

УДК 681.3.06 (0.43)

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДА КАСКАДНОГО ФОРМИРОВАНИЯ МАС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ

*Ольга Король, Любомир Пархуць, Сергей Евсеев*

*Для построения МАС-кодов, удовлетворяющих коллизионным свойствам универсальных хеш-функций используются алгоритмы с модулярными преобразованиями, обеспечивающие доказуемо стойкое хеширование информации. Недостатками таких алгоритмов является высокая вычислительная сложность и низкая скорость формирования хеш-кодов, что существенно снижает область их применения. Обосновывается выбор цикловых функций в схеме доказуемо стойкого ключевого универсального хеширования, предлагается модель и метод формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных на основе модулярных преобразований, алгоритм снижения вычислительной сложности реализации схем хеширования с использованием цикловых функций. Разработанный метод каскадного формирования МАС обеспечивает требуемые показатели коллизионных свойств универсального хеширования, доказуемый уровень стойкости и высокие показатели быстродействия формирования хеш-кода.*

**Ключевые слова:** коды контроля целостности и аутентичности данных, модулярные преобразования, универсальные классы хеширующих функций.

### Вступление.

Проведенные исследования показали, что использование модулярных преобразований позволяет реализовать доказуемо стойкое хеширование информации, удовлетворяющее коллизионным свойствам универсальных хеш-функций. Доказуемо безопасный уровень стойкости обосновывается сведением задачи нахождения прообраза и/или задачи восстановления секретных ключевых данных к решению одной из известных теоретико-сложностных задач [1-3, 6].

В тоже время, как показали проведенные исследования [1-3, 6], универсальное хеширование с использованием модулярных преобразований обладает существенным недостатком – высокой вычислительной сложностью формирования хеш-кодов. Фактически, для каждого информационного блока необходимо выполнить операцию модульного возведения в степень, что при соответствующих порядках модуля преобразований существенно повышает время хеширования информационной последовательности. Перспективным направлением в этом смысле является разработка многослойных схем универсального хеширования с использованием модулярных преобразований на последнем, заключительном этапе формирования хеш-кода. Это, как показано ниже, с одной стороны, обеспечивает высокие коллизионные свойства результирующей схемы формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных, с другой стороны – обеспечивает высокие показатели быстродействия и доказуемый уровень безопасности используемых преобразований.

В статье предлагается модель и метод каскадного формирования кодов контроля целостности

и аутентичности данных (МАС) с использованием модулярных преобразований. В основе предлагаемой модели лежит многослойная схема универсального хеширования с использованием на последнем, завершающем этапе модулярных преобразований.

### Основная часть.

**Исследование свойств модулярных преобразований и методов хеширования информации на их основе.** Модулярные преобразования широко используются при построении криптографических алгоритмов преобразования информации, в том числе при построении асимметричных средств защиты информации и протоколов распространения ключевых данных [6-8], для формирования псевдослучайных последовательностей [6-8], методов хеширования и других механизмов защиты информации [6-8].

Проведенный анализ [6-9] показывает, что модулярные преобразования применяются на сегодняшний день при построении бесключевых хеш-функций. Так в четвертой части международного стандарта ISO/IEC 10118-4 определены две бесключевые функции хеширования MASH-1 и MASH-2, которые используют модулярную арифметику, а именно модульное возведение в степень для построения хеш-кода [9]. Само название функций MASH-1 и MASH-2 происходит от скрашенного Modular Arithmetic Secure Hash (безопасное хеширование на основе модулярной арифметики), подчеркивающего применение модулярных преобразований при формировании хеш-образа.

В основе построения хеш-функций MASH-1 и MASH-2 лежит использование итеративной цикловой функции, которая определяется через модулярное возведение в степень (в простейшем

случае через модулярное возведение в квадрат). В данном случае используются RSA-подобные модули  $N$ , длина которых обеспечивает необходимую стойкость. Число  $N$  должно быть трудно разложимым на множители, на чем и основывается стойкость алгоритма. Размер модуля  $N$  определяет длину блоков обрабатываемого сообщения, а также размер хеш-кода (например, 1025-битный модуль обеспечивает формирование 1024-битного хеш-кода).

В определенных международным стандартом ISO/IEC 10118-4 хеш-функциях MASH-1 и MASH-2 использованы следующие цикловые функции:

$$f(x_i, H_{i-1}) = (((x_i \oplus H_{i-1}) \vee A)^2 \bmod N) \perp n \oplus H_{i-1}, \quad (1)$$

и

$$f(x_i, H_{i-1}) = (((x_i \oplus H_{i-1}) \vee A)^{2^8+1} \bmod N) \perp n \oplus H_{i-1}, \quad (2)$$

соответственно, где:  $\vee$  – операция побитного логического ИЛИ;  $\oplus$  – суммирование по модулю 2 (XOR);  $\perp n$  – сохранение младших  $n$ -разрядов  $m$ -разрядного результата.

В таблице 1 приведены результаты сравнительного анализа показателей эффективности некоторых бесключевых функций хеширования, в том числе и хеш-функции на модулярной арифметике MASH-1 и MASH-2.

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа некоторых бесключевых функций хеширования

Хеш-функция	Длина хеш-кода	Применяемые преобразования	Скорость обработки данных	Модель безопасности (по NESSIE)
SHA-2	256, 384, 512	логические и арифметические	$10^8..10^9$ бит/с	Практическая секретность (Practical Security)
Whirlpool	512	В конечных полях Галуа	$10^7..10^8$ бит/с	Практическая секретность (Practical Security)
ГОСТ 34311-95	256	Блочное симметричное шифрование	$10^7..10^8$ бит/с	Практическая секретность (Practical Security)
RIPEMD-160	160	Логические и арифметические	$10^8..10^9$ бит/с	Практическая секретность (Practical Security)
MASH-1	*	Модулярное возведение в квадрат	$10^5..10^6$ бит/с	Доказуемая безопасность** (“Provable” Security)
MASH-2	*	Модулярное возведение в степень $2^8+1 = 257$	$10^4..10^5$ бит/с	Доказуемая безопасность** (“Provable” Security)

\* Определяется размерностью модуля преобразований

\*\* Если параметры модульного возведения в степень соответствуют ограничениям на RSA-подобные системы

В таблице 1 указаны длины соответствующих хеш-кодов, применяемые преобразования, оценки скорости обработки (хеширования) информации, а также обеспечиваемый уровень стойкости, соответствующий одной из моделей безопасности, введенных в проекте NESSIE [7].

Проведенный анализ показал, что основным недостатком функций хеширования MASH-1 и MASH-2 является низкая скорость формирования хеш-кода. Фактически она определяется скоростью RSA-подобного шифрования, которое на 2-3 порядка ниже скорости шифрования современными блочно-симметричными шифрами. Тем не менее, по причине наличия возможности использования существующих программных и аппаратных средств модулярной арифметики, применяемых в несимметричных RSA-подобных криптосистемах, а также по причине возможности обеспечения доказуемого уровня безопасности (по классификации моделей безопасности NESSIE) рассматриваемые бесключевые хеш-

функции MASH-1 и MASH-2 были стандартизированы [7, 9].

Следует, однако, отметить, что алгоритмы хеширования MASH-1 и MASH-2 не в полной мере соответствуют ограничениям на параметры модульного возведения в степень, которые установлены для RSA-систем (а соответственно и обеспечиваемой модели доказуемой безопасности). Действительно, по спецификации криптографической RSA-системы, обеспечивающей доказуемую безопасность (по модели безопасности NESSIE) значение модульной экспоненты  $e$  должно быть выбрано из условия

$$\text{gcd}(e, \varphi(N)) = 1, \quad (3)$$

где  $\text{gcd}(x, y)$  – наибольший общий делитель чисел  $x$  и  $y$ .

Т.е. значение экспоненты  $e$  не должно содержать общих делителей с числом (значением функции Эйлера)  $\varphi(N)$ :

$$\varphi(N) = (p - 1)(q - 1), N = pq.$$

По спецификации алгоритмов MASH-1 и MASH-2 это условие может не выполняться. Таким образом, модель доказуемой безопасности (по классификации моделей безопасности NESSIE) может быть применена к алгоритмам MASH-1 и MASH-2 только условно. Полного соответствия задачи нахождения прообраза или секретного ключа в схеме хеширования и теоретико-сложностной задачи факторизации (или задачи RSA) не наблюдается.

Рассмотрим цикловые функции MASH-1 и MASH-2 на предмет построения ключевых универсальных хеширующих функций. Рассмотрим вариант хеширования, когда начальное состояние

(вектор инициализации) задается некоторым ключевым правилом, т.е. выберем  $H_0 = \text{Key}$ . В этом случае имеем некоторый класс хеш-функций, зависящих от параметра Key.

Для проведения экспериментальных исследований выбраны следующие параметры:  $p=17$ ,  $q=19$ ,  $N=323$ . Исследования состояли в проверке условий универсального хеширования при полном переборе всех значений векторов инициализации ( $\text{Key} = 0, \dots, 2^m - 1$ ,  $m=8$ ) по выборке из генеральной совокупности значений информационных блоков. Полученные результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты исследований коллизионных свойств ключевого хеширования, построенных на основе алгоритмов MASH-1 и MASH-2 при смене значений вектора инициализации секретным ключом

	на основе алгоритма MASH-1	на основе алгоритма MASH-2
$\tilde{m}(n_1)$	41,42	0
$\tilde{D}(n_1)$	42,74	0
$P_{\partial} = P( \tilde{m}(n_1) - m(n_1)  < 5)$	0,98	$\approx 1$
$\tilde{m}(n_2)$	3,99	1
$\tilde{D}(n_2)$	0,01	0
$P_{\partial} = P( \tilde{m}(n_2) - m(n_2)  < 0,025)$	0,99	$\approx 1$
$\tilde{m}(n_3)$	0,26	0,31
$\tilde{D}(n_3)$	0,21	0,22
$P_{\partial} = P( \tilde{m}(n_3) - m(n_3)  < 0,1)$	0,97	0,97

Исследования проводились над выборкой, объема  $N=100$ , для формирования каждого элемента выборки рассчитывался максимум по множеству из  $M=100$  кортежей элементов. Таким образом, общий объем формируемых наборов составил  $NM=10^4$ . Для каждого проведенных  $N=100$  экспериментов оценивались математические ожидания  $m(n_1)$ ,  $m(n_2)$  и  $m(n_3)$ , дисперсии  $D(n_1)$ ,  $D(n_2)$  и  $D(n_3)$ , а также для фиксированной точности  $\varepsilon$  рассчитывались соответствующие доверительные вероятности  $P(|\tilde{m}(n_i) - m(n_i)| < \varepsilon)$ ,  $i=1, 2, 3$ . Подробно предложенная методика статистических исследований коллизионных свойств описана в [3].

Таким образом, проведенные исследования показали, что применение преобразований с использованием модулярной арифметики позволяет строить универсальные и строго универсальные классы хеширующих функций, которые с одной стороны позволяют обеспечить высокие

коллизионные свойства, с другой стороны, при выполнении определенных ограничений на значение модулярной экспоненты обеспечивают высокие показатели стойкости и применимость модели доказуемой стойкости.

Основными недостатками подобных конструкций являются:

- очень высокая сложность преобразований, которая обусловлена использованием в качестве цикловой функции модулярного возведения в степень. Фактически сложность применяемых преобразований выше сложности блочного симметричного шифрования на 2-3 порядка, что и обуславливает соответствующее повышение времени формирования кодов аутентификации сообщений (см. таблицу 1);

- формирование кодов аутентификации сообщений с использованием ключевого хеширования, построенного на основе алгоритма MASH-1 с изменяемыми векторами инициализации, не позволяет строить универсальные и

строго универсальные классы хеш-функций (см. таблицу 2). Это обусловлено использованием в качестве показателя степени цикловой функции значения  $e = 2$ , что при нечетных значениях простых чисел  $p$  и  $q$  всегда нарушает условие (3);

– формирование кодов аутентификации сообщений с использованием ключевого хеширования, построенного на основе алгоритма MASH-2 с изменяемыми векторами инициализации, в некоторых случаях (при выполнении условия (3)) позволяет строить универсальные и строго универсальные классы хеш-функций (см. таблицу 2). Однако не для всех значений начальных параметров (простых чисел  $p$  и  $q$ ) это условие выполнимо.

**Разработка метода ключевого универсального хеширования доказуемой стойкости на основе модулярных преобразований.**

В основе предлагаемого метода ключевого универсального хеширования доказуемой стойкости лежит использование модулярных преобразований, обеспечивающих сведение задачи

нахождения прообраза или секретного ключа в схеме хеширования к одной из известных теоретико-сложностных задач, например, к задаче факторизации, дискретного логарифмирования или задаче RSA.

Подобное обоснование стойкости по классификации моделей безопасности NESSIE принято считать доказуемой безопасностью, подчеркивая тем самым сводимость задачи криптоанализа к одной из хорошо известных вычислительно неразрешимых за заданное время теоретико-сложностных задач [6].

В табл. 3 приведены результаты исследований цикловых функций: в первой колонке указана теоретико-сложностная задача, положенная в основу ее построения, во второй колонке приведена аналитическая запись цикловой функции, в третьей колонке – оценка сложности вычисления значения цикловой функции, в четвертой – оценка вычислительной сложности ее инвертирования (оценка стойкости).

Таблица 3

Результаты исследований цикловых функций

Теоретико-сложностная задача	Кандидаты на построение цикловой функции схемы хеширования	Оценка сложности вычисления	Оценка сложности инвертирования
Проблема целочисленной факторизации	$f(x_i, H_{i-1}) = x_i H_{i-1}$ , функция определена над большими простыми числами $x_i = p$ и $H_{i-1} = q$	$O(n^2)$ , где $n = \lceil \log_2 p \rceil + \lceil \log_2 q \rceil$	$L_N(\alpha, \beta) = \exp((\beta + o(1))(\log N)^\alpha (\log \log N)^{1-\alpha})$ Для поля чисел общего вида сложность инвертирования составляет $L_N(\frac{1}{3}, \sqrt[3]{\frac{64}{9}})$ .
Проблема RSA	$f(x_i, H_{i-1}) = (x_i \oplus H_{i-1})^e \bmod(N)$ , $\gcd(e, \varphi(p, q)) = 1, N = pq$	$O(\log_2 e)$ умножений, алгоритм быстрого возведения в степень	Для поля чисел специального вида $N = a^b + c$ сложность инвертирования составляет $L_N(\frac{1}{3}, \sqrt[3]{\frac{32}{9}})$ .
Проблема дискретного логарифмирования	$f(x_i, H_{i-1}) = (\alpha^{x_i \oplus H_{i-1}}) \bmod(p)$ , $\alpha$ - генератор $Z_p$	$O(\log_2 n)$ умножений, алгоритм быстрого возведения в степень, $O(n^3)$ для $\alpha = 2$ , где $n = \lceil \log_2 p \rceil$	$\min\{\sqrt{p}, L_N(\alpha, \beta)\}$ , где $L_N(\alpha, \beta) = \exp((\beta + o(1))(\log N)^\alpha (\log \log N)^{1-\alpha})$ Для примитивного поля $GF(p)$ сложность инвертирования составляет $\min\left\{\sqrt{p}, L_N\left(\frac{1}{3}, \sqrt[3]{\frac{64}{9}}\right)\right\}$ .
Проблема Диффи-Хеллмана	$f(x_i, H_{i-1}) = (\alpha^{x_i \oplus H_{i-1}}) \bmod(p)$ , $\alpha$ - генератор $Z_p$	$O(n^3)$ для $\alpha = 2$ , где $n = \lceil \log_2 p \rceil$	Для расширенного поля $GF(2^m)$ сложность инвертирования составляет $L_N(\frac{1}{3}, 1,4)$ .

Проведенные исследования показывают, что наиболее целесообразным решением следует, очевидно, считать использование цикловой функции, задача нахождения обратного отобра-

жения которой сопряжена с решением теоретико-сложностной задачи извлечения квадратных корней по модулю  $n$ .

При определенных ограничениях на значения составного модуля  $n$  эта задача по вычислительной сложности инвертирования сопоставима с проблемами факторизации и дискретного логарифмирования. В тоже время прямое вычисление значения функции  $a \equiv (x^2) \pmod{n}$  требует значительно меньшего числа операций.

Следует, однако, отметить, что использование квадратичной цикловой функции не приводит к построению универсального хеширования. Следующей по вычислительной сложности идет цикловая функция

$$f(x_i, H_{i-1}) = (x_i \oplus H_{i-1})^e \pmod{N}, \quad (4)$$

задача нахождения обратного отображения которой сопряжена с решением теоретико-сложностной задачи RSA, где

$$\gcd(e, \varphi(p, q)) = 1, \quad N = pq,$$

$\gcd(x, y)$  – наибольший общий делитель чисел  $x$  и  $y$ .

Таким образом, применение цикловой функции (1) на основе модулярного возведение в степень позволяет строить доказуемо безопасное универсальное хеширование только при выполнении ограничений на значение модульной экспоненты и значения модуля преобразований.

Еще одним кандидатом на цикловую функцию в итеративной схеме хеширования является функция вида:

$$f(x_i, H_{i-1}) = (a^{x_i \oplus H_{i-1}}) \pmod{p}, \quad (5)$$

задача нахождения обратного отображения которой сопряжена с решением теоретико-сложностной задачи дискретного логарифмирования, где  $a$  – генератор мультипликативной группы  $Z_p$ , а  $p$  – большое простое целое число.

Использование такой цикловой функции обеспечивает построение доказуемо безопасного хеширования, коллизийные свойства которого удовлетворяют условиям универсальности.

Таким образом, проведенные исследования показали, что для построения универсального хеширования информации с доказуемым уровнем безопасности следует использовать цикловую функцию вида (4) или вида (5).

**Разработка алгоритмов итеративного ключевого хеширования доказуемой стойкости на основе использования модулярных преобразований.**

В основу алгоритмов итеративного ключевого хеширования доказуемой стойкости на основе использования модулярных преобразований положен алгоритм MASH-1, при условии смены векторов инициализации и использовании рассмотренных выше цикловых функций, удовлетворяющих определенным ограничениям на применяемые модулярные преобразования.

Схема итеративного ключевого хеширования с использованием цикловой функции (4), разработанная по аналогии с рассмотренной в разделе 2 схемой *NH* хеширования, представлена на рис. 1. Алгоритм вычисления значения хеш-кода на основе цикловой функции (4) отличается от алгоритма MASH-2, в основном, системными установками и определением констант.

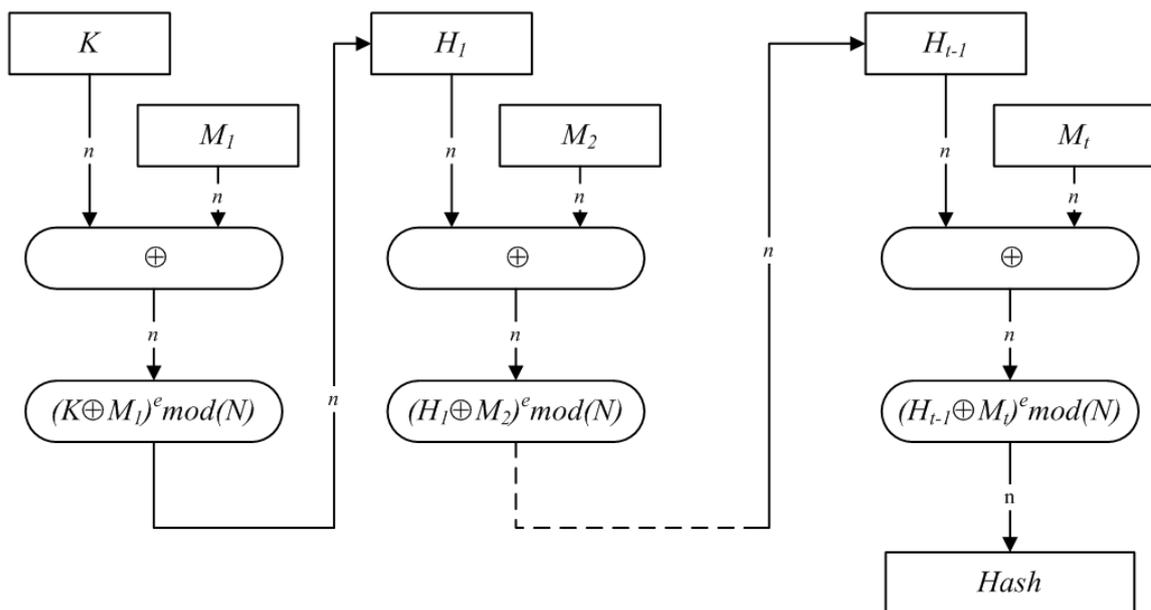


Рис. 1. Схема итеративного ключевого хеширования с использованием цикловой функции (4)

Используя цикловую функцию (5), задача нахождения обратного отображения которой базируется на решении теоретико-сложностной задачи дискретного логарифмирования, построим следующую схему хеширования (рис. 2).

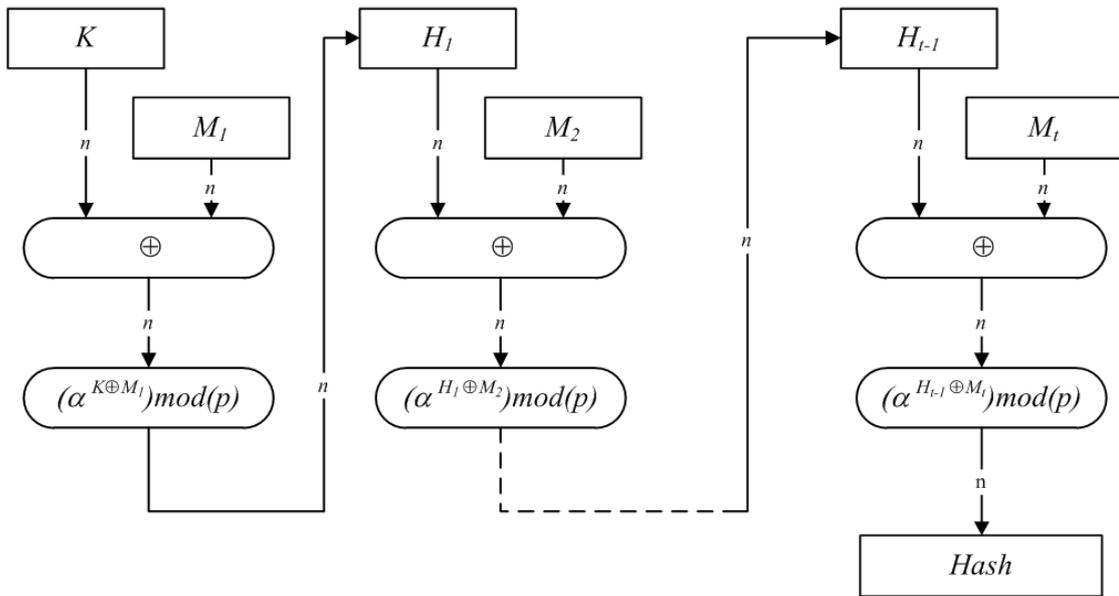


Рис. 2. Схема итеративного ключевого хеширования с использованием цикловой функции (5)

Разработанные вычислительные алгоритмы отличаются от алгоритмов бесключевого хеширования MASH-1 и MASH-2, в основном, системными установками и определением констант. Кроме того, предлагаемые схемы хеширования являются ключевыми, в качестве секретных ключевых данных используются сменные вектора инициализации  $H_0 = Key$ . На применяемые модулярные преобразования в цикловой функции ключевого хеширования накладываются рассмотренные выше ограничения.

Таким образом, предлагаемый метод универсального хеширования с использованием модулярных преобразований позволяет реализовать формирование аутентификаторов (хеш-кодов) с обеспечением требуемых показателей безопасности. Разработанные алгоритмы позволяют практически реализовать предлагаемые схемы хеширования, как в программном, так и в аппаратном виде.

**Разработка предложений по реализации итеративного ключевого хеширования доказуемой стойкости с использованием модулярных преобразований.**

В основе предлагаемого метода универсального хеширования лежит итеративная схема формирования хеш-кода с цикловой функцией, построенной с использованием модулярных преобразований. Для обеспечения высоких коллизионных свойств универсального хеширования предлагаемая цикловая функция должна быть реализована с использованием выражений (4)

или (5) с соответствующими ограничениями на модулярные преобразования.

Проведенный анализ показывает, что наиболее затратной с вычислительной точки зрения операцией при реализации цикловых функций (4) и (5) является операция модульного возведения в степень.

При непосредственном возведении в степень через цепочку операций умножений вычислительная сложность реализации таких цикловых функций растет пропорционально показателю степени, т.е. для возведения числа  $x$  в степень  $n$  в общем случае требуется выполнить  $n-1$  умножений:

$$x^n = \underbrace{x \cdot x \cdot x \cdot \dots \cdot x}_{n-1 \text{ умножений}}$$

Асимптотическая оценка вычислительной сложности такой реализации операции возведения в степень есть  $O(n)$  умножений.

Для снижения вычислительной сложности реализации схем хеширования с использованием цикловых функций (4) и (5) применен алгоритм быстрого возведения в степень, в основе которого лежит представление числа  $x^n$  в следующем виде:

$$x^n = x^{((\dots((m_k \cdot 2 + m_{k-1}) \cdot 2 + m_{k-2}) \cdot 2 + \dots) \cdot 2 + m_1) \cdot 2 + m_0} = \tag{6}$$

$$= (((\dots(((x^{m_k})^2 \cdot x^{m_{k-1}})^2 \dots)^2 \cdot x^{m_1})^2 \cdot x^{m_0},$$

где  $(m_k, m_{k-1}, \dots, m_0)$  – двоичное представление числа  $n$ , т.е.  $m_i \in \{0,1\}$  и

$$n = m_k \cdot 2^k + m_{k-1} \cdot 2^{k-1} + \dots + m_1 \cdot 2 + m_0. \quad (7)$$

Перегрупувавши множители в представлении числа  $x^n$  получим следующее выражение:

$$x^n = x^{m_0} \cdot (x^2)^{m_1} \cdot (x^{2^2})^{m_2} \cdot (x^{2^3})^{m_3} \dots (x^{2^k})^{m_k},$$

откуда следует, что для возведения числа  $x$  в степень  $n$  требуется реализовать не более  $k$  операций возведения в квадрат и не более  $k$  операций умножений, где  $k+1$  – число элементов в двоичной записи числа  $n$ , т.е.  $k = (\log_2 n) - 1$ . Таким образом, асимптотически вычислительную сло-

жность вычисления  $x^n$  можно оценить как  $O(\log_2 n)$ .

Приведенный алгоритм позволяет существенно ускорить процедуру вычисления цикловых функций (4) и (5), лежащих в основе предлагаемого метода универсального хеширования.

В таблице 3 приведены зависимости сложности реализации операции возведения в степень через цепочку умножений и через представление (6), (7) с указанием порядка модуля преобразования, минимально необходимого для обеспечения требуемого уровня безопасности.

Таблица 4

Оценки вычислительной сложности реализации операции возведения в степень различными методами

Метод возведения в степень	Порядок модуля преобразований / эквивалентная длина ключа симметричного криптоалгоритма		
	1024 / 80	3072 / 128	15360 / 256
Через цепочку произведений	$10^{308}$	$10^{924}$	$10^{4623}$
Быстрый алгоритм возведения в степень	2046	6142	30718

Данные во второй строке таблице 4 приведены из условия эквивалентности (по вычислительной сложности) операции возведения в квадрат и операции умножения.

Анализ данных таблицы 4 показывает, что реализация предложенного метода универсального хеширования через традиционный алгоритм возведения в степень вычислительно нецелесообразна. Число умножений, которое требуется выполнить для вычисления одного значения цикловой функции даже при минимальном уровне безопасности (мощность множества ключевых данных блочного симметричного шифра равна  $2^{80}$ ) превышает возможности самых современных вычислительных систем.

Последняя строка таблицы 4 является, фактически, оценкой вычислительной сложности предлагаемой схемы хеширования. Так, при минимальном уровне стойкости (мощность множества ключевых данных блочного симметричного шифра равна  $2^{80}$ ) для вычисления одного значения цикловой функции потребуется не более 2046 операций умножений. Для достаточного уровня стойкости (мощность множества ключевых данных БСШ равна  $2^{128}$ ), соответствующего национальному стандарту шифрования США FIPS-197 (AES), для вычисления значения цикловой функции потребуется выполнить не более 6142 операций умножения. Для высокого уровня стойкости (мощность множества ключевых

данных БСШ равна  $2^{256}$ ), соответствующего действующему отечественному стандарту симметричного криптопреобразования ГОСТ-28147-89, для вычисления значения цикловой функции потребуется выполнить не более 30718 операций умножения.

**Разработка модели каскадного формирования МАС с использованием модулярных преобразований и обоснование практических рекомендаций по ее использованию.**

В статье предлагается модель каскадного формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных (МАС) с использованием модулярных преобразований.

В основе предлагаемой модели лежит многослойная схема универсального хеширования с использованием на последнем, завершающем этапе модулярных преобразований.

Свойства многослойной (композиционной) конструкции лучше всего пояснить с помощью языка отображений [4, 5].

Пусть  $X, Y, U$  являются множествами из  $n, m, u$  элементов,  $n < m < u$ .  $H_1$  есть множество функций  $f_1$ , осуществляющих отображение  $X \rightarrow U$ , а  $H_2$  – множество функций  $f_2$  осуществляющих отображение  $U \rightarrow Y$ . Тогда  $H = H_2 \circ H_1$  есть множество функций  $f$ , являющееся композицией  $f = f_1 \circ f_2$ .

Характеристики многослойной конструкции представлены результатом следующей теоремы [1-3].

**Теорема 1.** Композиция из универсального класса хеш-функций  $\varepsilon_1 - U(N_1, n, u)$  и строго универсального класса хеш-функций  $\varepsilon_2 - SU(N_2, u, m)$  является строго универсальным классом с параметрами  $\varepsilon - SU(N_1 N_2, n, m)$ , где  $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2$ .

Таким образом, используя композицию алгоритмов формирования кодов аутентификации, эквивалентных алгоритмам вычисления универсальных и строго универсальных классов хеш-функций получим многослойную схему формирования MAC. Свойства, сформированного таким образом кода контроля целостности и аутентичности данных, будут удовлетворять свойствам строго универсального класса хеш-функций.

В предлагаемом методе формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных первые слои преобразования предлагается реализовать традиционными для алгоритма UMAC высокоскоростными, но криптографически слабыми схемами универсального хеширования, последний слой предлагается

реализовать с использованием разработанной безопасной (криптографически сильной) схемы строго универсального хеширования на основе модулярных преобразований.

Формально предлагаемая схема каскадного формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных представлена на рис. 3.

Основная часть информационных данных, обрабатывается первыми слоями универсального хеширования. Формируемый в результате такого преобразования хеш-код на последнем, заключительном этапе обрабатывается криптографически сильной функцией строго универсального хеширования на основе модулярных преобразований.

Таким образом, в основе предлагаемой схемы формирования MAC с использованием модулярных преобразований лежит использование:

- на первых слоях - высокоскоростных методов универсального хеширования (NH-хеширование, полиномиальное хеширование, хеширование Картера-Вергмана);
- на последнем слое - безопасного строго универсального хеширования на основе модулярных преобразований (с использованием цикловых функций (4) и/или (5)).



Рис. 3. Предлагаемая схема каскадного формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных с использованием модулярных преобразований

Предлагаемое решение позволяет обеспечить высокие коллизийные свойства формируемых кодов контроля целостности и аутентичности данных, сохранить свойства универсального хеширования и обеспечить высокие показатели стойкости на уровне современных средств криптографической защиты доказуемой стойкости. Применение многослойной конструкции позволяет также существенно снизить вычислительные затраты на формирования кодов контроля целостности и аутентичности больших массивов данных.

В таблице 5 приведено сравнение вычислительной сложности некоторых функций хеширования. Данные по быстродействию для предлагаемой схемы MAC с модулярными преобразованиями приведены для минимального уровня стойкости (мощность множества ключевых данных блочного симметричного шифра равна  $2^{80}$ ) и достаточного уровня стойкости (для модулярных преобразований эквивалентная длина ключа блочного симметричного шифра равна 128 битам). Длина формируемого при этом MAC равна 80 и 128 битам, соответственно.

Таблица 5

Оценка сложности формирования MAC различными схемами

Алгоритм	Длина входных данных, байт					
	2048	4096	8192	16384	32768	65536
НMAC-MD5 (128 бит)	9	9	9	9	9	9
НMAC-RIPE-MD (160 бит)	27	27	27	27	27	27
НMAC-SHA-1 (160 бит)	25	25	25	25	25	25
НMAC-SHA-2 (512бит)	84	84	84	84	84	84
СВС MAC-Rijndael (128 бит)	26	26	26	26	26	26
СВС MAC-DES (64 бита)	62	62	62	62	62	62
Предлагаемая схема MAC с модулярными преобразованиями (80 бит)	38	22	14	10	8	7
Предлагаемая схема MAC с модулярными преобразованиями (128 бит)	294	150	78	42	24	15

Для всех функций, приведенных в таблице 5 (кроме предложенных, с использованием модулярных преобразований) удельная сложность формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных не зависит от объема обрабатываемых данных.

Для предлагаемой модели с использованием модулярных преобразований удельная сложность с ростом длины обрабатываемых данных снижается. Так для высокого уровня стойкости (эквивалентная длина ключа блочного симметричного шифра равна 128 битам) уже для блоков данных из 32768 байт сопоставима с известными и применяемыми в протоколах сетевой безопасности алгоритмами формирования MAC.

Для минимального уровня стойкости (мощность множества ключевых данных блочного симметричного шифра равна  $2^{80}$ ) предлагаемая схема каскадного формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных с использованием модулярных преобразований уже для пакетов данных из 2048 байт практически не уступает по быстродействию применяемым на сегодняшний день алгоритмам формирования

MAC в протоколах сетевой безопасности, в том числе в протоколах IPsec.

#### Выводы.

Таким образом, полученные результаты исследований показывают, что разработанная схема формирования кодов контроля целостности и аутентичности данных с использованием модулярных преобразований позволяет обеспечить высокие коллизийные свойства безопасного хеширования.

Кроме того, за счет многослойной конструкции вычисления хеш-кода удается существенно сократить вычислительную сложность хеширования и повысить, таким образом, скорость обработки информационных сообщений.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Stinson D. R. Some constructions and bounds for authentication codes / D. R. Stinson // J. Cryptology. – 1988. – № 1. – P. 37–51.
- [2]. Stinson D. R. The combinatorics of authentication and secrecy codes / D. R. Stinson // J. Cryptology. – 1990. – № 2. – P. 23–49.
- [3]. Кузнецов А.А. Исследование коллизийных свойств кодов аутентификации сообщений UMAC // А.А. Кузнецов, О.Г. Король, С.П. Ев-

сеев. Прикладная радиоэлектроника. – Харьков : Изд-во ХНУРЭ, 2012. Том 11 № 2. – С. 171–183.

- [4]. Hoholdt T. An explicit construction of a sequence of codes attaining the Tsfasman-Vladut-Zink bound. The first steps, IEEE Trans. Info. Theory. – 1997. –135 p.
- [5]. Maitra S. Further constructions of resilient Boolean functions with very high nonlinearity / S. Maitra, E. Pasalic // Accepted in SETA. – May, 2001.
- [6]. Кузнецов О.О. Захист інформації в інформаційних системах / О.О. Кузнецов, С.П. Євсеев, О.Г. Король. – Х.: Вид. ХНЕУ, 2011. – 504 с.
- [7]. Final report of European project number IST-1999-12324, named New European Schemes for Signatures, Integrity, and Encryption, April 19, 2004 – Version 0.15 (beta), Springer-Verlag.
- [8]. В. Столлинс Криптография и защита сетей: принципы и практика, 2-е изд. : пер. с англ. – М.: издательский дом «Вильямс», 2001. – 672 с.
- [9]. Король О.Г. Исследование методов обеспечения аутентичности и целостности данных на основе односторонних хеш-функций// О.Г. Король, С.П. Евсеев. Научно-технический журнал «Захист інформації». Спецвыпуск (40). – 2008. – С. 50 – 55.

## REFERENCES

- [1]. Stinson D. R. Some constructions and bounds for authentication codes, D. R. Stinson, J. Cryptology., 1988., № 1., P. 37–51.
- [2]. Stinson D. R. The combinatorics of authentication and secrecy codes, D. R. Stinson, J. Cryptology., 1990., № 2., P. 23–49.
- [3]. Kuznetsov A., Korol O., Evseev S. (2012), «The study of collision properties of message authentication codes UMAC», «Applied electronics», Vol. 11, № 2., pp.171-183.
- [4]. Hoholdt T. An explicit construction of a sequence of codes attaining the Tsfasman-Vladut-Zink bound. The first steps, IEEE Trans. Info. Theory., 1997., 135 p.
- [5]. Maitra S. Further constructions of resilient Boolean functions with very high nonlinearity, S. Maitra, E. Pasalic, Accepted in SETA., May, 2001.
- [6]. Kuznetsov A., Korol O., Evseev S. (2011), «Information Security in Information Systems», publishing house KNEU, 504 p.
- [7]. Final report of European project number IST-1999-12324, named New European Schemes for Signatures, Integrity, and Encryption, April 19, 2004, Version 0.15 (beta), Springer-Verlag.
- [8]. В. Stallings (2001), «Cryptography and network security: Principles and Practice», publishing house «William2, 2001., 672 p.
- [9]. Korol O., Evseev S. (2008), «Investigation of methods to ensure the authenticity and integrity of data based on one-way hash functions», Naukovyitehnichny journal «Information Security2. Vol. (40), pp. 50 – 55.

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ І МЕТОДУ КАСКАДНОГО ФОРМУВАННЯ МАС З ВИКОРИСТАННЯМ МОДУЛЯРНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Для побудови МАС-кодів, що задовольняють колізійним властивостям універсальних хеш-функцій використовуються алгоритми з модулярними перетвореннями, що забезпечують доказовою стійке генування інформації. Недоліка ми таких алгоритмів є висока обчислювальна складність і низька швидкість формування хеш-кодів, що істотно знижує область їх застосування. Обґрунтовується вибір циклових функцій у схемі доказово стійкого ключового універсального генування, пропонується модель і метод формування кодів контролю цілісності та автентичності даних на основі модулярних перетворень, алгоритм зниження обчислювальної складності реалізації схем генування з використанням циклових функцій. Розроблений метод каскадного формування МАС забезпечує необхідні показники колізійних властивостей універсального генування, доказовий рівень стійкості і високі показники швидкодії формування хеш-коду.

**Ключові слова:** коди контролю цілісності та автентичності даних, модулярні перетворення, універсальні класи функцій генування

## DEVELOPMENT MODELS AND METHOD OF FORMING CASCADE MAC USING MODULAR TRANSFORMATION

To construct the MAC codes satisfying collision properties of universal hash functions are used algorithms with modular transformations that provide provably secure hashing information. The disadvantages of such algorithms is the high computational complexity and low rate of formation of the hashes, which significantly reduces the scope of their application. The choice of cycle functions in the scheme provably secure key universal hashing, a model and a method of forming code integrity and authenticity of data based on the modular transformation algorithm to reduce the computational complexity of the hashing scheme using cyclic functions. The developed method of cascade formation of MAC provides the required performance properties of universal hash collision, demonstrable resilience and high speed forming a hash code.

**Index Terms:** codes of integrity and authenticity of data, a modular transformation, generic classes are hashed functions

**Король Ольга Григорьевна**, преподаватель кафедры информационных систем, Харьковского национального экономического университета.

E-mail: korol\_o@mail.ru.

**Король Ольга Григорівна**, викладач кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету.

**Korol Olga**, lecturer, department of information systems, Kharkiv National University of Economics.

**Пархуць Любомир Теодорович**, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри захисту інформації Національного університету «Львівська політехніка».

E-mail: par7@i.ua.

**Пархуць Любомир Теодорович**, доктор технічних наук, доцент, професор кафедри захисту інформації Національного університету «Львівська політехніка».

**Parkhuts Lubomyr**, Doctor of Science (eng.), associate professor, department of information protection of National University «Lviv Polytechnic».

**Евсеев Сергей Петрович**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры информационных систем Харьковского национального экономического университета.

E-mail: evseev\_serg@inbox.ru.

**Євсєєв Сергій Петрович**, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету.

**Evseev Sergey**, Ph.D (eng.), senior scientist, associate Professor of Information Systems Kharkov National University of Economics.

УДК 621.391

## ТЕХНОЛОГИЯ РЕКОНСТРУКЦИИ КАДРОВ ВИДЕОИНФОРМАЦИОННОГО ПОТОКА В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ

*Владимир Баранник, Владимир Кривонос*

*Показано, что с интенсивным ростом и использованием современных информационных технологий, возникла необходимость в повышении эффективности существующих систем передачи и хранения видеоданных. Обоснована необходимость использования новых методов сжатия видеoinформации с предварительным трансформированием на основе ортогональных преобразований. Изложено обоснование, что обеспечение своевременного и достоверного получения информации возможно на базе разработки взаимно-однозначных процессов восстановления видеоданных. Разработана технология реконструкции компонент трансформант, базирующаяся на реконструкции низкочастотной компоненты трансформанты, вектора значимых компонент на основе получения позиционных чисел с неравными соседними элементами и вектора масштабирующих компонент на основе декодирования кодов Бодо. Излагаются последовательность, и основные этапы восстановления каждой составляющей векторного описания трансформанты. Показано, что предложенный метод реконструкции позволяет, восстановить трансформанты без внесения ошибок, обеспечив необходимую достоверность.*

**Ключевые слова:** реконструкция изображений, трансформанта, статистический код, значимые компоненты, масштабирующие компоненты.

**Введение.** В последнее десятилетие наблюдается бурное развитие видеoinформационных сервисов. Это способствует стремительному росту объемов информации. Существующие пропускные способности не удовлетворяют интенсивности видеoinформационных потоков. Результатом такого дисбаланса между темпами повышения пропускной способности и увеличением интенсивности видеотрафика являются значительные задержки в процессе обработки и передачи изображений. Решить сложившуюся проблему можно как путем внедрения новых телекоммуникационных технологий передачи данных, так и использованием технологий снижения интенсивности видеопотока. Первое направление является дорогостоящим и не всегда допускающим свою реализацию в конкретных прикладных случаях. Второе направление базируется на

использовании технологий компрессии изображений [1-4]. Однако базовые технологии сжатия видеоданных обеспечивают требуемые степени сжатия с заданным уровнем качества реконструкции только для слабонасыщенных изображений с низкой концентрацией мелких деталей и контуров. Наоборот, с ростом степени насыщенности изображений их эффективность резко снижается. Тогда приходится для обеспечения требуемой степени сжатия жертвовать качеством реконструкции. Умеренная стратегия относительно внесения искажений не минуемо приведет к снижению степени компрессии. Значит, нарушаются свойства видеoinформации по ее оперативности доставки и достоверности. В связи с чем, актуальной научно-прикладной задачей является снижение объемов видеоданных с заданным уровнем качества реконструкции.