Построение отказоустойчивых распределенных систем хранения данных на основе модулярной арифметики

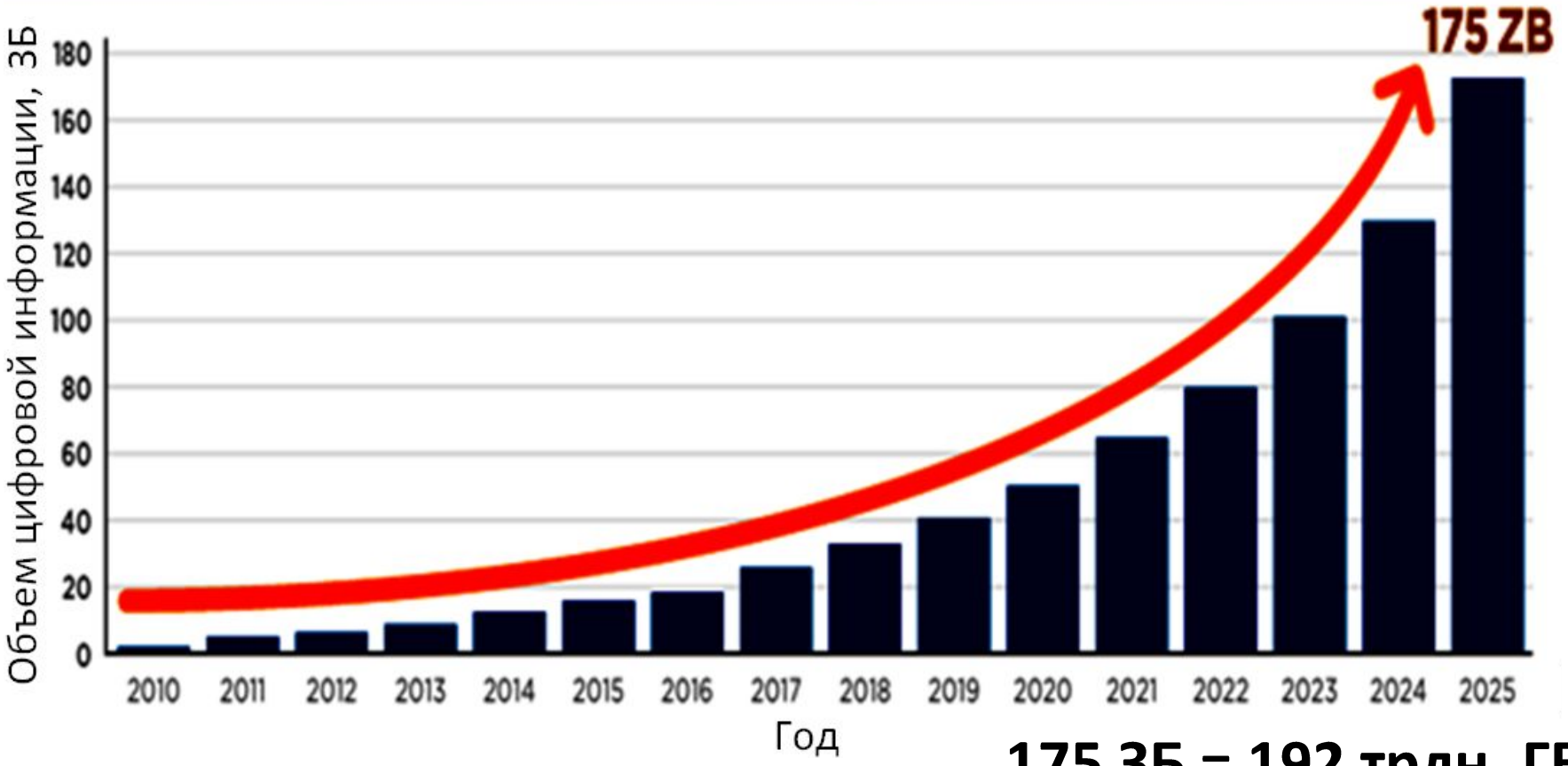
Назаров Антон Сергеевич
к.т.н., м.н.с. УНЦ «Вычислительная математика и параллельное программирование на супер ЭВМ»
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РФ,
доктор технических наук, профессор
Червяков Николай Иванович

Ставрополь - 2020

Актуальность

РОСТ МИРОВОГО ОБЪЕМА ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

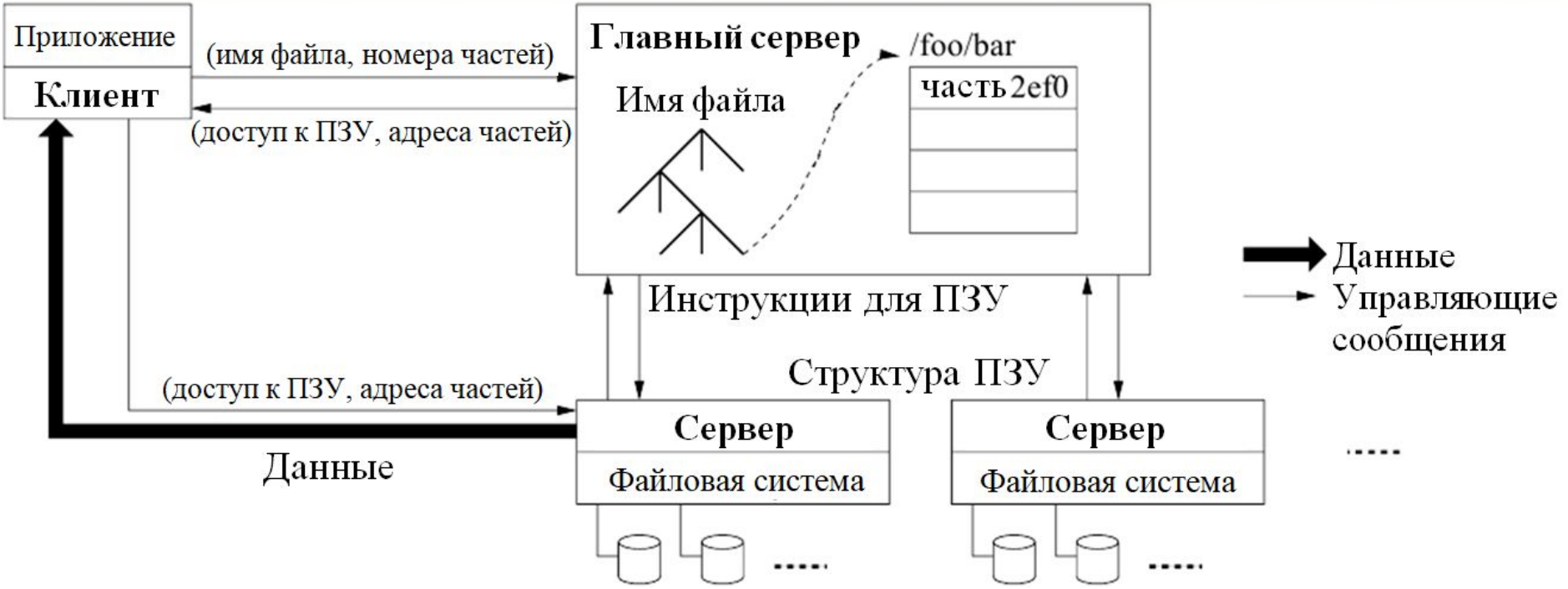


175 ЗБ = 192 трлн. ГБ

*по данным International Data Corporation (IDC) на ноябрь 2018

Актуальность

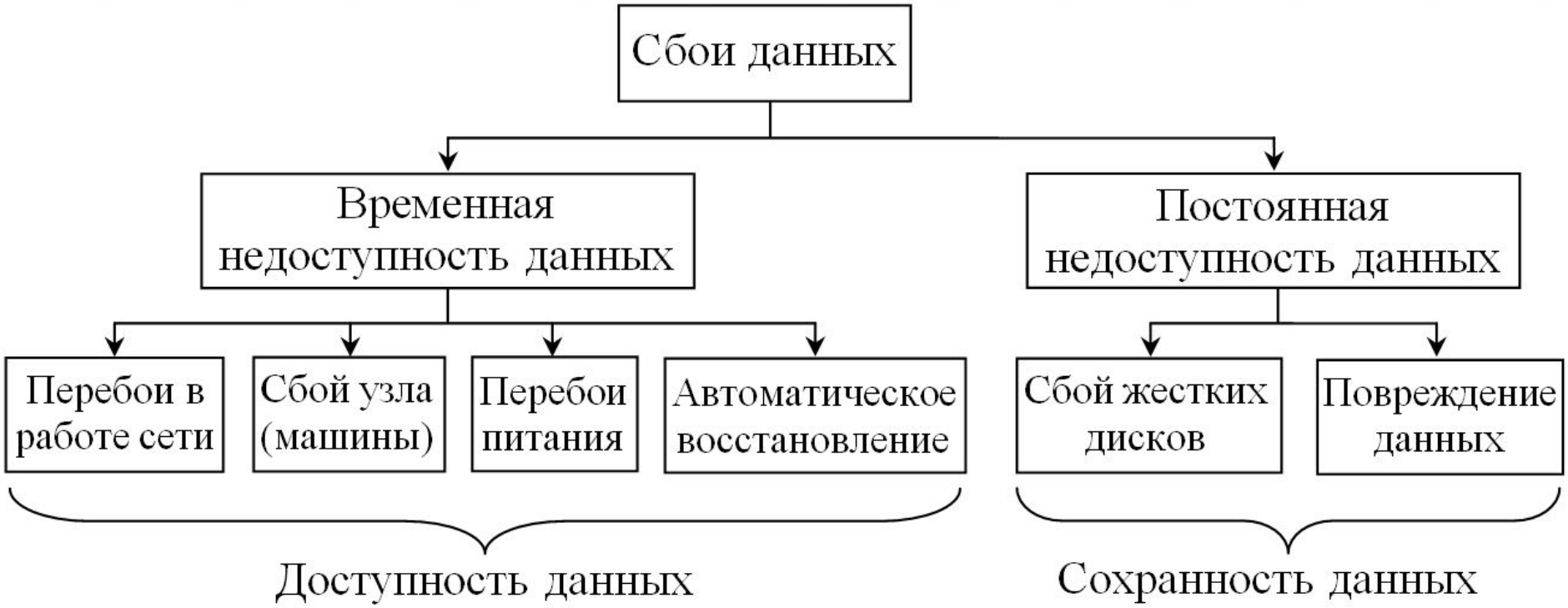
СТРУКТУРА РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ



*Ghemawat, S., Gobioff, H., and Leung, S.-T. The Google File System. In 19th Symposium on Operating Systems Principles, Lake George, NY, pp. 29-43, 2003.

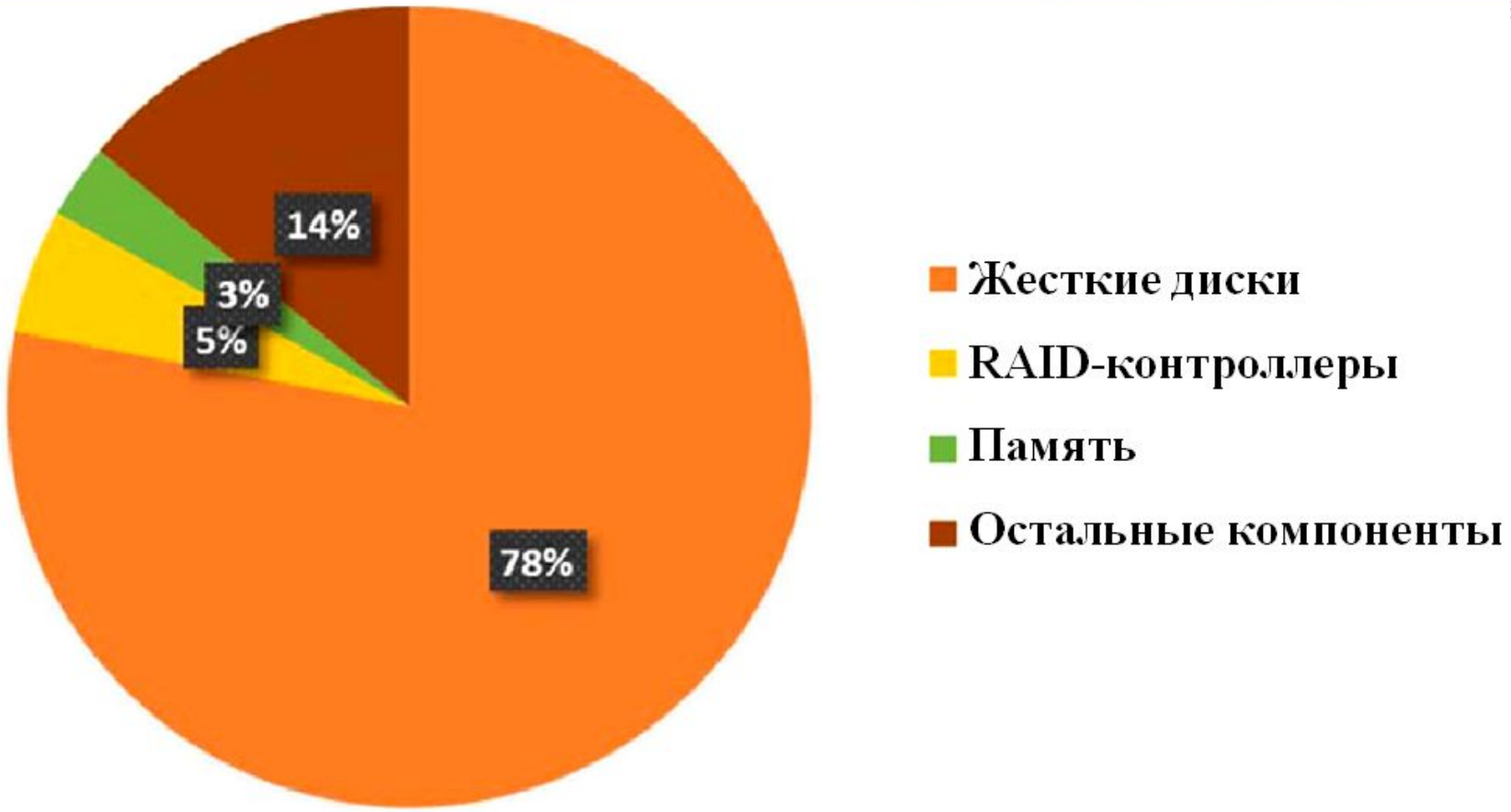
Актуальность

КЛАССИФИКАЦИЯ СБОЕВ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ



* Nachiappan, R. Cloud storage reliability for Big Data applications: A state of the art survey / R. Nachiappan, B. Javadi, R.N. Calheiros [et al.] // Journal of Network and Computer Applications. – 2017. – Vol. 97. – P. 35-47.

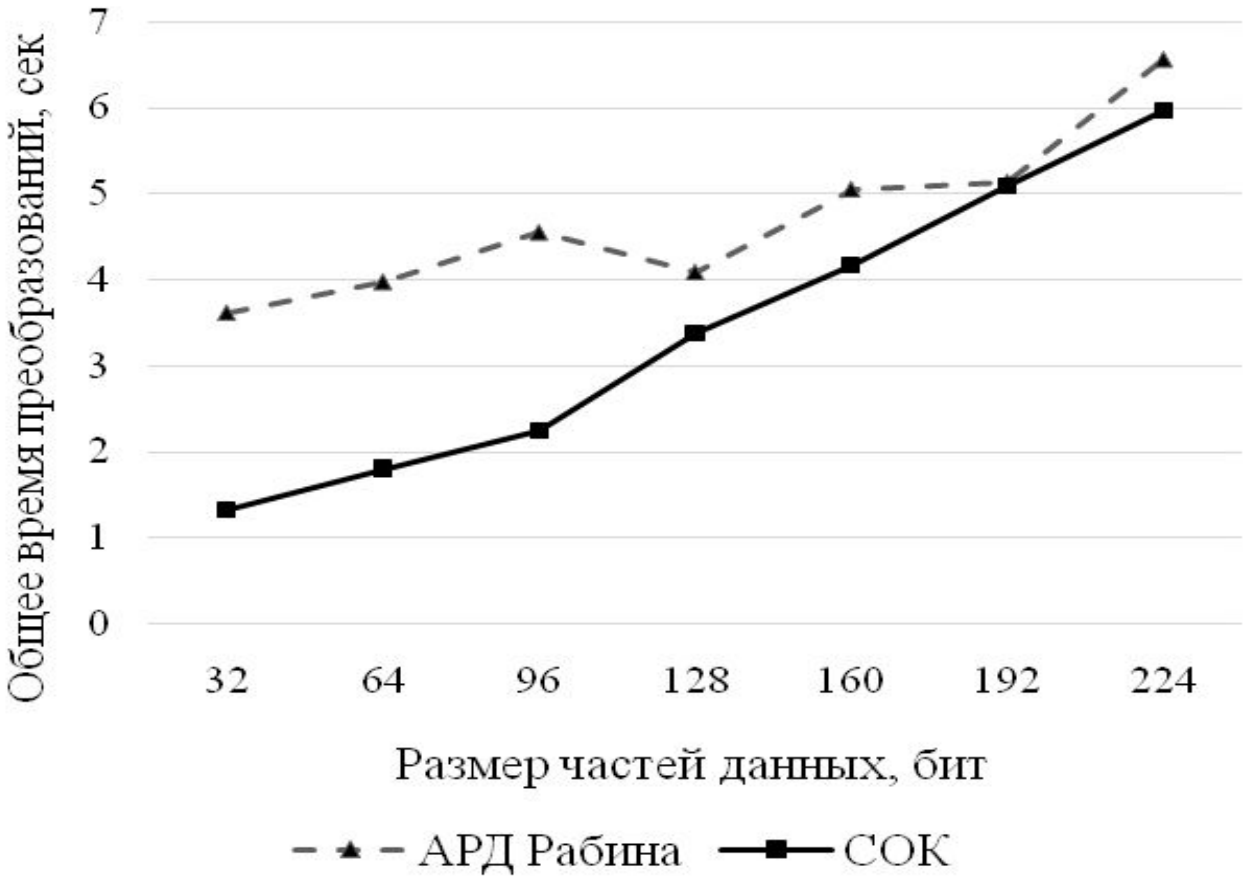
ПРИЧИНЫ СБОЕВ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ



* Sharma, Y. Reliability and energy efficiency in cloud computing systems: Survey and taxonomy / Y. Sharma, B. Javadi, W. Si [et al.] // Journal of Network and Computer Applications. – 2016. – Vol. 74. – P. 66-85.

СТАНДАРТНЫЙ И ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ОСНОВНЫХ АЛГОРИТМОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ



* Deryabin, M. Comparative Performance Analysis of Information Dispersal Methods / M. Deryabin, N. Chervyakov, A. Nazarov [et al.] // FRUCT: Proceedings of the 24th Conference of Open Innovations Association. – Moscow, Russia: IEEE, 2019. – P. 67-74.

СИСТЕМА ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

Система Остаточных Классов (СОК)*:

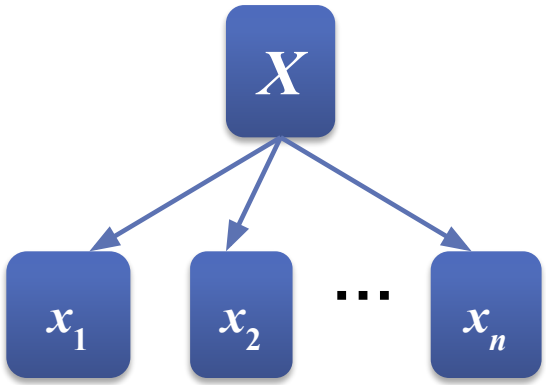
- Непозиционная система счисления
- Числа представлены наборами остатков от деления на основания СОК
- Возможность распараллеливания арифметических вычислений
- Возможность контроля целостности
- Основные приложения СОК:
  - Цифровая обработка сигналов
  - Обработка изображений
  - Криптография
  - Повышение надежности
  - Облачные вычисления
  - Big Data
  - и т.д.

m_i – основания СОК (попарно взаимно простые числа, НОД(m_i, m_j) = 1, $\forall\, i \neq j$)

X – число в позиционной системе счисления ($0 \le X < m_1 \cdot m_2 \cdot \ldots \cdot m_n$)

$x_i = X \bmod m_i$ – компоненты числа в СОК (цифры)

$$X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$$



* Omondi, A. Residue Number Systems. Theory and Implementation / A. Omondi, B. Premkumar. – London, England: Imperial College Press, 2007. – 296 p.

ИЗБЫТОЧНАЯ СИСТЕМА ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

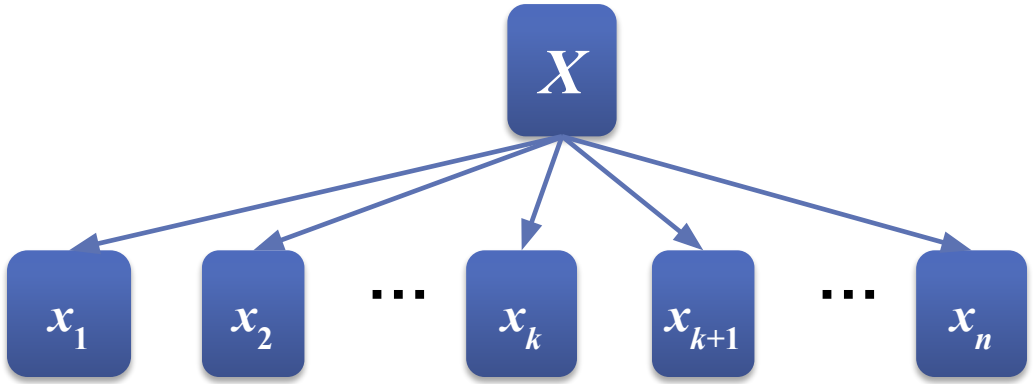
m_i – основания избыточной СОК (ИСОК)
(попарно взаимно простые числа, НОД(m_i , m_j) = 1, $\forall\, i \neq j$)
$M_k = m_1 \cdot m_2 \cdot \ldots \cdot m_k$ – рабочий диапазон ИСОК
$M_n = M_k \cdot m_{k+1} \cdot m_{k+2} \cdot \ldots \cdot m_n$ – полный диапазон ИСОК
n – общее кол-во оснований, k – кол-во рабочих оснований

X – число в позиционной системе счисления ($0 \le X < m_1 \cdot m_2 \cdot \ldots \cdot m_k$)
$x_i = X \bmod m_i$ – компоненты числа в ИСОК (цифры)

$$X = (x_1, x_2, \ldots, x_k, x_{k+1}, \ldots, x_n)$$

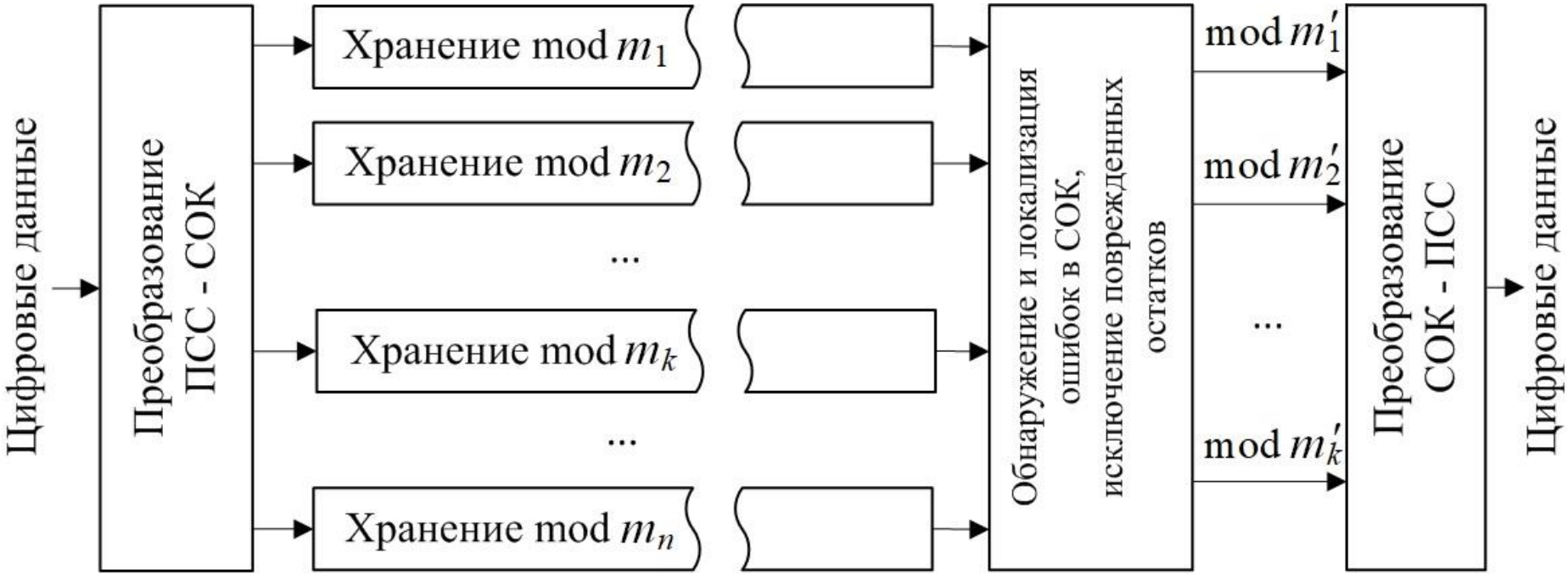
Корректирующая способность (*k*,*n*)-ИСОК*:

Обнаружение ошибки: *r*
Исправление ошибки: $\lfloor r/2 \rfloor$,
где *r* = *n* - *k*



* Ding, C. Chinese remainder theorem: applications in computing, coding, cryptography / C. Ding, D. Pei, A. Salomaa. – Singapore: World Scientific, 1996. – 214 p.

МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ИЗБЫТОЧНОЙ СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

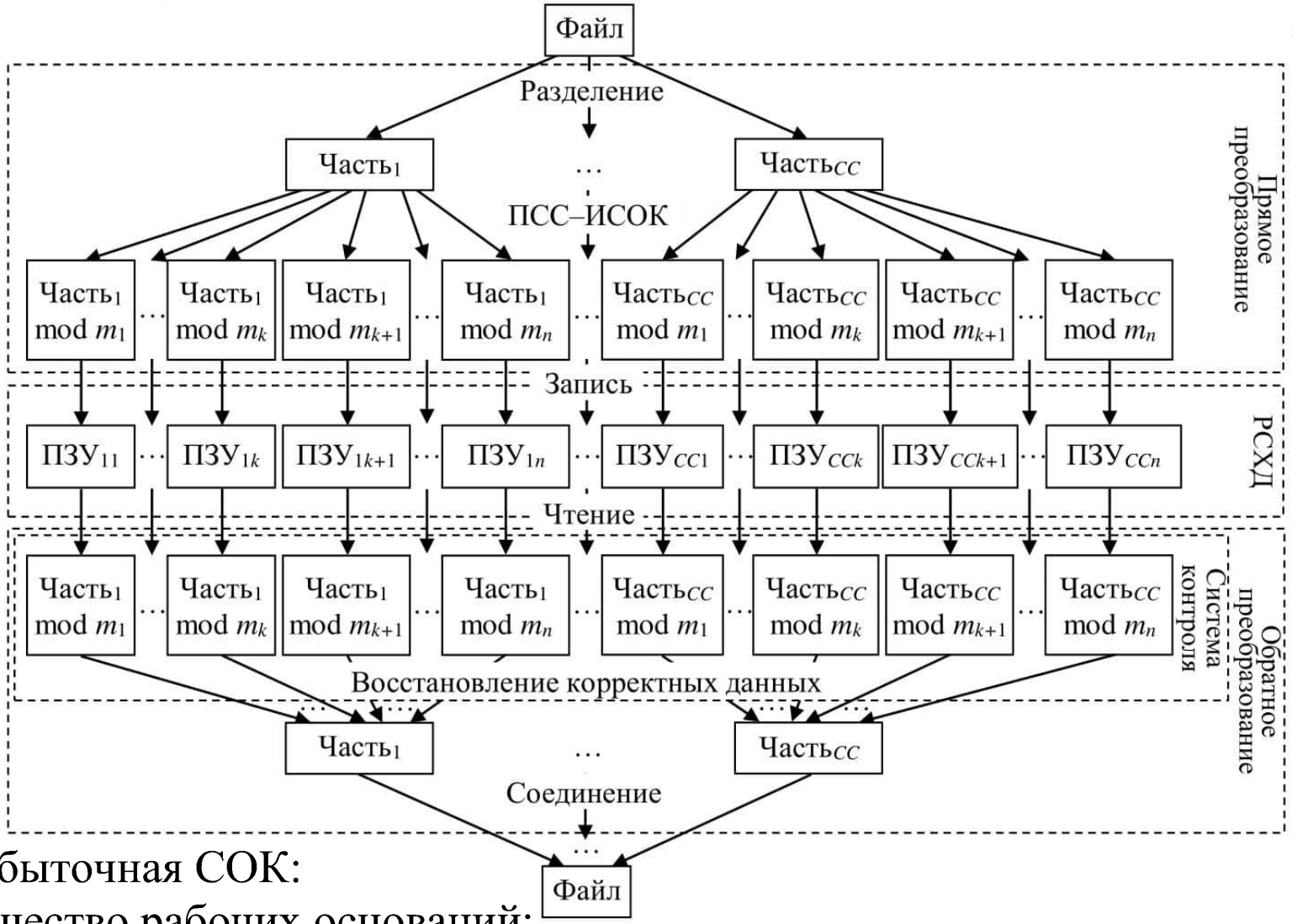


(k, n)-избыточная СОК:

k – количество рабочих оснований;

n – общее количество оснований.

ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ИЗБЫТОЧНОЙ СОК



(k, n)-избыточная СОК:

k – количество рабочих оснований;

n – общее количество оснований;

CC – кол-во частей после разделения файла.

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК НА ОСНОВЕ ИСОК

Метод Непрерывных Дробей:

– Goldreich O., Ron D., Sudan M. Chinese remaindering with errors // IEEE Transactions on Information Theory. 2000. Vol. 46, no. 4. P. 1330-1338.

– Mandelbaum D. On a class of arithmetic codes and a decoding algorithm // IEEE Transactions on Information Theory. 1976. Vol. 22, no. 1. P. 85-88.

Синдромное Декодирование:

– Tay T.F., Chang C.H. A Non-Iterative Multiple Residue Digit Error Detection and Correction Algorithm in RRNS // IEEE Transactions on Computers. 2016. Vol. 65, no. 2. P. 396-408.

– Червяков Н.И., Сахнюк П.А., Шапошников А.В., Макоха А.Н. Нейро-компьютеры в остаточных классах. – М.: «Радиотехника», 2003. – 272 с.

Метод Модулярных Проекций:

– Goh V.T., Siddiqi M.U. Multiple error detection and correction based on redundant residue number systems // IEEE Transactions on Communications. 2008. Vol. 56, no. 3. P. 325-330.

– Chervyakov, N.I. The architecture of a fault-tolerant modular neurocomputer based on modular number projections / N.I. Chervyakov, P.A. Lyakhov, A.S.Nazarov [et al.] // Neurocomputing. – 2018. – Vol. 272. – P. 96-107.

МЕТОД НЕПРЕРЫВНЫХ ДРОБЕЙ

Достоинства: –

Недостатки:

– возрастание количества итераций при увеличении кратности ошибок и разрядности остатков (!!! критический недостаток);

– неэффективность при аппаратной реализации.

СИНДРОМНОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ

Синдромное декодирование с ограничением на надежность избыточных остатков

Достоинства:

– высокая скорость обнаружения, локализации и исправления ошибок;

– уменьшение объема коррекционных таблиц по сравнению с полным синдромным декодированием;

Недостатки:

– требование абсолютной надежности избыточных остатков (!!! критический недостаток);

– произведение контрольных модулей должно более чем вдвое превышать величину рабочего диапазона: $2M_k < m_{k+1}m_{k+2}\ldots m_n$;

– быстрое увеличение объема коррекционных таблиц с увеличением кратности ошибки.

СИНДРОМНОЕ ДЕКОДИРОВАНИЕ

Полное синдромное декодирование

Достоинства:

– высокая скорость обнаружения, локализации и исправления ошибок;

– отсутствие ограничения, связанного с абсолютной надежностью контрольных остатков;

Недостатки:

– произведение контрольных модулей должно более чем вдвое превышать величину рабочего диапазона: $2M_k < m_{k+1}m_{k+2}\ldots m_n$;

– быстрое увеличение объема коррекционных таблиц с увеличением кратности ошибки (!!! критический недостаток).

МЕТОД МОДУЛЯРНЫХ ПРОЕКЦИЙ

Классический метод проекций

Достоинства:

– высокая скорость обнаружения, локализации и исправления ошибок;

– менее жесткие по сравнению с синдромным декодированием ограничения на выбор избыточных оснований: $m_{k+1}m_{k+2}\ldots m_n > m_i$, $\forall i \le k$;

Недостатки:

– быстрое увеличение количества проекций с увеличением кратности ошибки (!!! критический недостаток);

– увеличение объема предвычисленных констант с увеличением количества проекций.

МЕТОД МОДУЛЯРНЫХ ПРОЕКЦИЙ

Метод проекций с максимальным правдоподобием

Достоинства:

– высокая скорость обнаружения, локализации и исправления ошибок;

– менее жесткие по сравнению с синдромным декодированием ограничения на выбор избыточных оснований: $m_{k+1}m_{k+2}\ldots m_n > m_i$, $\square\, i \le k$;

– уменьшение количества проекций по сравнению с классическим методом проекций.

Недостатки:

– необходимость дополнительного шага расчета расстояний Хэмминга между ошибочным числом и каждой из проекций;

– увеличение объема предвычисленных констант с увеличением количества проекций.

МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ, ЛОКАЛИЗАЦИИ И ИСПРАВЛЕНИЯ ОШИБОК НА ОСНОВЕ ИЗБЫТОЧНОЙ СОК В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМАХ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

Метод проекций (k,n): C_n^t	**Метод проекций с максимальным правдоподобием** (k,n): $\lfloor n/k \rfloor^*$
(2,6)-избыточная СОК (2, 3, 5, 7, 11, 13); Максимальная кратность исправляемой ошибки: $t = ⌊(n-k)/2⌋ = 2$.	
(–, –, 5, 7, 11, 13), (–, 3, –, 7, 11, 13), (–, 3, 5, –, 11, 13), (–, 3, 5, 7, –, 13), (–, 3, 5, 7, 11, –), (2, –, –, 7, 11, 13), (2, –, 5, –, 11, 13), (2, –, 5, 7, –, 13), (2, –, 5, 7, 11, –), (2, 3, –, –, 11, 13), (2, 3, –, 7, –, 13), (2, 3, –, 7, 11, –), (2, 3, 5, –, –, 13), (2, 3, 5, –, 11, –), (2, 3, 5, 7, –, –).	(2, 3, –, –, –, –), (–,–, 5, 7, –, –), (–, –, –, –, 11, 13). + Расстояние Хэмминга
Количество проекций	
15	**3**

* Оценка справедлива для (2,6)-ИСОК, для других (k, n)-ИСОК может отличаться. Подробнее в работе: Goh, V.T. Multiple error detection and correction based on redundant residue number systems / V.T. Goh, M.U. Siddiqi // IEEE Transactions on Communications. – 2008. – Vol. 56. – No. 3. – P. 325-330.

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ, ОСНОВАННАЯ НА РЕПЛИКАЦИИ

Вероятность отказа* при запросе PFD равна:

$$\mathrm{PFD} = 1 - \left(\sum_{j=1}^{RF} \left(C_{RF}^{j} \cdot (1-\mathrm{AFR})^{j} \mathrm{AFR}^{RF-j} \cdot \sum_{i=\left\lfloor \frac{j}{2} \right\rfloor + 1}^{j} C_{j}^{i} (1-er)^{i} er^{j-i} \right) \right)^{CC},$$

где AFR** – вероятность выхода из строя одного жесткого диска в течение времени использования равного T_0,

$$\mathrm{AFR} = 1 - e^{-T_0/\mathrm{MTBF}},$$

где MTBF (Mean Time Between Failures) – это среднее время между отказами, RF – фактор репликации, CC (Chunks Count) – количество частей, получившееся после разрезания файла, er – вероятность искажения данных.

Избыточность данных: $\mathrm{Redundancy} = (RF - 1) \cdot 100\%$.

* Назаров А.С. Вероятностный подход к оценке отказоустойчивости различных моделей распределенного хранения данных / А.С. Назаров, М.А. Дерябин, М.Г. Бабенко [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 8(59). – С. 19:1-30.

** Szabados, D. Diving into “MTBF” and “AFR”: Storage Reliability Specs Explained [Электронный ресурс] / D. Szabados // Inside IT Storage. Seagate Enterprise – 2010. – Режим доступа: https://web.archive.org/web/20100501151901/http:/enterprise.media.seagate.com/2010/04/inside-it-storage/diving-into-mtbf-and-afr-storage-reliability-specs-explained/ – (Дата обращения: 15.06.2019).

РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ, ОСНОВАННАЯ НА ИЗБЫТОЧНОЙ СОК

Вероятность отказа* при запросе PFD** равна:

$$\mathrm{PFD} = 1 - \left(\sum_{j=k}^{n} \left(C_n^j \cdot (1-\mathrm{AFR})^j \mathrm{AFR}^{n-j} \cdot \sum_{i=j-\left\lfloor \frac{j-k}{2} \right\rfloor}^{j} C_j^i (1-er)^i er^{j-i} \right) \right)^{CC}.$$

где AFR – вероятность выхода из строя одного жесткого диска в течение времени использования равного T_0, n – общее количество подчастей, формируемое для каждой части, k – количество подчастей, достаточное для восстановления части, CC (Chunks Count) – количество частей, получившееся после разрезания файла, er – вероятность искажения данных.

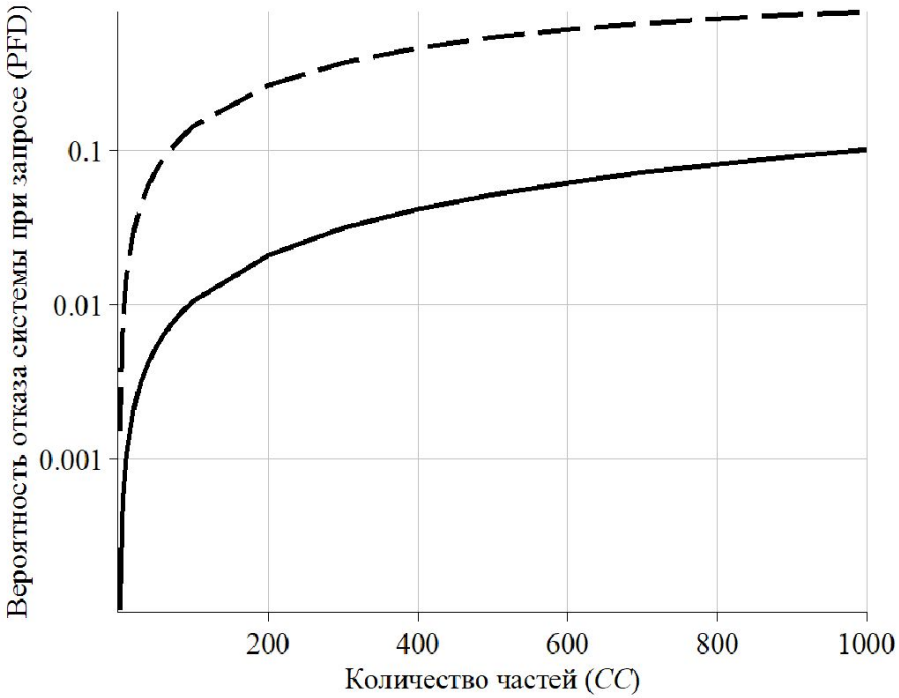
Избыточность данных: $\mathrm{Redundancy} \approx \left(\frac{n}{k} - 1 \right) \cdot 100\%.$

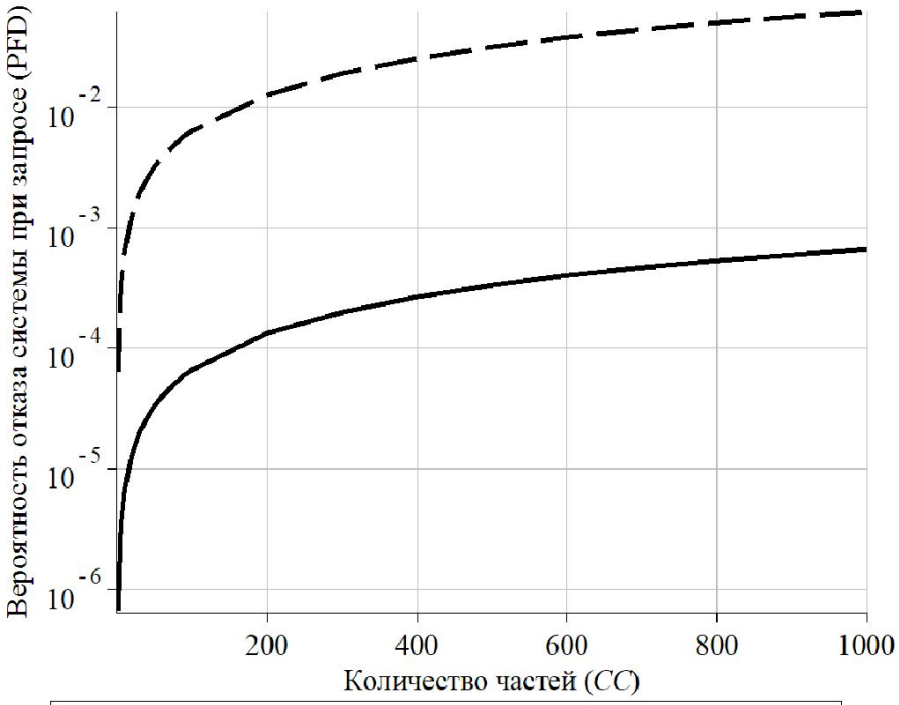
* Назаров А.С. Вероятностный подход к оценке отказоустойчивости различных моделей распределенного хранения данных / А.С. Назаров, М.А. Дерябин, М.Г. Бабенко [и др.] // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 8(59). – С. 19:1-30.

** Braband J. Probability of failure on demand - The why and the how. / J. Braband, R. VomHövel, H. Schäbe // Lecture Notes in Computer Science. Springer. – 2009. –. Vol. 5775. – P. 46–54.

СРАВНЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РЕПЛИКАЦИИ И ИЗБЫТОЧНОЙ СОК

Период непрерывного функционирования СХД: T_0 = 8766 ч. (1 год).
Вероятность искажения данных: er = 0.001
Использовались:
(2,6)-избыточная СОК (избыточность 200%) и
RF = 3 – резервирование (избыточность 200%)

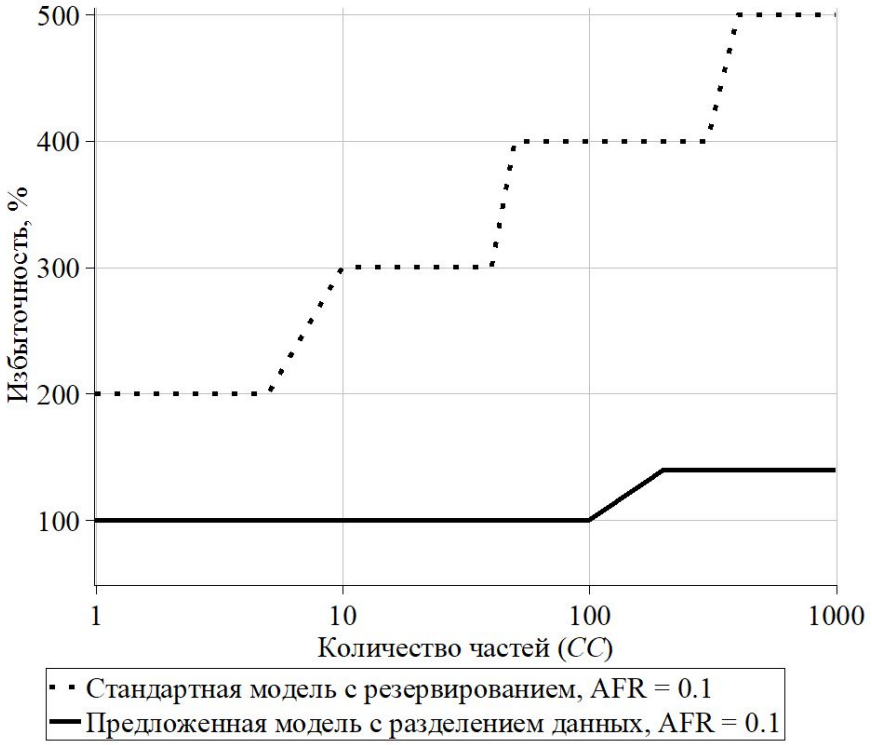


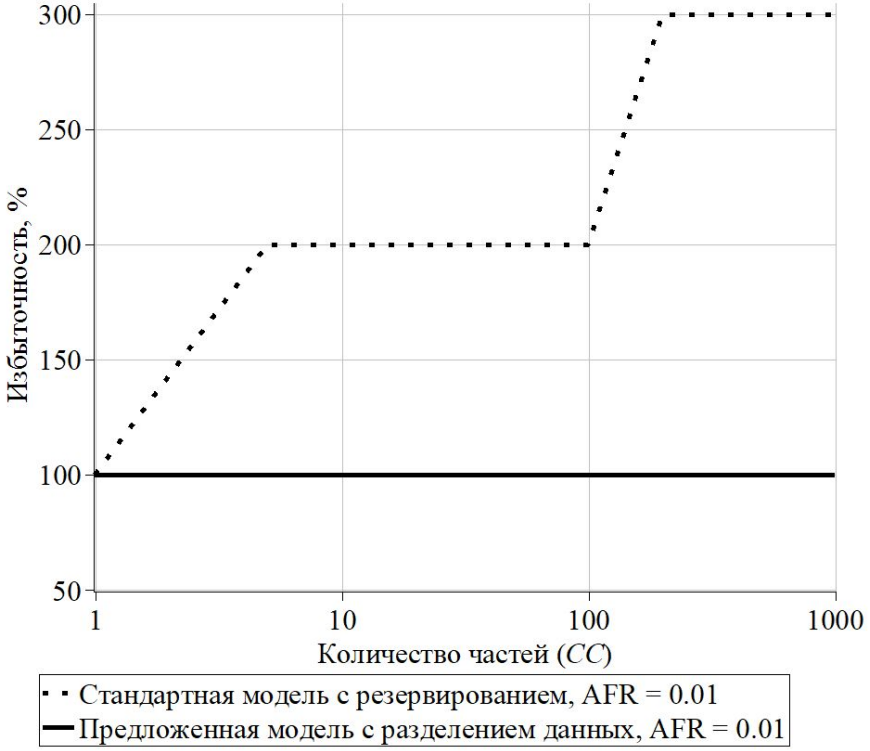


- - Стандартная модель распределенного хранения на основе тройного резервирования, AFR = 0.1
— Предложенная модель распределенного хранения на основе (2,6)-избыточной СОК, AFR = 0.1

- - Стандартная модель распределенного хранения на основе тройного резервирования, AFR = 0.01
— Предложенная модель распределенного хранения на основе (2,6)-избыточной СОК, AFR = 0.01

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ РЕПЛИКАЦИИ И ИЗБЫТОЧНОЙ СОК

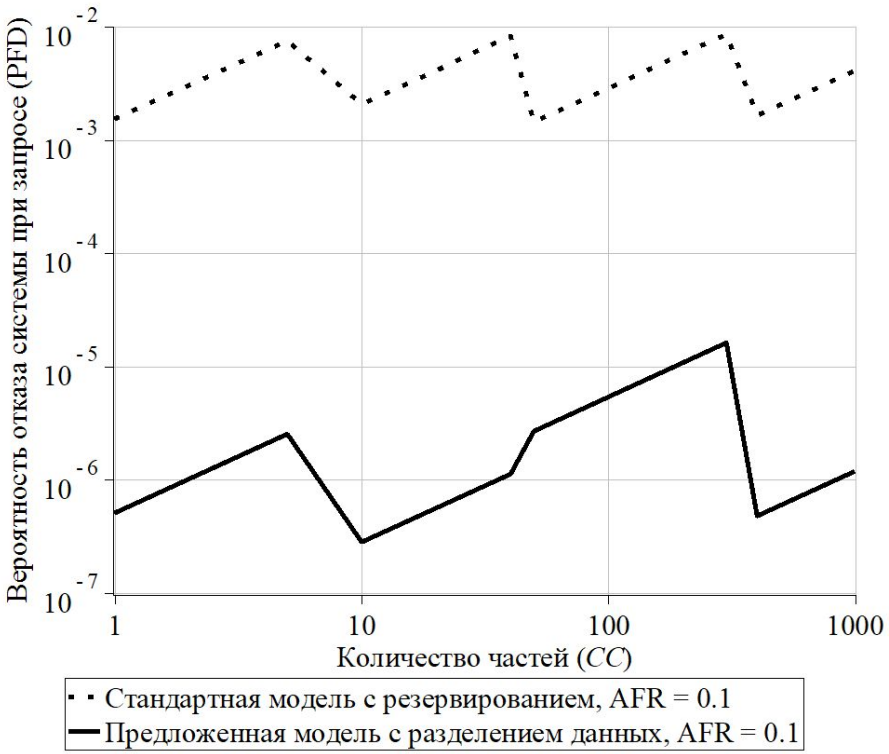


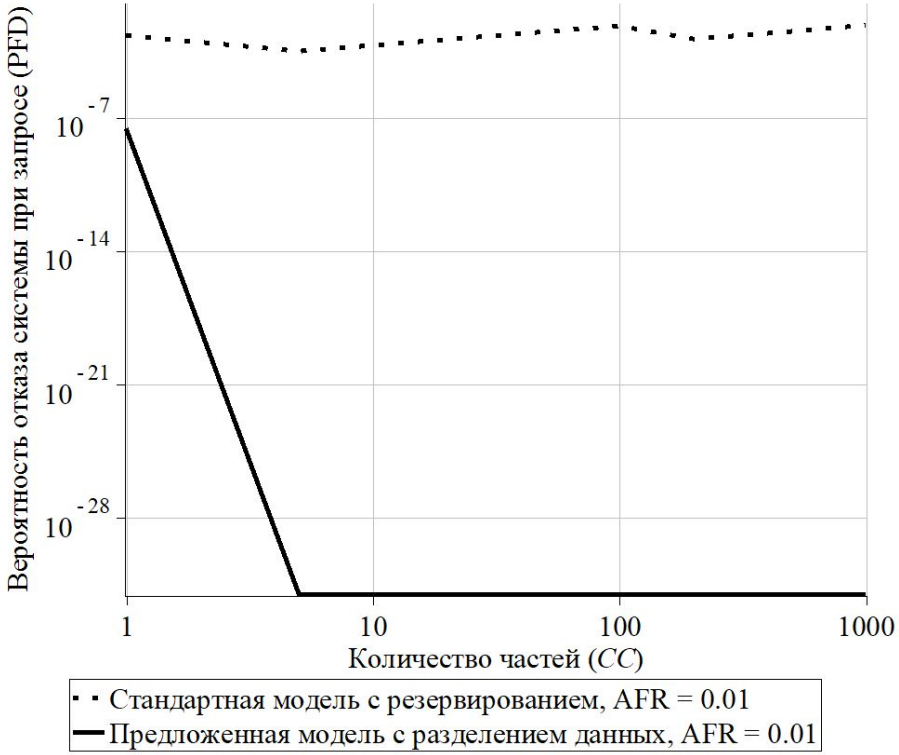


Условия: $PFD \leq 10^{-2}$

Преимущество ИСОК по сравнению с резервированием:
при AFR = 0.1 в среднем в 3.36 раза;
при AFR = 0.01 в среднем в 2.38 раза

СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ РЕПЛИКАЦИИ И ИЗБЫТОЧНОЙ СОК





Условия: PFD $\leq 10^{-2}$, избыточность ИСОК равна избыточности при резервировании

Преимущество ИСОК по сравнению с резервированием:

при AFR = 0.1 – в среднем на 3 порядка, с $3.6 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-6}$;

при AFR = 0.01 – PFD распределенной СХД на основе ИСОК стремится к нулю

Заключение

В настоящее время абсолютное большинство распределенных систем хранения данных (РСХД) используют репликацию для обеспечения отказоустойчивости, несмотря на высокий уровень избыточности хранения. Это связано с простотой реализации данного подхода.

Повышение отказоустойчивости и снижение эксплуатационных расходов является основной причиной, по которой пользователи РСХД заинтересованы в переходе к отказоустойчивому разделению данных. Наиболее существенные практические результаты в направлении замены репликации алгоритмами отказоустойчивого разделения данных достигнуты такими компаниями как Facebook* и Microsoft Azure**, что подчеркивает актуальность подобных исследований и их высокий научный и практический потенциал.

* Muralidhar, S. f4: Facebook's Warm BLOB Storage System / S. Muralidhar, W. Lloyd, S. Roy [et al.] // Operating Systems Design and Implementation (OSDI): Proceedings of the 11th USENIX Symposium. – Broomfield, Colorado, USA: ACM Press, 2014. – P. 383-398.

** Huang, C. Erasure coding in windows azure storage / C. Huang, H. Simitci, Y. Xu [et al.] // Annual Technical Conference: Proceedings of USENIX Conference. – Boston, Massachusetts, USA: USENIX Association, 2012. – P. 15-26.

Спасибо за Внимание!

Назаров Антон Сергеевич
к.т.н., м.н.с. УНЦ «Вычислительная математика и параллельное программирование на супер ЭВМ»
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
тел. +79187780891
e-mail: kapitoshking@mail.ru

Ставрополь - 2020