo), который позволяет за счет обратной связи поддерживать стабильность положения головок и обеспечивать низкий уровень ошибок.

Процесс позиционирования при чтения и записи состоит из трех основных этапов:

- 1) Перемещение актуатора: разгон, пауза, торможение.
- 2) Нахождение нужной дорожки и переход к слежению (Settle);
данный этап требует повышенного внимания при операциях записи, так как нахождение неверной дорожки приведет к порче данных.
- 3) Ожидание появления нужного сектора (Rotational Latency).

3. Парковка головок

В нерабочем состоянии головки чтения/записи должны быть запаркованы во избежание их порчи при ударе или встряске при транспортировке.

Существует два вида парковки:

- в выделенной зоне диска (Dedicated landing zone);
- на площадке (Ramp).

Первый способ сегодня не применяется ввиду серьезных недостатков.

Перемещение головок в место парковки осуществляется либо механически (пружина или магнит), либо по сигналу об остановке шпинделя. В последнем случае необходимая энергия берется от шпинделя, который исполняет роль генератора.

3. Битовая ячейка

При записи каждого *бита* (или *группы из нескольких бит*) на диске формируется последовательность участков с различной намагниченностью (полярностью), и, соответственно, определенным расположением зон смены знака.

Участок дорожки записи, на котором может быть записана одна зона смены знака называется ячейкой переходов (transition cell) или просто битовой ячейкой.

Геометрические размеры такой ячейки зависят от:

- тактовой частоты сигнала записи;
- скорости, с которой перемещаются друг относительно друга головка и поверхность диска.

3. Кодирование двоичной информации

При записи в ячейках формируется последовательность зон смены знака, зависящая от способа кодирования информации.

Это связано с тем, что в процессе переноса данных на магнитный носитель каждый бит (или группа битов) с помощью специального кодирующего устройства преобразуется в серию электрических сигналов, не являющихся точной копией исходной последовательности импульсов.

От эффективности метода кодирования зависит эффективность использования магнитного носителя.

3. Проблема синхронизации

Важно определить момент смены знака.

Два пути решения синхронизации устройств чтения\записи:

- специальный сигнал синхронизации;
- объединить синхросигнал с сигналом данных.

Чтобы решить проблему синхронизации и отделения битов друг от друга, применяется специальное кодирование информации при записи на магнитный носитель. При кодировании один бит или группа битов заменяется несколькими колебаниями напряженности магнитного поля.

Ячейка должна начинаться с зоны смены знака, которая выполняет роль заголовка.

Затем следует (или не следует) переход , в зависимости от значения бита данных.

3. Базовые методы кодирования

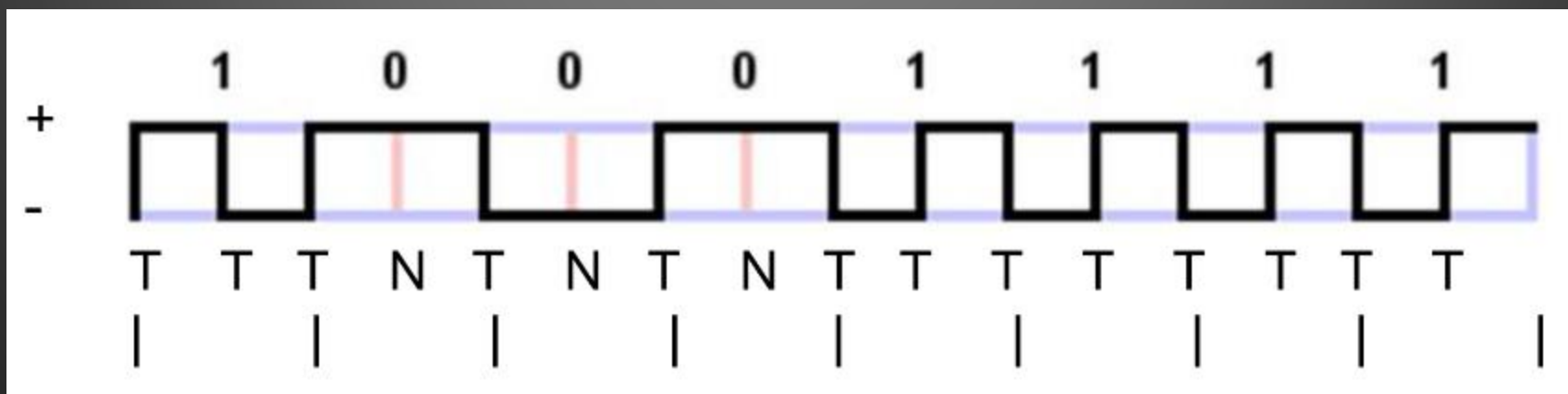
Выделяют три базовые метода кодирования:

- Частотная модуляция (**FM** - Frequency Modulation).
- Модифицированная частотная модуляция (**MFM** – Modified Frequency Modulation).
- Модуляция с ограниченной длиной последовательности (**RLL**- Run Length Limited), с различными вариантами.

3. Модуляция FM

N – отсутствие изменения направления напряженности магнитного поля.
T – присутствие этого изменения.

Между битами магнитное поле обязательно изменяется, иначе будет потеряна синхронизация. Фактически при таком способе кодирования изменяется частота следования перепадов уровня (отсюда и название).

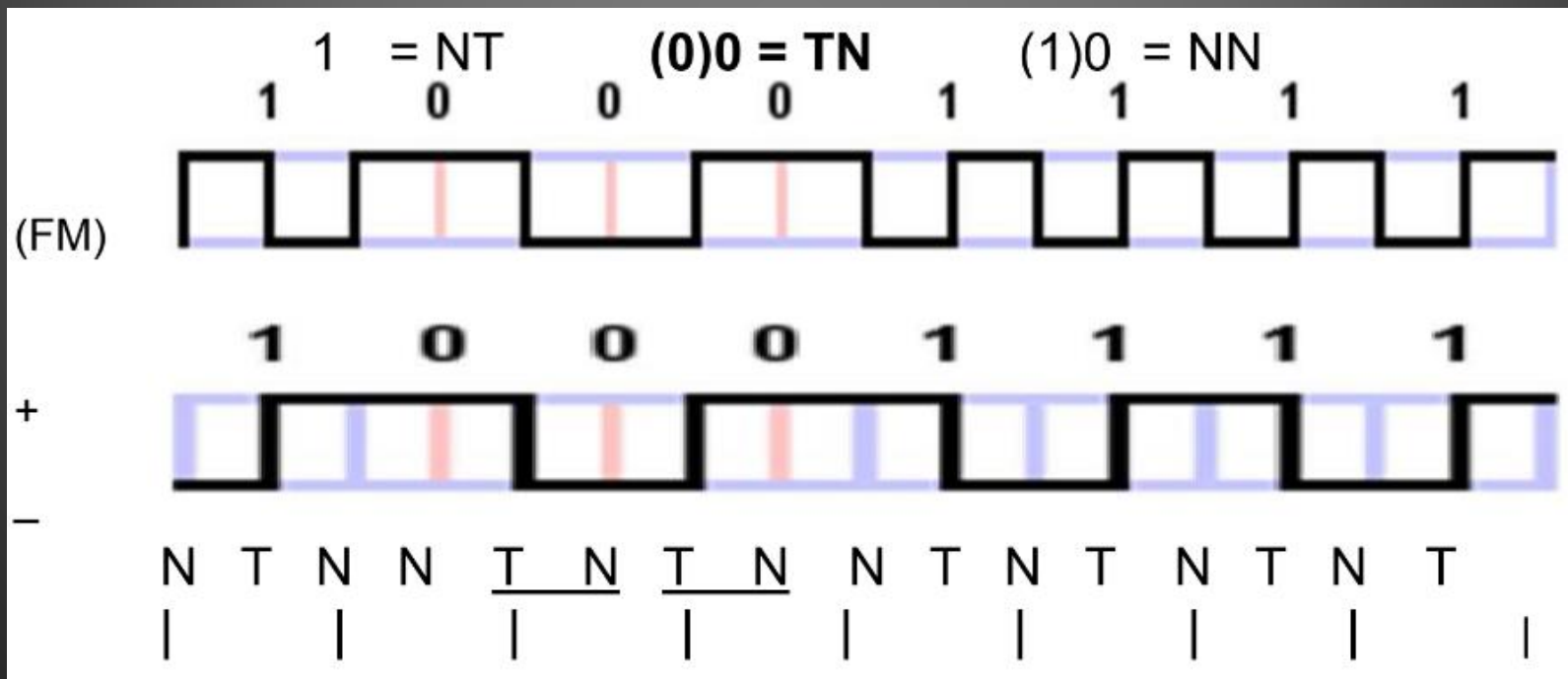


3. Модуляция MFM

T – присутствие изменения магнитного поля.

N – отсутствие изменения магнитного поля.

Изменение происходит только в случае, когда несколько 0 идут подряд.



3. Модуляция RLL

Метод кодирования с ограничением длины поля записи.

Кодируется последовательность нескольких бит, в результате чего создаются определенные последовательности зон смены знака.

Термин *Run Length Limited* (с ограничением длины пробега) составлен из названий двух основных параметров:

- минимальное (длина пробега);
- максимальное (предел пробега).

Алгоритмы RLL обеспечивают такую закодированную последовательность, что длина поля записи (количество бит между переходами от "0" к "1" или от "1" к "0") ограничена определенным диапазоном $[d+1; k+1]$.

3. Модуляция RLL

Параметры d и k задаются модификацией алгоритма (обозначается RLL d,k).

Число ячеек перехода, которые можно расположить между двумя зонами смены знака. Изменяя эти параметры, можно получать различные методы кодирования:

- RLL 2,7 - 8 бит данных перекодируются в 16 так, чтобы в последовательности встречалось не менее двух и не более семи нулей.
- RLL 1,7.
- RLL 3,9 (Advanced RLL).

3. Длина пробега

Методы FM и MFM, в сущности, являются частными вариантами RLL.

- FM-кодирование можно было бы назвать RLL 0,1, поскольку между двумя зонами смены знака может располагаться максимум одна ($TNT=0$) минимум нуль ($TT=1$) ячеек перехода.
- Соответственно метод MFM в этой терминологии можно было бы обозначить RLL 1,3, так как в этом случае между двумя зонами смены знака может располагаться от одной ($TNT=0$ или 1) до трех ячеек перехода ($TNNNT=101$).

3. Модуляция RLL 2.7

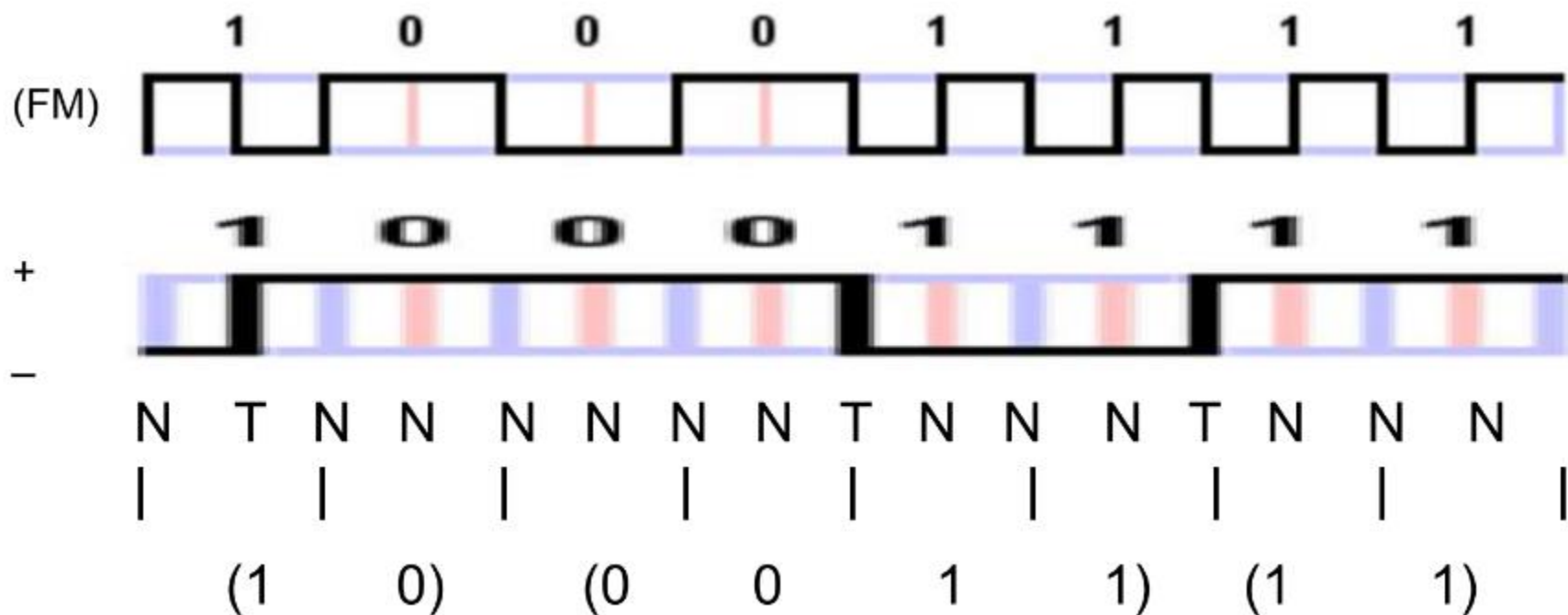
Таблица перекодировки различных последовательностей битов в серии зон смены знака (IBM). Кодирование происходит так, чтобы расстояние между зонами смены знаков было не слишком маленьким, но и не слишком большим (учет разрешения головки и синхронизации).

T—смена знака есть; N—смены знака нет.

10	NTNN
11	TNNN
000	NNNTNN
010	TNNTNN
011	NNTNNN
0010	NNTNNTNN
0011	NNNNTNNN

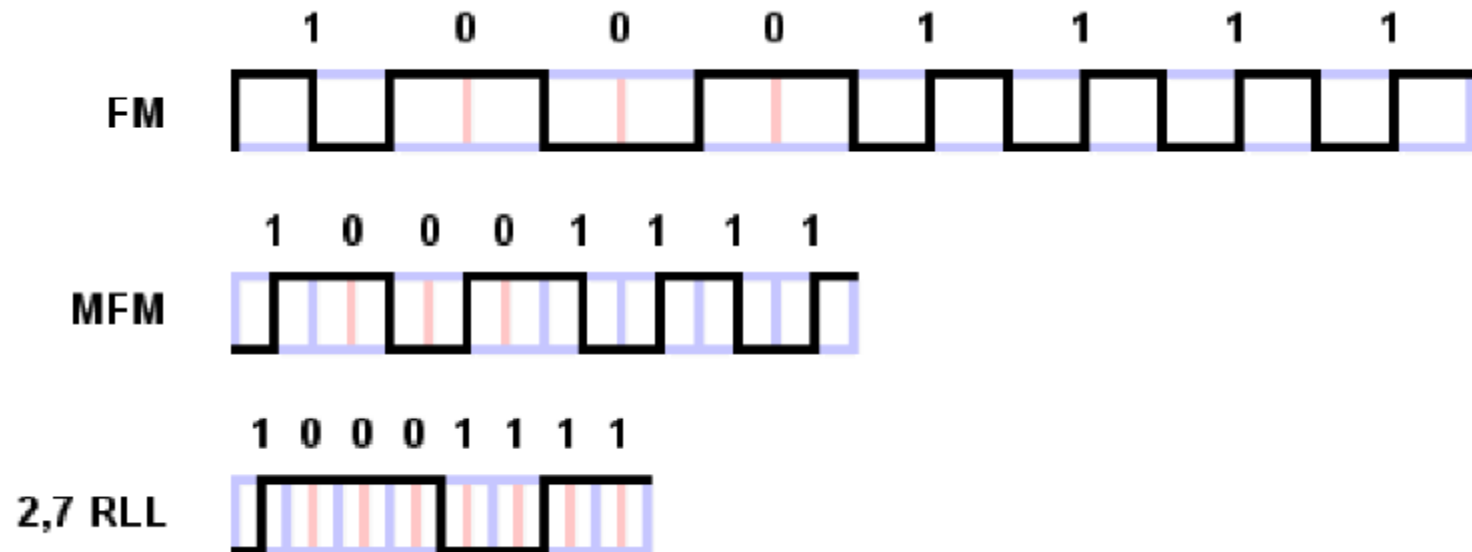
3. Модуляция RLL

Кодируется последовательность нескольких бит. Минимальное расстояние между соседними изменениями направления поля (требуется для синхронизации) зависит от параметров конкретного алгоритма.



3. Модуляция RLL

Поскольку записывается еще меньше зон смены знака, чем при MFM-кодировании, частоту сигнала синхронизации можно увеличить в 3 раза по сравнению с методом FM и в 1,5 раза по сравнению с методом MFM. Это позволяет на таком же пространстве диска записать больше данных.



3. Модуляция FM, MFM, RLL

- FM (RLL0,1) – однократная тактовая частота передачи данных;
- MFM (RLL1,3) – удвоенная тактовая частота передачи данных;
- RLL2,7) – утроенная тактовая частота передачи данных.

Необходимо отметить, что минимальное и максимальное физическое расстояние на поверхности диска между любыми двумя зонами смены знака одинаково для всех трех упомянутых методов кодирования.

3. Кодирование PRML

Технология PRML (Partial-Response, Maximum-Likelihood – групповым откликом, максимальной достоверностью / частичное определение, максимальное правдоподобие).

Контроллер анализирует поток данных с головки посредством фильтрации, обработки и алгоритма определения (элемент частичного определения), а затем предсказывает последовательность битов, которые этот поток данных наилучшим образом представляет (элемент максимального правдоподобия).

Позволяет повысить плотность расположения зон смены знака на диске в среднем на 40% и на столько же увеличить емкость носителя.

Увеличение плотности записи приводит к тому, что пиковые значения напряжения при считывании данных могут накладываться друг на друга.