

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКОВОЙ ПОДСИСТЕМЫ ЭВМ НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО НАКОПИТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ЧТЕНИЯ

В последнее время отмечается заметное вытеснение традиционных накопителей на жестких магнитных дисках — НЖМД (Hard Disk Drive, HDD) твердотельными носителями — ТТН (Solid State Drive, SSD), построенными на основе интегральных микросхем (ИМС) flash-памяти не только из сегмента персональных компьютеров, но и из сегмента центров обработки данных (ЦОД). Это происходит по следующим причинам [1]:

- конечное снижение суммарной стоимости закупки плюс стоимости эксплуатации за счет снижения энергопотребления на 60% (для каждой стой-ки, в которой заменили устройства);
- повышение производительности системы хранения данных (СХД) на основе ТТН в 40 раз по сравнению с СХД на основе НЖМД;
- более высокой надежности ТТН, интенсивность отказов которых в 4÷10 раз меньше, чем у НЖМД, что объясняется, в первую очередь, отсутствием у ТТН подвижных механических частей.

В криминалистической практике применительно к машинным носителям информации (МНИ) решаются две основные задачи. Это либо копирование содержимого носителя (полное или выборочное) с последующим исследованием копии на предмет наличия криминалистически значимой информации, либо поиск какой-либо конкретной информации (контекстный поиск) непосредственно на целевом машинном носителе информации с возможным последующим ее копированием.

Таким образом, как в первом, так и во втором случае основным режимом работы целевого МНИ будет чтение.

Моделирование функционирования твердотельного накопителя в режиме чтения на основе информации о модели накопителя (а, следовательно, и спецификации устройства) позволит оценить время, необходимое для получения полной копии содержимого ТТН.

**Ключевые слова:** моделирование, дисковая подсистема, копирование, страница чтения, контроллер.

# SIMULATION OF A COMPUTER DISK SUBSYSTEM BASED ON A SOLID STATE DRIVE IN READ MODE

Recently, there has been a noticeable displacement of traditional hard disk drives — HDD (Hard Disk Drive) by solid state drives — SSD (Solid State Drive), built on the basis of integrated circuits (ICs) flash-memory not only from the segment of personal computers, but also from the segment of data centers (DC). This happens for the following reasons [1]:

- the ultimate reduction in the total cost of purchase plus the cost of operation by reducing energy consumption by 60% (for each rack in which the devices were replaced);
- 40 times higher performance of data storage system based on SSD compared to based on HDD;
- higher reliability of SSD, the failure rate of which is 4÷10 times less than that of HDD, which is explained, first of all, by the absence of moving mechanical parts in SSD.

In forensic practice in relation to media type, two main tasks are solved. This is either copying the contents of the media (full or selective) with subsequent examination of the copy for the presence of forensic information, or searching for any specific information (context search) directly on the target media with possible subsequent copying.

Thus, both in the first and in the second case, the main mode of target media operation is reading.

Modeling the functioning of a solid state drive in read mode based on information about the drive model (and, consequently, the device specifications) allow us to estimate the time required to obtain a complete copy of the contents of the hard drive.

**Keywords:** modeling, disk subsystem, copying, reading page, controller.

При считывании данных с ТТН цепь прохождения считанных данных будет включать следующие элементы (рис. 1).

На рис. 1: NAND – устройства flash-памяти; Controller – контроллер SSD; Data Register – регистр данных (страничный); Cache Register

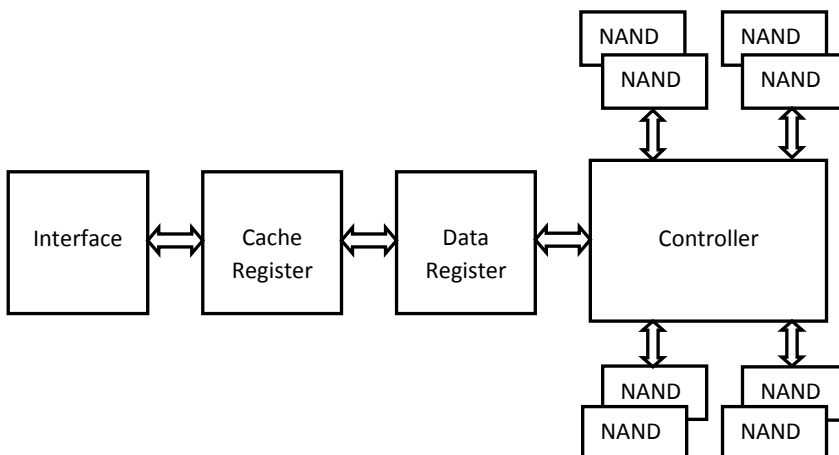


Рис. 1. Цепь прохождения считанных данных в ТТН

– буферная память; Interface – интерфейс накопителя.

Наличие регистра данных связано с особенностью построения ИМС flash-памяти (рис. 2).

Работа с отдельными ячейками ИМС flash-памяти невозможна. Группы ячеек объединя-

ются в страницы чтения/записи. Именно такой объем данных является минимальным для его считывания или записи. Страницы объединяются в более крупный элемент массива – блок стирания. Набор блоков стирания собственно и представляет собой массив ячеек ИМС flash-памяти.

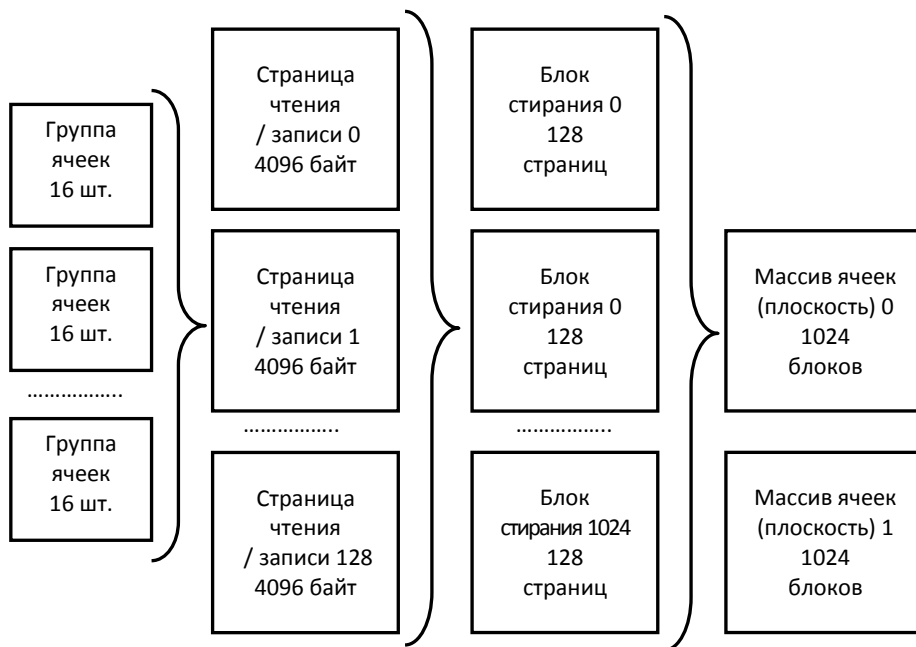


Рис. 2. Массив ячеек ИМС flash-памяти

При считывании данных требуемая страница считывается сначала в регистр данных, и только после этого перемещается в буферную оперативную память, которая также может входить в состав контроллера, либо может быть представлена отдельной ИМС.

В представленном на рис. 1 варианте считывание может осуществляться одновременно по четырем каналам с шириной каждого канала 8 бит (1 байт). Более совершенные контроллеры могут поддерживать 8 каналов с шириной канала 16 бит (2 байта).

Кроме непосредственного использования параллельно 2, 4, 8 каналов [2] существует еще и возможность подключения на каждый канал более одного NAND-устройства. Это может быть две ИМС flash-памяти, либо два NAND-устройства в одном корпусе ИМС (рис. 1). Такое подключение позволяет задействовать еще один механизм ускорения процессов чтения/записи (в первую очередь записи) – чередование (Interleaving).

Пусть  $S$  – множество запросов, при которых данные берутся только из кэша, а  $F$  – множество запросов, требующих обращения к

массиву flash-памяти. Нагрузка представляет собой последовательность запросов из множества  $S \cup F$ , причем для чтения  $S \cap F \neq \emptyset$ .

Предположив, что скорость чтения данных из каждого хранилища постоянна и равна  $v_c^r$  и  $v_f^r$ , можно записать время выполнения одного запроса:

$$t_c^r = s_c^r / v_c^r, \quad t_f^r = s_f^r / v_f^r$$

где  $s_c^r$  и  $s_f^r$  – количество запрашиваемых байт соответственно из кэша и массива flash-памяти.

В работе [3] применительно к НЖМД время выполнения последовательности запросов чтения представлено как линейная функция трех переменных:

$$T = N_d^r * t_0^r + S_d^r / v_0^r + S_c^r / v_c^r, \quad (1)$$

где  $N_d^r$  – общее количество дисковых запросов на чтение;  $S_d^r$  и  $S_c^r$  – общее число байтов, прочитанных за время  $T$  с пластин жесткого диска и из кэша соответственно;  $t_0^r$  – среднее время поиска.

Данную модель можно адаптировать и для прогнозирования производительности дисковой подсистемы ЭВМ на основе ТТН.

Параметры нагрузки остаются прежними,

т. е.  $N_f^r$  – количество за-про-сов на чтение из flash-памяти;  $S_f^r$  – общее число байтов, считанных из flash-памяти;  $S_c^r$  – общее число байтов, считанных из кэша.

Коэффициенты модели для ТТН будут иметь тот же физический смысл, но применительно конструкции твердотельного носителя. Первый коэффициент модели (1) применительно к НЖМД – среднее время поиска, т. е. за-держка между временной отметкой, как поступил запрос на чтение и отметкой, когда началось реальное считывание данных.

Применительно к ТТН данная задержка зависит от технологии изготовления flash-памяти, а именно емкости отдельной ячейки памяти. Формат хранения данных в flash-памяти типа NAND медленно эволюционировал к повышению емкости микросхем за счет увеличения количества бит, хранимых в одной ячейке, что в свою очередь вело к увеличению времени доступа (табл. 1) [4].

На смену первому поколению ячеек SLC (Single-Level Cell), хранивших один бит в ячейке, пришло следующее MLC (Multi-Level Cell) с

Таблица 1

### Характеристики ячеек NAND-памяти

Характеристика	SLC	MLC	TLC
Количество циклов стирания/записи	100 000	10 000	5 000
Количество бит в ячейке	1	2	3
Задержка поиска, мкс	–	–	–
Задержка чтения, мкс	25	50	100
Задержка записи, мкс	250	900	1 500
Задержка стирания, мкс	1 500	3 000	5 000

двумя битами в ячейке, а затем TLC (Triple-Level Cell) с тремя битами в ячейке.

При этом необходимо иметь ввиду, что при снятии полной копии будет задействовано конвейерное чтение, которое за счет наличия нескольких каналов позволяет свести к минимуму задержки чтения, а именно задержка будет иметь место только при чтении первой страницы.

Конкретно (упрощенно), происходит следующее (рис. 3, б) [5]:

- команда чтения первой страницы (с указанием адреса);
- большая пауза для получения данных из матрицы;
- команда кэширующего чтения второй страницы (с указанием адреса);
- вычитывание данных из первой страницы. В действительности, данные считываются из буферного регистра (Cache Register), в который они переписались сразу по факту окончания передачи из матрицы в регистр данных. Пока идет процесс вычитывания данных из микросхемы, данные страницы номер два переписываются в освободившийся регистр данных;
- команда кэширующего чтения третьей страницы (с указанием адреса);
- вычитывание второй страницы из буферного регистра и т. д.

Дополнительные накладные расходы

ожидания есть только для чтения первой страницы, все остальные идут без пауз – время ожидания выполнения чтения из матрицы flash-памяти (tR) скрадывается временем передачи данных из микросхемы (Data Output).

На рис. 3 представлен вариант чтения страницы объемом 4 КВ, выполненной по технологии MLC, без кэширования (3, а) и с кэшированием (3, б) [5].

Чередование на уровне шины устройства не требует сложных изменений оборудования, а дополнительные накладные расходы невелики. Для устройства с чередованием на уровне шины рост производительности составляет от 55% до 85% [6].

На рис. 4 представлен вариант чтения страницы объемом 4 КВ, выполненной по технологии MLC с одной (4, а) и двумя плоскостями (4, б) [5]. В данном случае уже имеет место интерливинг для двух плоскостей NAND-устройства.

Чередование плоскостей флэш-памяти не требует специальной конструкции оборудования, но аппаратное и программное обеспечение флэш-памяти должно поддерживать плоскости. Такое чередование может повысить производительность от 30% до 80% [6].

Таким образом, первый коэффициент модели (1) можно взять из табл. 1 в зависимости от технологии изготовления ячейки. Пара-

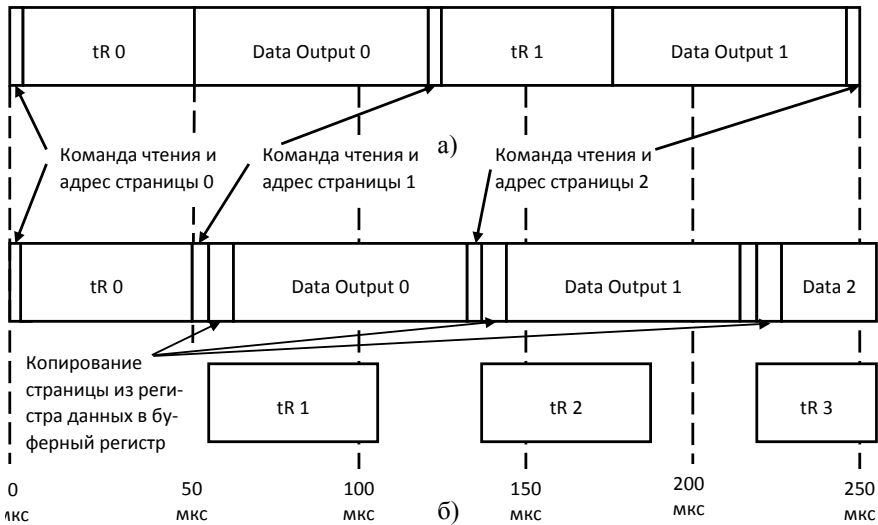


Рис. 3. Чтение страницы 4 KB MLC: а — без кэширования (скорость чтения 27,3 МБ/с); б — с кэшированием (скорость чтения 36,5 МБ/с)

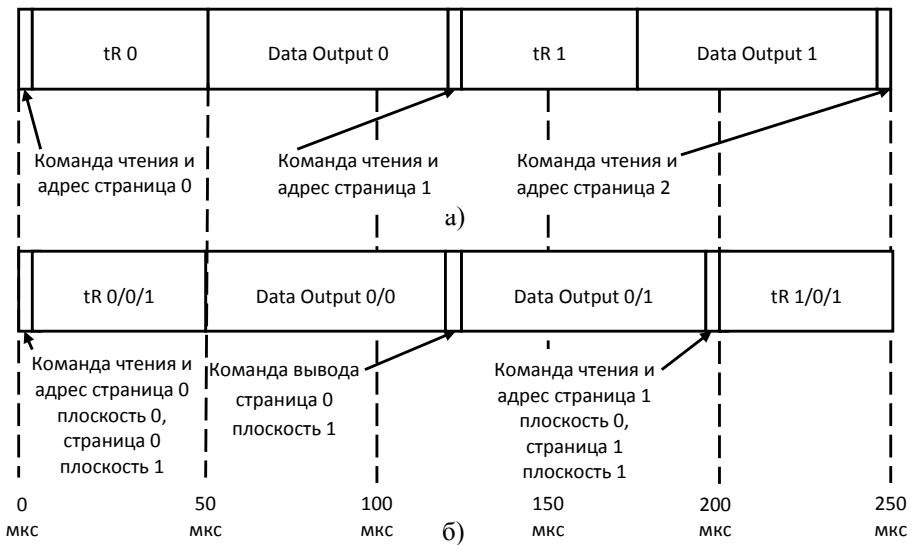


Рис. 4. Чтение страницы 4 KB MLC: а — NAND-устройство содержит одну плоскость (скорость чтения 27,3 МБ/с); б — NAND-устройство содержит две плоскости (скорость чтения 32,4 МБ/с)

метр нагрузки – количество запросов на чтение из flash-памяти – будет равен  $N'_f = 1$  из-за особенностей конвейерного чтения.

Второй коэффициент модели (1) для НЖМД представляет собой величину, обратную внутренней скорости передачи данных с пластин жесткого диска во внутренний буфер. По аналогии для ТТН данный коэффициент будет характеризовать скорость передачи данных, считанных из матрицы flash-памяти. Так как считывание данных происходит из нескольких NAND-устройств, то данный коэффициент будет напрямую зависеть от количества каналов, поддерживаемых контроллером SSD, а также процедур чередования, реализованных в накопителе в целом.

Кроме того, необходимо учитывать, какие именно процедуры интерливинга будут задействованы исходя из количества и конструкции ИМС flash-памяти и наличие (либо отсутствие) в SSD буферной (кэш) памяти.

Допустим, SSD реализован в виде накопителя, блок-схема которого приведена на рис. 1. Тогда, исходя из количества NAND-устройств (8), если это отдельные ИМС, на каждой шине (канале) будет задействован шинный интерливинг. Если же это 4 ИМС, каждая из которых будет содержать две плоскости flash-памяти, как на рис. 2, то будет задействовано чередование плоскостей. Следовательно, внутреннюю скорость передачи данных можно представить как скорость чтения

страницы  $v_1^r$  (рис. 3, а), умноженную на количество каналов (шин)  $n$ , поделенное на коэффициент интерливинга  $\alpha$ , так как одномерно восьмибитная шина может передавать данные только от одного NAND-устройства (ИМС или плоскости), т. е.  $\frac{1}{v_1^r * n / \alpha}$ .

Считанные данные будут последовательно перемещаться вначале в регистр данных, а затем в буферную память (см. рис. 1), т. е. через эти элементы будет проходить весь объем считанных данных. Поэтому третье слагаемое в модели (1) можно отбросить, а влияние кэша учесть непосредственно скоростью чтения во втором слагаемом модели (1) (рис. 3, б).

Следовательно, применительно к ТТН

время выполнения последовательности запросов чтения может быть представлено как линейная функция двух переменных:

$$Tr = tr0 * Nrf + \frac{1}{v_1^r * n / \alpha} * S_r^r \quad (2)$$

Для определения количества каналов, поддерживаемых контроллером SSD, и коэффициента интерливинга, необходимо иметь более обширную информацию, чем та, которая приводится в спецификации на SSD (рис. 5) [7]. Дополнительно могут потребоваться спецификации на контроллер, ИМС flash-памяти, а также информация о наличии буферной памяти (встроенной в контроллер, либо представленной в виде отдельной ИМС).

## Specifications

<b>Product Model</b>	SP600
<b>Capacity</b>	32GB/64GB/128GB
<b>Form factor</b>	2.5 inch
<b>NAND Flash</b>	Synchronous multi-Level Cell (MLC) NAND Flash Memory
<b>Controller</b>	JMicron , 66X Series
<b>Dimensions</b>	100 x 69.85 x 7mm (L x W x H)
<b>Weight</b>	68g
<b>Interface</b>	SATA 6Gb/s

Рис. 5. Спецификация на SSD ADATA модель SP600

Как видно из рис. 5, в спецификации о контроллере и используемых ИМС flash-памяти присутствует только самая общая информация, из которой нельзя сделать выводы о количестве каналов, поддерживаемых контроллером, количестве ИМС памяти и количестве NAND-устройств, используемых в SSD.

Вскрытие корпуса накопителя объемом 64 Гб позволило выяснить наличие контроллера JMF670H (четырёхканальный) и 4 ИМС ADATA 600. Поскольку компания ADATA сама микросхем flash-памяти не производит, а закупает у другого производителя (как правило, одного и того же), то пришлось изучить содержимое более объемного ADATA SSD на 128 Гб, на плате которого имелось 8 ИМС 29F16B08CC (производитель компания Micron). Был сделано предположение, что в SSD на 64 Гб установлены аналогичные ИМС. Первые три символа – 29F – указывают, что это NAND flash-память, следующие три – 16B – объем 16 Гб, далее – 08 – разрядность шины 8 бит, символ C – количество бит в ячейке – 2 бита, последний символ C – количество кристаллов в ИМС – 2 кристалла.

Таким образом, имеем четырехканаль-

ный контроллер, к которому подключены 4 ИМС flash-памяти компании Micron, каждая из которых имеет 2 кристалла (плоскости), т. е. в SSD реализовано чередование на уровне плоскостей. Какой прирост производительности это дает оценить достаточно сложно, поэтому остановимся на среднем значении 50%, т. е. коэффициент интерливинга принимаем равным  $\alpha = 1,5$ .

Осуществим оценку времени, необходимого для получения полной копии SSD, объем которого составляет 64 Гб или 65536 Мб, скорость считывания страницы 4 Кб 32,4 Мб/с (рис. 4, б) (буферная память отсутствует).

$$T = t_0^r * N_r^r + \frac{1}{v_1^r * n / \alpha} * S_r^r = 0,00005 * 1 + \frac{65536}{32,4 * 4 / 1,5} = 758,51857 \text{ с} = 12 \text{ мин } 38 \text{ с.}$$

Время полного копирования с использованием программно-аппаратного комплекса (ПАК) PC-3000 составило 11 мин 49 с. Разница между расчетным временем и практическим составляет 49 с.

Для проверки адекватности модели осуществим расчет и практическое копирование еще для двух накопителей разных производителей и объемов.



ТТН Silicon Power CPCC 128 ГБ на контроллере SM2246XT (четырёхканальный), 2 ИМС 29F64G08 CM. Первые три символа – 29F – указывают, что это NAND flash-память, следующие три – 64G – объём 64 ГБ, далее – 08 – разрядность шины 8 бит, символ C – количество бит в ячейке – 2 бита, последний символ M – количество кристаллов в ИМС – 4 кристалла.

Контроллер имеет четыре канала, а ИМС всего две, но в каждой по четыре кристалла, т. е. к каждому каналу подключено 2 кристалла одной из ИМС или одна ИМС подключена к двум каналам. Используем тот же коэффициент интерливинга  $a = 1,5$ .

Осуществим оценку времени, необходимого для получения полной копии SDD, объём которого составляет 128 ГБ или 114 470 МБ, скорость считывания страницы 4 КБ 36,5 МБ/с (рис. 3, б) (есть ИМС буферной памяти объёмом 512 МБ).

$$T = t_0^r * N_f^r + \frac{1}{v_1^r * n/\alpha} S_f^r = 0,00005 * 1 + \frac{114470}{36,5 * 4/1,5} = 1176,10197 \text{ с} = 19 \text{ мин } 36 \text{ с.}$$

Время полного копирования с использованием ПАК PC-3000 составило 18 мин 37 с. Разница между расчетным временем и практическим составляет 59 с.

SSD Plextor PX-256M6S 256 ГБ на контроллере Marvell 88SS9188 (четырёхканальный), 8 ИМС TH58TEG8DDKTA20. Расшифровка маркировки ИМС компании Toshiba вызвала проблему, поскольку ни в одном из источников она не приводится, но зато производитель ТТН приводит в спецификации на устройство информацию, достаточную для того, чтобы сделать выводы, какое количество ИМС и NAND-устройств содержится в накопителе — 8 ИМС по 4 кристалла в каждом корпусе (рис. 6) [8].

Осуществим оценку времени, необходимого для получения полной копии SDD, объём

Производитель	Plextor		
Серия	M6S		
Модельный номер	PX-128M6S	PX-256M6S	PX-512M6S
Форм-фактор	2,5 дюйма		
Интерфейс	SATA 6 Гбит/с		
Ёмкость	128 Гбайт	256 Гбайт	512 Гбайт
<b>Конфигурация</b>			
Микросхемы памяти: тип, интерфейс, техпроцесс, производитель	Toshiba 64 Гбит A19-нм MLC NAND		Toshiba 128 Гбит A19-нм MLC NAND
Микросхемы памяти: число / количество NAND-устройств в чипе	8/2	8/4	8/4
Контроллер	Marvell 88SS9188		
Буфер: тип, объём	DDR3L-1600, 256 Мбайт	DDR3L-1600, 512 Мбайт	DDR3L-1600, 768 Мбайт

Рис. 6. Спецификация на SSD Plextor модель PX-256M6S

ем которого составляет 256 ГБ или 244 191 МБ. Ввиду того, что в накопителе используется как чередование по плоскостям, так и по шинам (8 ИМС на четырёхканальный контроллер), увеличим коэффициент интерливинга до  $a = 1,6$ , скорость считывания страницы 4 КБ 36,5 МБ/с (рис. 3, б) (есть ИМС буферной памяти объёмом 512 МБ).

$$T = t_0^r * N_f^r + \frac{1}{v_1^r * n/\alpha} S_f^r = 0,00005 * 1 + \frac{244191}{36,5 * 4/1,6} = 2676,0658 \text{ с} = 44 \text{ мин } 36 \text{ с.}$$

Время полного копирования с использованием ПАК PC-3000 составило 44 мин 31 с. Разница между расчетным временем и практическим составляет 5 с.

Для наглядности исходные данные и полученные результаты сведены в таблицу (табл. 2).

### Выводы

1. Имея информацию о модели целевого накопителя можно предварительно оценить потребное время на получение его полной копии с использованием модели производительности дисковой подсистемы (2).

2. Подбор исходных данных для оценки времени, необходимого для получения полной копии ТТН, является достаточно кропотливым процессом, поскольку информации, которая присутствует в спецификации, как правило, недостаточно для того, чтобы выяс-

## Характеристики ТТН

Характеристика\ТТН	ADATA	Silicon Power	Plextor
Модель	CP600	CPCC	PX-256M6S
Емкость, Гбайт	64	128	256
Интерфейс	SATA	SATA	SATA
Тип контроллера, количество каналов (шин)	JMF670H 4	SM2246XT 4	Marvell 88SS9188 4
Тип памяти, количество ИМС/ NAND-устройств	MLC 4/2	MLC 2/4	MLC 8/4
Расчетное время копирования, мин	12,64	19,6	44,6
Практическое время копирования, мин	11,82	18,62	44,52
Разница между расчетным и практическим временами, мин	+0,82	+0,98	+0,08

нить, какое количество каналов поддерживает контроллер и какие конструктивные особенности имеют ИМС flash-памяти.

3. Модель (2) позволяет оценить и время, необходимое для копирования определенного объема данных. Однако при этом количество запросов на чтение из flash-памяти  $N'_f$  в первом слагаемом будет отличным от 1. Его значение можно будет определить, разделив объем копируемых данных на объем страницы 4 КБ.

4. Как было указано в начале статьи, количество каналов, поддерживаемых контроллером SSD, может быть более, чем 4 (например, 8, 16); ширина канала также может быть отличной от 8 бит (например, 16, 32). Объем страницы в современных ИМС flash-памяти может быть отличным от стандартных 4 КБ (например, 8, 16). Наконец flash-память, выполненная по технологии MLC, в свое время вытеснившая SLC, сама вытесняется памятью, производи-

мой по технологиям TLC и QLC (Quad-Level Cell), хранящих 3 и 4 бита соответственно. Все это необходимо учитывать при выборе коэффициентов, используемых в модели (2).

5. Так же, как и при работе с НЖМД, возможно считывание содержимого страницы с ошибками, которые не были исправлены ECC (Error-Correcting Code). Но если для НЖМД каждое повторное чтение нестабильного сектора требует полного оборота пластин жесткого диска, то для ТТН повторное чтение страницы может быть сделано практически моментально, даже если необходимо сделать несколько повторов вычитывания данных страницы до того, как декодирование ECC будет успешным (рис. 7) [9] — задержка составляет единицы микросекунд.

Таким образом, если время полного копирования НЖМД в значительной степени зависит от технического состояния механиче-

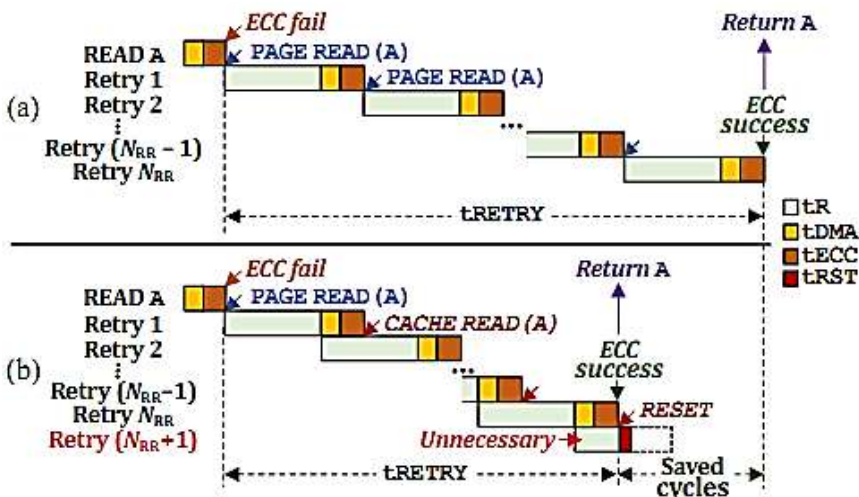


Рис. 7. Повторное вычитывание страницы и декодирование ECC



ской подсистемы накопителя (гермоблок), т. е. от наличия нестабильных блоков, то применительно к ТТН наличие нестабильных

страниц не приносит сколько-нибудь значительных задержек в процесс снятия копии.

---

## Литература

1. Жесткие диски (мировой рынок) на 2021/08/09. [Электронный ресурс] — URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (дата обращения: 04.09.2021)
2. Эволюция SSD: магия меркантистов и ее разоблачение. Longread о проникновении твердотельных накопителей в нашу жизнь. [Электронный ресурс] — URL: <https://www.overclockers.ua/storage/ssd-evolution/all> (дата обращения: 02.11.2021).
3. Нижник Е. И. Математическая модель нагрузки файловой системы NTFS при активном поиске дисковых данных. [Электронный ресурс] — URL: <http://tekhnosfera.com/matematiceskoe-modelirovanie-proizvoditelnosti-faylovyh-sistem> (дата обращения: 07.03.2021).
4. Принцип работы, 3 типа памяти и устройство SSD накопителя. [Электронный ресурс] — URL: [https://www.moyo.ua/news/chto\\_takoe\\_ssd\\_disk\\_ustroystvo\\_i\\_3\\_tipa\\_pamyati\\_nakopitelya.html](https://www.moyo.ua/news/chto_takoe_ssd_disk_ustroystvo_i_3_tipa_pamyati_nakopitelya.html) (дата обращения: 16.09.2021).
5. HDD и SSD – единство различий. [Электронный ресурс] — URL: [https://overclockers.ru/lab/show/41187/HDD\\_i\\_SSD\\_edinstvo\\_razlichij](https://overclockers.ru/lab/show/41187/HDD_i_SSD_edinstvo_razlichij) (дата обращения: 16.09.2021).
6. Обзор твердотельных накопителей Corsair Force GT Series 240 Гбайт и Corsair Force 3 Series 240 Гбайт. [Электронный ресурс] — URL: [https://fcenter.ru/online/hardarticles/hdd/32467/Obzor\\_tverdotelnyh\\_nakopitelej\\_Corsair\\_Force\\_GT\\_Series\\_240\\_Gbajt\\_i\\_Corsair\\_Force\\_3\\_Series\\_240\\_Gbajt](https://fcenter.ru/online/hardarticles/hdd/32467/Obzor_tverdotelnyh_nakopitelej_Corsair_Force_GT_Series_240_Gbajt_i_Corsair_Force_3_Series_240_Gbajt) (дата обращения: 16.01.2022).
7. ADATA SP600 Solid State Drive [Электронный ресурс] — URL: <https://www.adata.com/upload/downloadfile/120906-datasheet-SP600-EN.pdf> (дата обращения: 16.01.2022).
8. Обзор SSD Plextor M6S: семь раз отрежь, потом — померь. [Электронный ресурс] — URL: <https://3dnews.ru/821000/obzor-ssd-plextor-m6s-sem-raz-otreg-potom-pomer> (дата обращения 16.01.2022).
9. Reducing Solid-State Drive Read Latency by Optimizing Read-Retry. [Электронный ресурс] — URL: [http://people.inf.ethz.ch/omutlu/pub/Reducing-SSD-Read-Latency-by-Optimizing-Read-Retry\\_asplos21.pdf](http://people.inf.ethz.ch/omutlu/pub/Reducing-SSD-Read-Latency-by-Optimizing-Read-Retry_asplos21.pdf) (дата обращения 16.01.2022).

## References

1. Zhestkiye diski (mirovoy rynek) na 2021/08/09. [Elektronnyy re-surs] — URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (data obrashcheniya: 04.09.2021).
2. Evolyutsiya SSD: magiya merkantologov i yeye razoblacheniye. Longread o pro-niknovenii tverdotel'nykh nakopiteley v nashu zhizn'. [Elektronnyy re-surs] — URL: <https://www.overclockers.ua/storage/ssd-evolution/all> (data ob-rashcheniya: 02.11.2021).
3. Nizhnik Ye. I. Matematicheskaya model' nagruzki faylovoy sistemy NTFS pri aktivnom poiske diskovykh dannyyh. [Elektronnyy resurs] — URL: <http://tekhnosfera.com/matematiceskoe-modelirovanie-proizvoditelnosti-faylovyh-sistem> (data obrashcheniya: 07.03.2021).
4. Printsip raboty, 3 tipa pamyati i ustroystvo SSD nakopitelya. [Elektronnyy resurs] — URL: [https://www.moyo.ua/news/chto\\_takoe\\_ssd\\_disk\\_ustroystvo\\_i\\_3\\_tipa\\_pamyati\\_nakopitelya.html](https://www.moyo.ua/news/chto_takoe_ssd_disk_ustroystvo_i_3_tipa_pamyati_nakopitelya.html) (data obrashcheniya: 16.09.2021).
5. HDD i SSD – yedinstvo razlichiy. [Elektronnyy resurs] — URL: [https://overclockers.ru/lab/show/41187/HDD\\_i\\_SSD\\_edinstvo\\_razlichij](https://overclockers.ru/lab/show/41187/HDD_i_SSD_edinstvo_razlichij) (data obrashcheniya: 16.09.2021).
6. Obzor tverdotel'nykh nakopiteley Corsair Force GT Series 240 Gbajt i Corsair Force 3 Series 240 Gbajt. [Elektronnyy resurs] — URL: [https://fcenter.ru/online/hardarticles/hdd/32467/Obzor\\_tverdotelnyh\\_nakopitelej\\_Corsair\\_Force\\_GT\\_Series\\_240\\_Gbajt\\_i\\_Corsair\\_Force\\_3\\_Series\\_240\\_Gbajt](https://fcenter.ru/online/hardarticles/hdd/32467/Obzor_tverdotelnyh_nakopitelej_Corsair_Force_GT_Series_240_Gbajt_i_Corsair_Force_3_Series_240_Gbajt) (data obrashcheniya: 16.01.2022).
7. ADATA SP600 Solid State Drive [Elektronnyy resurs] — URL: <https://www.adata.com/upload/downloadfile/120906-datasheet-SP600-EN.pdf> (data obrashcheniya: 16.01.2022).
8. Obzor SSD Plextor M6S: sem' raz otrezh', potom — pomey'. [Elektronnyy resurs] — URL: <https://3dnews.ru/821000/obzor-ssd-plextor-m6s-sem-raz-otreg-potom-pomer> (data obrashcheniya 16.01.2022).
9. Reducing Solid-State Drive Read Latency by Optimizing Read-Retry. Available at: [http://people.inf.ethz.ch/omutlu/pub/Reducing-SSD-Read-Latency-by-Optimizing-Read-Retry\\_asplos21.pdf](http://people.inf.ethz.ch/omutlu/pub/Reducing-SSD-Read-Latency-by-Optimizing-Read-Retry_asplos21.pdf) (accessed 16 January 2022).

---

**ШАМОНИН Евгений Дмитриевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры алгебры и фундаментальной информатики, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: shamonined@mail.ru

**SHAMONIN Evgeniy Dmitrievich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Algebra and Fundamental Informatics, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. 620002, Ural Federal District, Sverdlovsk Region, Yekaterinburg, 19 Mira St. E-mail: shamonined@mail.ru