

# Элементы криптографического анализа

Автор курса: Тимонина Елена Евгеньевна  
Составитель: Смирнов Дмитрий Константинович

Версия от 12:04, 15 июня 2022 г.

# Оглавление

<b>1</b>	<b>Домашние задания</b>	<b>1</b>
1.1	Определение шифра. Простейшие примеры. . . . .	2
1.2	Стойкость шифров. Метод полного перебора. . . . .	4
1.3	Аналитический метод криптоанализа. . . . .	8
1.4	Перекрытия гаммы. Криптоанализ при неравновероятной гамме. . . . .	12
1.5	Методы "встреча посередине" и "разделяй и властвуй". . .	14
<b>2</b>	<b>Контрольные работы</b>	<b>16</b>
2.1	Шифры перестановки. . . . .	17
2.2	Корреляционный анализ. . . . .	24
2.3	Дифференциальный криптоанализ. . . . .	29
2.4	Линейный криптоанализ . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Экзамен</b>	<b>37</b>

## Часть 1

# Домашние задания

## 1.1 Определение шифра. Простейшие примеры.

**Задача 1.1** Что такое подстановка?

**Решение.** Подстановка — это взаимно однозначная функция, которая переводит буквы алфавита в буквы того же самого алфавита.

**Задача 1.2** Что такое группа, и почему множество  $S_m$  из примера 2.1 образует группу?

**Решение.** Множество  $G \neq \emptyset$  с бинарной операцией " $\circ$ ", называется *группой*, если выполнены условия:

1.  $\forall a, b \in G \quad a \circ b \in G$ ;
2.  $\forall a, b, c \in G \quad a \circ (b \circ c) = (a \circ b) \circ c$ ;
3.  $\exists e \in G: \forall a \in G \quad e \circ a = a \circ e = a$ ;
4.  $\forall a \in G \quad \exists b \in G: a \circ b = b \circ a = e$

Множество  $S_m$  вводится как множество всех подстановок на конечном алфавите  $A = \{a_1, \dots, a_m\}$ . Проверим выполнение аксиом группы:

1. Подстановка  $k \in S_m$  — отображение  $k: A \rightarrow A$ .  $\forall k_1, k_2 \in S_m$  рассмотрим суперпозицию  $k_1 \circ k_2$ . Так как  $k_1 \circ k_2: A \rightarrow A \rightarrow A$ , то  $k_1 \circ k_2 \in S_m$  и первая аксиома верна.

2.  $\forall k_1, k_2, k_3 \in S_m \quad k_1 \circ (k_2 \circ k_3) = k_1 \circ k_2(k_3(a)) = k_1(k_2(k_3(a))) = k_1(k_2(a)) \circ k_3(a) = (k_1 \circ k_2) \circ k_3$ .

3. Поскольку  $S_m$  — множество всех подстановок, то найдётся тождественная подстановка:  $\exists e \in S_m: \forall a \in A \quad e(a) = a$ . Тогда  $\forall k \in S_m$  верно  $e \circ k = e(k(a)) = k(a) = k(e(a)) = k \circ e$ .

4. Так как подстановка — взаимно однозначная функция, то  $\forall k \in S_m$  существует обратная функция:  $\exists k^{-1}: A \rightarrow A \Rightarrow k^{-1} \in S_m$ , для которой будет выполнено равенство  $k \circ k^{-1} = k(k^{-1}(a)) = k^{-1}(k(a)) = k^{-1} \circ k$ . При этом,  $\forall a \in A \quad k^{-1}(k(a)) = a = e(a)$ .

Выполнены все аксиомы группы, следовательно  $S_m$  — группа.

**Задача 1.3** Почему группа  $S_n$  из примера 2.2 является симметрической?

**Решение.** Симметрической группой  $n$ -го порядка называется множество  $S(X)$  всех биективных отображений  $f: X \rightarrow X$ , где  $X$  — конечное множество из  $n$  элементов. Группа  $S_n$  в примере 2.2 определяется как группа подстановок на множестве  $X = \{1, \dots, n\}$ . Подстановка — это биективное отображение,  $X$  — конечное множество из  $n$  элементов. Следовательно, по определению, группа  $S_n$  является симметрической.

**Задача 1.4** Что такое кольцо? Что такое кольцо вычетов по модулю  $m$ ?

**Решение.** Множество  $K$  называется *кольцом*, если в  $K$  определены две операции "+" (сложение) и "·" (умножение) и выполняются следующие условия  $\forall a, b, c \in K$ :

1.  $a + b \in K, a \cdot b \in K$ ;
2.  $a + (b + c) = (a + b) + c, a(bc) = (ab)c$ ;
3.  $a + b = b + a$ ;
4.  $(a + b)c = ac + bc$ ;
5.  $\exists 0 \in K: a + 0 = a$ .

Кольцом вычетов по модулю  $m$  называется такое кольцо

$\mathbb{Z}_m = \{C_0, C_1, \dots, C_{m-1}\}$  ( $C_r$  – смежный класс вычетов по модулю  $m$ ), в котором операции сложения и умножения определяются следующими правилами:

1.  $C_a + C_b = C_r$ , где  $r \equiv (a + b) \pmod{m}$ ;
2.  $C_a C_b = C_r$ , где  $r \equiv ab \pmod{m}$

То есть,  $C_a + C_b$  – это класс, в который входит число  $a + b$ , а  $C_a C_b$  – класс, в который входит число  $ab$ .

**Задача 1.5** Какую алгебраическую структуру представляет собой кольцо  $\mathbb{Z}_m$  при  $m = 2$ ?

**Решение.**

**Теорема 1.1** Если  $p$  – простое число и  $p \geq 2$ , то  $\mathbb{Z}_p$  – поле характеристики  $p$ .

По приведённой выше теореме кольцо  $\mathbb{Z}_2$  является полем характеристики 2.

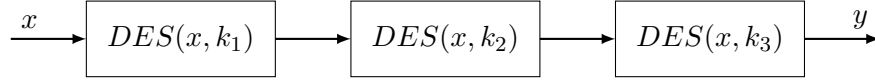
## 1.2 Стойкость шифров. Метод полного перебора.

**Задача 2.1** Дан алфавит  $A = \{1, 2, \dots, n\}$ ,  $x$  – открытый текст в алфавите  $A$ . Ключ шифрования  $(T_1, T_2, T_3)$ , где  $T_i$  – случайные подстановки. Алгоритм шифрования:  $T_3(T_2(T_1(x))) = y$ . Какова формула для расшифрования? Мощность пространства различных ключей? Сложность МПП?

**Решение.**

1. Формула для расшифрования –  $x = T_1^{-1}(T_2^{-1}(T_3^{-1}(y)))$ .
2. В каждой подстановке на первое место можно поставить  $n$  различных букв, на второе –  $n - 1$ , и т.д. В итоге получаем  $n!$  вариантов на каждую подстановку, следовательно,  $|K| = (n!)^3$  для трёх подстановок.
3. Пусть в тексте  $a$  букв. Тогда необходимо провести  $3a$  операций подстановки, чтобы проверить один ключ. В среднем нужно проверить количество ключей, равное средней трудоёмкости МПП:  $E\tau = \frac{|K|+1}{2} = \frac{(n!)^3+1}{2}$ . Следовательно, сложность МПП равна  $\frac{3}{2}a[(n!)^3 + 1]$ .

**Задача 2.2** Найти минимальную среднюю трудоёмкость в следующей схеме шифрования:



**Решение.**

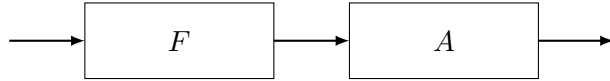
В предложенной схеме используется три блока DES с разными ключами. Для одного блока DES  $|K| = 2^{56}$ , тогда для всей схемы:  $|K| = (2^{56})^3 = 2^{168}$ . Окончательно,  $E\tau = \frac{|K|+1}{2} = \frac{2^{168}+1}{2} \approx 2^{167}$ .

**Задача 2.3** В сообщении каждая буква записывается два раза. Для шифрования используется шифр перестановки длины  $2n$ . Сложность МПП?

**Решение.**

В данной схеме используется две подстановки, причём для каждой нечётной буквы применяется первая подстановка, а для каждой чётной – вторая:  $T(x) = T(x_1, x_2, \dots, x_{2l-1}, x_{2l}) = (T_1(x_1), T_2(x_2), \dots, T_1(x_{2l-1}), T_2(x_{2l}))$ , где  $l$  – половина длины сообщения. Тогда длина ключа для каждой из подстановок будет равна  $n$ , а мощность пространства различных ключей для всей системы будет равна  $|K| = (n!)^2$ .

Для проверки одного ключа  $(T_1, T_2)$  требуется  $2l$  операций подстановки. Тогда сложность МПП равна  $2lE\tau = 2l \frac{|K|+1}{2} = l[(2n)! + 1]$ .

**Задача 2.4**

В данной схеме байт ОТ  $x = x_1x_2\dots x_8$  шифруется с помощью функции  $F$  следующим образом:

$$x'_1 = x_1;$$

$$x'_2 = x_2 + f_1(x_1);$$

...

$$x'_8 = x_8 + f_8(x_1, x_2, \dots, x_7),$$

где  $f_1, \dots, f_7$  – случайные булевы функции,  $A$  – невырожденная матрица. Ключом являются  $F$  и  $A$ . Оценить сложность нахождения ключа с помощью МПП.

**Решение.**

Определим мощность пространства ключей для  $F$ . Так как количество функций, зависящих от  $n$  переменных, равно  $2^{2^n}$ , то

$$|K_F| = \prod_{i=1}^7 2^{2^i} = 2^{\sum_{i=1}^7 2^i} = 2^{\frac{2(2^7-1)}{2-1}} = 2^{2^8-2} = 2^{254}.$$

Теперь рассмотрим матрицу  $A$ . Оценим мощность пространства ключей индуктивно по строкам. Для первой строки подходит  $2^n - 1$  вариантов (все, кроме нулевой строки). Для следующей строки не подойдёт предыдущий вариант заполнения (иначе будет линейная зависимость, следовательно, вырожденность матрицы) и нулевое заполнение, то есть,  $2^n - 2$  вариантов. Теперь, для третьей строки нужно не допустить линейной комбинации первых двух:  $\alpha a_1 + \beta a_2 \neq a_3$ . Вариантов выбрать коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  –  $2^2$  (при этом, тут уже считается и нулевой случай). Далее, для четвёртой строки, аналогично,  $2^3$ . Таким образом, получаем формулу:

$$|K| = \prod_{i=0}^{n-1} 2^n - 2^i$$

На матрицу  $A$  мы умножаем вектор длины 8 и на выходе тоже получаем вектор длины 8. Следовательно,  $n = 8$ ,  $|K_A| \approx 2^{62.21}$ . Таким образом,

$$|K| = |K_F| \cdot |K_A| \approx 2^{254} \cdot 2^{62.21} = 2^{316.21}$$

Если бы нам были известны функции  $f_1, \dots, f_7$ , то можно было бы рассчитать количество операций на каждый ключ точно. Но нам они

неизвестны, поэтому примем за общее число операций для проверки одного ключа за  $p$ . Тогда сложность МПП равна  $\frac{|K|+1}{2}p \approx 2^{315.21}p$ .

### Комментарий к задачам о многочлене Жегалкина.

В полином Жегалкина степени не выше  $m$  от функции  $n$  переменных входит  $C_n^k$  различных мономов степени  $k$ . При этом перед каждым из них стоит коэффициент, следовательно,  $2^{C_n^k}$  – количество различных вариантов выбрать 0 или 1 перед мономами.

Если полином степени ровно  $m$ , то хотя бы при одном мономе этой степени стоит коэффициент 1. Это означает, что число различных вариантов выбрать 0 или 1 перед мономами степени  $m$  в таком полиноме равно  $2^{C_n^m-1}$ .

Используя полином Жегалкина степени не выше  $m$ , будем считать, что  $n = m$ .

**Задача 2.5** Ключ шифрования  $k$  – многочлен Жегалкина степени 2. Мощность пространства различных ключей? Сложность МПП?

**Решение.**

$$|K| = 2^{C_n^0 + C_n^1 + C_n^2 - 1} = 2^{n + \frac{(n-1)n}{2}} = 2^{\frac{n^2+n}{2}}.$$

$$\text{Количество операций } p = C_n^1(1+1) + C_n^2(1+2) = 2n + 3\frac{(n-1)n}{2} = \frac{3}{2}n^2 + \frac{1}{2}n$$

$$\text{Сложность: } pE\tau = (\frac{3}{2}n^2 + \frac{1}{2}n) \frac{2^{\frac{n^2+n}{2}} + 1}{2} \approx (3n^2 + n) 2^{\frac{n^2+n-4}{2}}$$

$$\text{С учётом последнего комментария получим } |K| = 8, pE\tau = 31.5.$$

**Задача 2.6** Ключ шифрования  $k$  – многочлен Жегалкина степени не выше  $m$ . Мощность пространства различных ключей? Сложность МПП?

**Решение.**

$$|K| = 2^{\sum_{i=0}^m C_n^i}.$$

$$\text{Количество операций } p = \sum_{i=1}^m C_n^i (i+1)$$

$$\text{Сложность: } pE\tau = [\sum_{i=1}^m C_n^i (i+1)] \frac{2^{\sum_{i=0}^m C_n^i + 1}}{2} \approx [\sum_{i=1}^m C_n^i (i+1)] 2^{\sum_{i=1}^m C_n^i}$$

**Задача 2.7** Ключ шифрования  $k$  – многочлен вида:

$$\sum_{1 \leq i < j \leq n} a_{ij} x_i x_j, a_{ij} \in \{0, 1\}.$$

Мощность пространства различных ключей? Сложность МПП?

**Решение.**

Множество  $a_{ij}$  образует верхнетреугольную матрицу без главной диагонали. Следовательно,  $|K| = 2^{(n-1)+(n-2)+\dots+1+0} = 2^{\frac{(n-1)n}{2}}.$

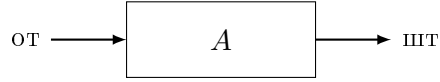


Количество операций  $p = \frac{(n-1)n}{2}(1+2) - 1 = \frac{3}{2}n^2 - \frac{3}{2}n - 1$

Сложность:  $pE\tau = (\frac{3}{2}n^2 - \frac{3}{2}n - 1)^{\frac{2\frac{(n-1)n}{2}+1}{2}} \approx (3n^2 - 3n - 2)2^{\frac{n^2-n-4}{2}}$

### 1.3 Аналитический метод криптоанализа.

**Задача 3.1** Найти минимальную сложность нахождения ключа в схеме



Ключом является невырожденная двоичная матрица  $A$  размером  $n \cdot n$ . Сравнить со сложностью МПП.

**Решение.**

При решении СЛАУ методом Гаусса сложность оценивается в  $\frac{n^3}{3}$  операций. Количество операций, необходимое для проверки одного ключа, равно  $p = (n + (n - 1)) \cdot n = 2n^2 - n$  – такое количество операций сложения и умножения нужно проделать для умножения вектора на квадратную матрицу. Было установлено, что:

$$|K| = \prod_{i=0}^{n-1} 2^n - 2^i = (2^n)^n + \dots = O(2^{n^2})$$

Следовательно, сложность МПП:

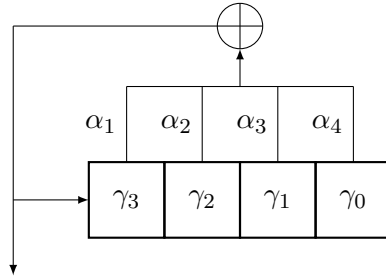
$$E\tau = p \frac{|K| + 1}{2} = (2n^2 - n) \frac{2^{n^2} + \dots}{2} = O(n^2 \cdot 2^{n^2})$$

Пусть  $n = 10$ , тогда для МПП потребуется порядка  $10^2 \cdot 2^{10^2} \approx 10^{32.10}$  операций, тогда как для аналитического метода получится  $\frac{10^3}{3} \approx 3 \cdot 10^2$  операций.

**Задача 3.2** Для ЛРП, задаваемой с помощью характеристического многочлена

$F(x) = x^4 \oplus x^2 \oplus x \oplus 1$ , построить ЛРС, определить матрицу  $A$ , и для выходной (после 4-х тактов работы ЛРС) последовательности  $\gamma = (1, 0, 1, 0)$  найти начальное заполнение регистра.

**Решение.**



Из характеристической функции следует, что  $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = 0, \alpha_4 = 1$ .

Тогда  $\gamma_4 = 1 \cdot \gamma_0 + 0 \cdot \gamma_1 + 1 \cdot \gamma_2 + 1 \cdot \gamma_3$ . Значит, матрица  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$ .

Решим следующее уравнение:  $A^4 \gamma^T(0) = \gamma^T$ .

$$A^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 3 & 3 \\ 3 & 2 & 4 & 6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\left[ \begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \sim \left[ \begin{array}{cccc|c} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \sim \left[ \begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right]$$

Следовательно,  $\gamma(0) = (0, 0, 0, 1)$ .

**Задача 3.3** Объяснить равенства (4.11) и (4.12).

**Решение.**

Пусть  $f$  имеет следующую структуру:

$$f(\gamma_n, \gamma_{n+1}, \dots, \gamma_{n+r-1}) = \gamma_n \oplus g(\gamma_{n+1}, \gamma_{n+1}, \dots, \gamma_{n+r-1}).$$

Тогда:

$$f(0, x_2, \dots, x_r) \oplus f(1, x_2, \dots, x_r) = 0 \oplus g(x_2, \dots, x_r) \oplus 1 \oplus g(x_2, \dots, x_r) = 1$$

Следовательно,  $f(0, x_2, \dots, x_r) = 1 \oplus f(1, x_2, \dots, x_r)$ .

Равенство  $f(x_1, x_2, \dots, x_r) = x_1 f(1, x_2, \dots, x_r) \oplus (1 \oplus x_1) f(0, x_2, \dots, x_r)$  проверяется непосредственной подстановкой  $x_1$ . В самом деле, при  $x_1 = 0$  первое слагаемое обращается в ноль, и имеем  $f(0, x_2, \dots, x_r) = f(0, x_2, \dots, x_r)$ . А при  $x_1 = 1$  – второе:  $f(1, x_2, \dots, x_r) = f(1, x_2, \dots, x_r)$

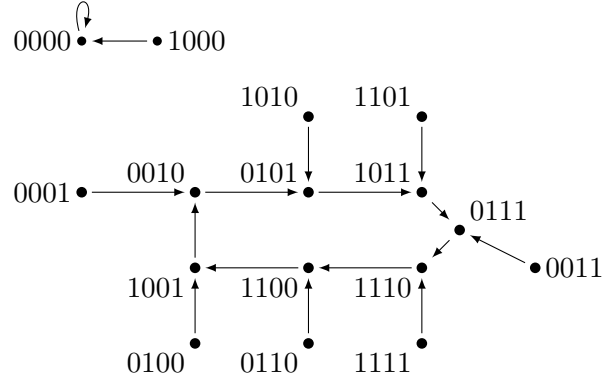
**Задача 3.4** Построить графы отображений для РС, обратные связи которых задаются функциями от 4 переменных:

$$f_1 = x_2 \oplus x_3, f_2 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3, f_3 = x_3 \oplus x_2 * x_4, f_4 = x_1 \oplus x_3 * x_4, f_5 = x_1 * x_3 \oplus x_2 * x_4.$$

Прокомментировать результаты.

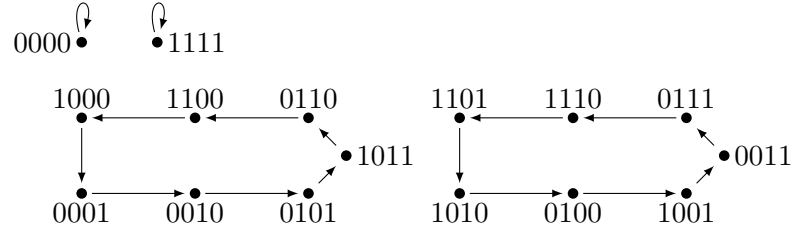
**Решение.**

$$\text{ЛРС } F_1 : (x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow (x_2, x_3, x_4, x_2 \oplus x_3)$$



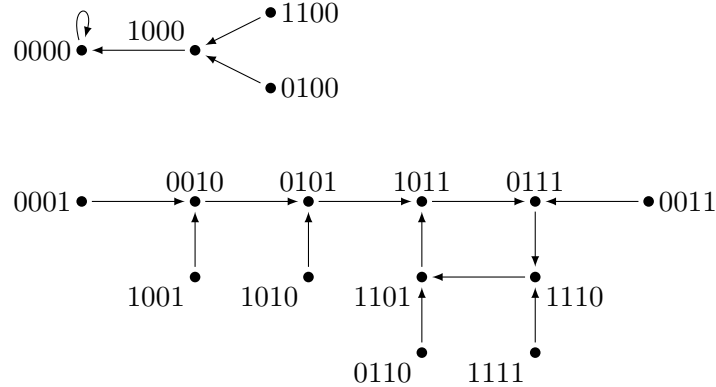
Данный граф имеет структуру "циклы с подходами". Длины циклов: 1, 7. Это отображение не является взаимно однозначным.

$$\text{ЛРС } F_2 : (x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow (x_2, x_3, x_4, x_1 \oplus x_2 \oplus x_3)$$



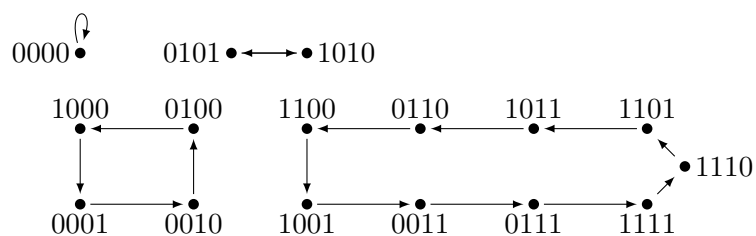
У этого графа полностью цикловая структура. Длины циклов: 1, 1, 7 и 7. Это отображение является взаимно однозначным.

$$\text{ЛРС } F_3 : (x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow (x_2, x_3, x_4, x_3 \oplus x_2 * x_4)$$



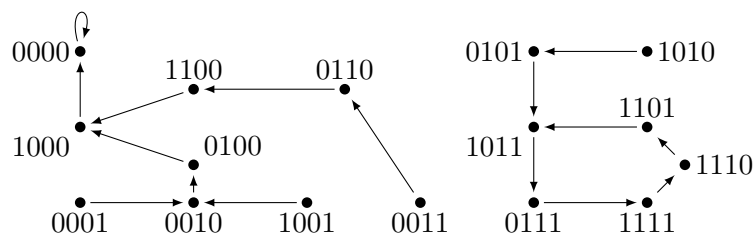
Данный граф имеет структуру "циклы с подходами". Длины циклов: 1, 4. Это отображение не является взаимно однозначным.

$$\text{ЛРС } F_4 : (x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow (x_2, x_3, x_4, x_1 \oplus x_3 * x_4)$$



Граф имеет полностью цикловую структуру. Длины циклов: 1, 2, 4 и 9. Это отображение является взаимно однозначным.

$$\text{ЛРС } F_5 : (x_1, x_2, x_3, x_4) \rightarrow (x_2, x_3, x_4, x_1 * x_3 \oplus x_2 * x_4)$$



Данный граф имеет структуру "циклы с подходами". Длины циклов: 1, 5. Это отображение не является взаимно однозначным.

## 1.4 Перекрытия гаммы. Криптоанализ при неравновероятной гамме.

**Задача 4.1** Два текста  $x$  и  $x'$  на русском языке зашифрованы шифром гаммирования по  $\text{mod } 30$  с помощью одной и той же гаммы  $\gamma$ . Использована следующая таблица соответствия букв числами (здесь – означает пробел):

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	П
00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Ы	Э	Ю	Я	–
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29

Получено два шифротекста  $y = \text{КЛОВБЛЖЗФ}$  и  $y' = \text{ВУПЗЕРСВЖ}$ , известна тематика  $x$  и  $x'$ : 'времена года'. Применяя 'протяжку вероятного слова' найти  $x, x', \gamma$ .

**Решение.**

Переведём векторы  $y$  и  $y'$  в числа и найдём их разность:  
 $y - y' = x + \gamma - x' - \gamma = x - x' = (9 - 2, 10 - 18, 13 - 14, 2 - 7, 1 - 5, 10 - 15, 6 - 16, 7 - 2, 19 - 6) = (7, 22, 29, 25, 26, 25, 20, 5, 13) = \text{ЗЧ-ЫЭЫЧЕО}.$

Попробуем подставить в начало  $x'$  слово 'ЗИМА-':

$$x = (x - x') + x' = \text{АСНЕГ}****$$

Видно, что получается осмысленное предложение. Посмотрим, какая гамма:

$$\gamma = y' - x' = \text{ВВВВВ}****$$

Предположим, что гамма состоит только из этих букв, продлим и получим окончательный ответ:

$$x = \text{ЗИМА} - \text{ИДЕТ}$$

$$x' = \text{АСНЕГОПАД}$$

$$\gamma = \text{ВВВВВВВВВВ}$$

**Задача 4.2** Пусть в шифре гаммирования по  $\text{mod } 30$  используется только 6 знаков гаммы  $\{17, 05, 02, 15, 08, 14\}$  (соответствие букв и чисел в таблице):

А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	К	Л	М	Н	О	П
00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
Р	С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Ы	Ъ	Э	Ю	Я
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29

Получен шифртекст  $y = \text{ШАССЧАТАИЦОС}$ . Используя "зигзагообразное" чтение дешифровать открытый текст и восстановить гамму.

**Решение.**

Составим таблицу из возможных результатов гаммирования:

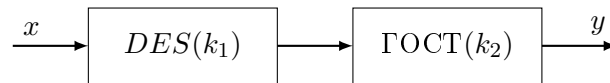
17	Ж	О	Я	Я	Е	<b>О</b>	А	О	Ц	Д	Ъ	<b>Я</b>
05	У	Ы	М	М	<b>Т</b>	Ы	Н	Ы	Г	С	<b>И</b>	М
02	Ц	Ю	П	<b>П</b>	Х	Ю	Р	Ю	Ж	<b>Ф</b>	М	П
15	И	<b>Р</b>	Б	Б	З	Р	В	<b>Р</b>	Ш	Ж	Ю	Б
08	Р	Ч	<b>И</b>	И	П	Ч	К	Ч	<b>А</b>	О	Е	И
14	<b>К</b>	С	В	В	И	С	<b>Г</b>	С	Щ	З	Я	В

Легко видеть,  $x = \text{КРИПТОГРАФИЯ}$ ,  $\gamma = \text{ПРИВЕТПРИВЕТ}$ .

## 14 1.5 Методы "встреча посередине" и "разделяй и властвуй".

### 1.5 Методы "встреча посередине" и "разделяй и властвуй".

**Задача 5.1** Найти минимальную среднюю трудоёмкость нахождения ключа в следующей схеме шифрования, длина ключа ГОСТ = 256 бит. Сравнить с МПП.



**Решение.**

Средняя трудоёмкость метода "встречи посередине":

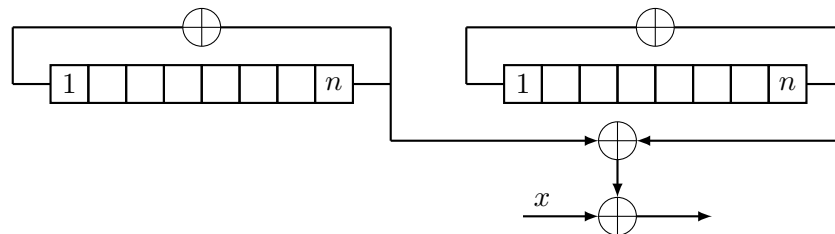
$$(|K_1| + |K_2|)(1 + \ln(|K_1| + |K_2|)) = (2^{56} + 2^{256})(1 + \ln(2^{56} + 2^{256})) \approx 10^{79.47}$$

Средняя трудоёмкость полного перебора:  $\frac{|K_1||K_2|}{2} = \frac{2^{56} \cdot 2^{256}}{2} = 2^{311} \approx 10^{93.62}$

Метод "встречи посередине" оказывается на 14 порядков эффективнее МПП.

Если предположить, что у нас имеется эффективный критерий, отбраковывающий ключи из  $K_1$ , то можно воспользоваться методом "разделяй и властвуй", средняя трудоёмкость которого равна  $\frac{|K_1| + |K_1|}{2} = 2^{55} + 2^{255} \approx 10^{76.76}$ . Этот метод ещё эффективнее в 1000 раз.

**Задача 5.2** Ключом являются начальные заполнения ЛРС в алгоритме получения  $\gamma$  для шифра гаммирования. Предполагается, что имеется необходимое количество пар  $(x, y)$ . Оценить сложность нахождения ключа с помощью метода "встречи посередине" и сравнить с МПП.



**Решение.**

Для каждого ЛРС оценим мощность множеств ключей:  $N = |K_1| = |K_2| = 2^n$ . Тогда средняя трудоёмкость метода "встречи посередине":

$$\sqrt{N} \ln N = 2^{\frac{n}{2}} \ln 2^n$$



Средняя трудоёмкость полного перебора:

$$\frac{|K_1||K_2|}{2} = \frac{2^n \cdot 2^n}{2} = 2^{2n-1}$$

При  $n = 8$  метод "встречи посередине" эффективнее, чем МПП, в 369 раз, а при  $n = 256$  – примерно в  $10^{113}$  раз.

**Задача 5.3** В задаче 3.4 найти минимальную среднюю трудоёмкость нахождения ключа и сравнить с МПП. Предполагается, что имеется необходимое количество пар  $(x, y)$ .

**Решение.**

Было установлено, что  $|K_F| = 2^{254}$  и  $|K_A| \approx 2^{62.21}$ .

Метод "разделяй и властвуй":  $\frac{|K_F|+|K_A|}{2} \approx 10^{76.16}$ .

Метод "встречи посередине":  $(|K_A| + |K_F|)(1 + \ln(|K_A| + |K_F|)) \approx 10^{78.71}$ .

МПП:  $\frac{|K_F||K_A|}{2} \approx 10^{95.19}$ .

Если предположить, что у нас есть эффективный критерий, отбраковывающий ключи из  $K_F$ , то минимальная средняя трудоёмкость достигается первым методом, иначе – вторым. Разница по эффективности с МПП от  $10^{16.48}$  до  $10^{19.03}$  раз.

## Часть 2

# Контрольные работы

## 2.1 Шифры перестановки.

**Задача 1.1** Раскрыть шифр простой замены:

56 73 31 68 52 88 52 70 16 78 16 90 40 49 16 31 78 56 46 28 88 31 40 88 70  
68 52 40 19 56 70 73 88 19 94 00 52 31 49 68 78 88 56 90 73 16 31 49 94 88  
88 46 36 49 88 52 88 46 68 74 49 16 78 64 94 88 52 40 68 19 94 16 03 20 49  
64 46 88 78 64 13 16 90 40 49 03 16 52 31 78 16 70 88 73 68 78 88 90 40 49  
20 94 56 66 46 00 88 49 40 68 78 88 73 31 74 87 88 16 83 16 78 68 94 56 16  
16 52 20 90 68 73 56 70 88 73 68 49 64 49 03 87 56 94 16 73 16 31 16 78 56  
78 56 31 64 46 00 88 94 56 40 88 40 88 73 88 70 20 16 28 88 73 16 03 94 00  
66 94 16 70 88 19 68 90 20 52 16 94 56 82 31 83 16 94 11 56 94 68 52 56 90  
40 49 90 94 68 74 90 40 49 03 49 88 31 78 68 73 88 82 70 68 52 31 87 88 28  
88 20 28 88 70 94 56 87 68 83 68 87 88 46 74 90 68 94 46 88 74 90 94 56 31  
40 68 49 64 73 88 70 56 94 88 03 16 31 49 73 16 90 40 49 68 94 16 40 19 56  
19 88 70 94 88 82 88 90 68 46 88 03 16 94 94 88 31 49 56 49 03 87 68 31 94  
16 70 68 73 94 56 66 40 88 19 13 20 49 56 73 88 73 31 16 31 49 19 68 13 56  
78 31 74 90 68 31 00 40 68 49 64 56 90 90 68 40 88 31 49 88 74 94 94 00 66  
87 88 13 52 68 19 88 73 49 03 87 66 88 19 88 13 88 16 11 16 90 40 49 03 49  
88 88 94 40 88 94 68 49 20 19 16 03 16 78 88 73 16 87 78 16 28 87 88 52 00  
31 78 16 94 94 00 82 56 94 16 31 40 88 31 88 46 94 00 82 90 68 97 56 87 78  
56 73 68 49 64 31 74 94 68 03 16 52 78 56 46 88 90 40 49 56 94 68 03 16 52  
88 83 94 88 56 20 52 88 52 49 19 88 94 20 49 64 31 74

**Решение.**

Для более простого воспроизведения описанных действий буду приводить код на языке Python.

Проанализируем частоты монограмм.

---

```
>>> sorted(zip(*np.unique(cipher, return_counts = True)), key =  
           lambda x: x[1], reverse = True)[:10]  
[('88', 58), ('16', 37), ('94', 36), ('68', 33), ('49', 31), ('56',  
 29), ('31', 26), ('40', 21), ('73', 19), ('90', 19)]
```

---

Теперь рассмотрим биграммы:

---

```
>>> bigram = np.array([cipher[i] + ' ' + cipher[i+1] for i in  
                      range(len(cipher) - 1)])  
>>> sorted(zip(*np.unique(bigram, return_counts = True)), key =  
           lambda x: x[1], reverse = True)[:10]  
[('40 49', 8), ('88 73', 8), ('90 40', 8), ('40 88', 7), ('94 56',  
 7), ('03 16', 6), ('16 31', 6), ('31 49', 6), ('49 03', 6),  
 ('49 64', 6)]
```

---

Наиболее частые моно- и биграммы русского языка:

О	Е	А	И	Н	Т	С	Р	В	Л
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

СТ	НО	ЕН	ТО	НА	ОВ	НИ	РА	ВО	КО
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Предположим, что 88 – это О. В биграммах из текста эта буква встречается дважды: 88 73 и 40 88. В справочной таблице единственное сочетание, в котором О стоит на первом месте – это ОВ. Сравнивая позицию буквы 73 с первой таблицей, можем убедиться, что В действительно подходит.

Допустим также, что 16 – это Е. Поскольку в шифротексте нет явных знаков препинания, предположим, что они записаны в виде ЗПТ и ТЧК. Запятых, скорее всего, больше, чем точек, поэтому рассмотрим триграммы текста и самую частую определим как ЗПТ.

```
>>> trigram = np.array([cipher[i] + ' ' + cipher[i+1] + ' ' +
    cipher[i+2] for i in range(len(cipher) - 2) ])
>>> sorted(zip(*np.unique(trigram, return_counts = True)), key =
    lambda x: x[1], reverse = True)[:5]
[('90 40 49', 8), ('16 90 40', 4), ('68 49 64', 4), ('03 16 52',
    3), ('16 31 49', 3)]
```

Тогда 49 – это Т. Попробуем найти среди биграмм наиболее частую – СТ: единственный вариант, заканчивающийся на 49, – это 31 49 (40 49 уже занято – ПТ). Пусть 31 будет С.

Итак, попробуем подставить:

О	В	Е	З	П	Т	С
88	73	16	90	40	49	31

```
>>> key = {'88': 'О', '73': 'В', '16': 'Е', '90': 'З', '40': 'П',
    '49': 'Т', '31': 'С'}
>>> ' '.join([key[x] if x in key else x for x in cipher])
'56 В С 68 52 0 52 70 Е 78 Е З П Т Е С 78 56 46 28 0 С П 0 70 68 52
П 19 56 70 В 0 19 94 00 52 С Т 68 78 0 56 З В Е С Т 94 0 0 46
36 Т 0 52 0 46 68 74 Т Е 78 64 94 0 52 П 68 19 94 Е 03 20 Т 64
46 0 78 64 13 Е З П Т 03 Е 52 С 78 Е 70 0 В 68 78 0 З П Т 20 94
56 66 46 00 0 Т П 68 78 0 В С 74 87 0 Е 83 Е 78 68 94 56 Е Е 52
20 З 68 В 56 70 0 В 68 Т 64 Т 03 87 56 94 Е В Е С Е 78 56 78 56
С 64 46 00 0 94 56 П 0 П 0 В 0 70 20 Е 28 0 В Е 03 94 00 66 94
Е 70 0 19 68 З 20 52 Е 94 56 82 С 83 Е 94 11 56 94 68 52 56 З П
Т З 94 68 74 З П Т 03 Т 0 С 78 68 В 0 82 70 68 52 С 87 0 28 0
```

20 28 0 70 94 56 87 68 83 68 87 0 46 74 3 68 94 46 0 74 3 94 56  
 С П 68 Т 64 В 0 70 56 94 0 03 Е С Т В Е З П Т 68 94 Е П 19 56  
 19 0 70 94 0 82 0 3 68 46 0 03 Е 94 94 0 С Т 56 Т 03 87 68 С 94  
 Е 70 68 В 94 56 66 П 0 19 13 20 Т 56 В О В С Е С Т 19 68 13 56  
 78 С 74 3 68 С 00 П 68 Т 64 56 3 3 68 П О С Т О 74 94 94 00 66  
 87 0 13 52 68 19 О В Т 03 87 66 0 19 0 13 0 Е 11 Е З П Т 03 Т О  
 О 94 П О 94 68 Т 20 19 Е 03 Е 78 О В Е 87 78 Е 28 87 0 52 00 С  
 78 Е 94 94 00 82 56 94 Е С П О С О 46 94 00 82 3 68 97 56 87 78  
 56 В 68 Т 64 С 74 94 68 03 Е 52 78 56 46 0 3 П Т 56 94 68 03 Е  
 52 0 83 94 0 56 20 52 0 52 Т 19 0 94 20 Т 64 С 74'

Обратим внимание на 'ЗПТЕС 78 56', 'ПОПОВО 70 20', 'ПОСТО 74 94 94 \*', 'СПОСО 46'. Всё это похоже на ', если', 'по поводу', 'постоянн\*' и 'способ'. Попробуем добавить в ключ следующие замены:

Л	И	Д	У	Я	Н	Б
78	56	70	20	74	94	46

```
>>> key.update(**{'78': 'Л', '56': 'И', '70': 'Д', '20': 'У', '74':  
    'Я', '94': 'Н', '46': 'Б'})  
>>> ' '.join([key[x] if x in key else x for x in cipher])  
'И В С 68 52 0 52 Д Е Л Е З П Т Е С Л И Б 28 0 С П О Д 68 52 П 19 И  
    Д В О 19 Н 00 52 С Т 68 Л О И З В Е С Т Н О О Б 36 Т О 52 О Б  
    68 Я Т Е Л 64 Н О 52 П 68 19 Н Е 03 У Т 64 Б О Л 64 13 Е З П Т  
    03 Е 52 С Л Е Д О В 68 Л О З П Т У Н И 66 Б 00 О Т П 68 Л О В С  
    Я 87 О Е 83 Е Л 68 Н И Е Е 52 У З 68 В И Д О В 68 Т 64 Т 03 87  
    И Н Е В Е С Е Л И Л И С 64 Б 00 О Н И П О П О В О Д У Е 28 О В  
    Е 03 Н 00 66 Н Е Д О 19 68 З У 52 Е Н И 82 С 83 Е Н 11 И Н 68  
    52 И З П Т З Н 68 Я З П Т 03 Т О С Л 68 В О 82 Д 68 52 С 87 0  
    28 О У 28 О Д Н И 87 68 83 68 87 О Б Я З 68 Н Б О Я З Н И С П  
    68 Т 64 В О Д И Н О 03 Е С Т В Е З П Т 68 Н Е П 19 И 19 О Д Н О  
    82 О З 68 Б О 03 Е Н Н О С Т И Т 03 87 68 С Н Е Д 68 В Н И 66 П  
    О 19 13 У Т И В О В С Е С Т 19 68 13 И Л С Я З 68 С 00 П 68 Т  
    64 И З З 68 П О С Т О Я Н Н 00 66 87 0 13 52 68 19 О В Т 03 87  
    66 0 19 0 13 О Е 11 Е З П Т 03 Т О О Н П О Н 68 Т У 19 Е 03 Е Л  
    О В Е 87 Л Е 28 87 0 52 00 С Л Е Н Н 00 82 И Н Е С П О С О Б Н  
    00 82 3 68 97 И 87 Л И В 68 Т 64 С Я Н 68 03 Е 52 Л И Б О З П Т  
    И Н 68 03 Е 52 0 83 Н О И У 52 0 52 Т 19 О Н У Т 64 С Я'
```

Видно, что 'С Т 68 Л О И З В Е С Т Н О О Б 36 Т О 52 О Б 68 Я Т Е Л 64 Н О 52 П 68 19 Н Е' похоже на 'стало известно об этом обаятельном парне', а 'В Е С Е Л И Л И С 64 Б 00 О Н И П О П О В О Д У Е 28 О' – на 'веселились бы они по поводу его', 'В О Д И Н О 03 Е С Т В Е' – 'в одиночестве'

А	Э	М	Б	Р	Ы	Г	Ч
68	36	52	64	19	00	28	03

```
>>> key.update(**{'68': 'А', '36': 'Э', '52': 'М', '64': 'Б', '19':
    'Р', '00': 'Ы', '28': 'Г', '03': 'Ч'})
>>> ' '.join([key[x] if x in key else x for x in cipher])
'И В С А М О М Д Е Л Е З П Т Е С Л И Б Г О С П О Д А М П Р И Д В О
Р Н Ы М С Т А Л О И З В Е С Т Н О О Б Э Т О М О Б А Я Т Е Л Ь Н
О М П А Р Н Е Ч У Т Ь Б О Л Ь 13 Е З П Т Ч Е М С Л Е Д О В А Л
О З П Т У Н И 66 Б Ы О Т П А Л О В С Я 87 О Е 83 Е Л А Н И Е Е
М У З А В И Д О В А Т Ь Т Ч 87 И Н Е В Е С Е Л И Л И С Ь Б Ы О
Н И П О П О В О Д У Е Г О В Е Ч Н Ы 66 Н Е Д О Р А З У М Е Н И
82 С 83 Е Н 11 И Н А М И З П Т З Н А Я З П Т Ч Т О С Л А В О 82
Д А М С 87 О Г О У Г О Д Н И 87 А 83 А 87 О Б Я З А Н Б О Я З Н
И С П А Т Ь В О Д И Н О Ч Е С Т В Е З П Т А Н Е П Р И Р О Д Н О
82 О З А Б О Ч Е Н Н О С Т И Т Ч 87 А С Н Е Д А В Н И 66 П О Р
13 У Т И В О В С Е С Т Р А 13 И Л С Я З А С Ы П А Т Ь И З З А П
О С Т О Я Н Н Ы 66 87 О 13 М А Р О В Т Ч 87 66 О Р О 13 О Е 11
Е З П Т Ч Т О О Н П О Н А Т У Р Е Ч Е Л О В Е 87 Л Е Г 87 О М Ы
С Л Е Н Н Ы 82 И Н Е С П О С О Б Н Ы 82 З А 97 И 87 Л И В А Т Ь
С Я Н А Ч Е М Л И Б О З П Т И Н А Ч Е М О 83 Н О И У М О М Т Р
О Н У Т Ь С Я'
```

'ЧУТЬБОЛЬ 13 ЕЗПТ' – 'чуть больше,', 'УНИ 66 БЫ' – 'у них бы',  
 'В С Я 87 О Е 83 Е Л А Н И Е' – 'всякое желание', 'Н Е Д О Р А З У  
 М Е Н И 82 С 83 Е Н 11 И Н А М И' – 'недоразумений с женщинами',  
 'З А 97 И 87 Л И В А Т Ь С Я' – 'зацикливаться'.

Ш	Х	К	Ж	Й	Щ	Ц
13	66	87	83	82	11	97

```
>>> key.update(**{'13': 'Ш', '66': 'Х', '87': 'К', '83': 'Ж', '82':
    'Й', '11': 'Щ', '97': 'Ц'})
>>> ' '.join([key[x] if x in key else x for x in cipher])
'И В С А М О М Д Е Л Е З П Т Е С Л И Б Г О С П О Д А М П Р И Д В О
Р Н Ы М С Т А Л О И З В Е С Т Н О О Б Э Т О М О Б А Я Т Е Л Ь Н
О М П А Р Н Е Ч У Т Ь Б О Л Ь Ш Е З П Т Ч Е М С Л Е Д О В А Л О
З П Т У Н И Х Б Ы О Т П А Л О В С Я К О Е Ж Е Л А Н И Е Е М У З
А В И Д О В А Т Ь Т Ч К И Н Е В Е С Е Л И Л И С Ь Б Ы О Н И П О
П О В О Д У Е Г О В Е Ч Н Ы Х Н Е Д О Р А З У М Е Н И Й С Ж Е Н
Щ И Н А М И З П Т З Н А Я З П Т Ч Т О С Л А В О Й Д А М С К О Г
О У Г О Д Н И К А Ж А К О Б Я З А Н Б О Я З Н И С П А Т Ь В О Д
И Н О Ч Е С Т В Е З П Т А Н Е П Р И Р О Д Н О Й О З А Б О Ч Е Н
Н О С Т И Т Ч К А С Н Е Д А В Н И Х П О Р Ш У Т И В О В С Е С Т
Р А Ш И Л С Я З А С Ы П А Т Ь И З З А П О С Т О Я Н Н Ы Х К О Ш
```

```

МАРОВАТЧКХОРОШОЕЩЕЗПТЧТООНПОНАТУР
ЕЧЕЛОВЕКЛЕГКОМЫСЛЕННЫЙИНЕСПОСОБН
ЫЙЗАЦИКЛИВАТЬСЯНАЧЕМЛИБОЗПТИНАЧЕ
МОЖНОИУМОТРОНУТЬСЯ'
>>> key
{'88': 'О', '73': 'В', '16': 'Е', '90': 'З', '40': 'П', '49': 'Т',
 '31': 'С', '78': 'Л', '56': 'И', '70': 'Д', '20': 'У', '74':
 'Я', '94': 'Н', '46': 'Б', '68': 'А', '36': 'Э', '52': 'М',
 '64': 'Ь', '19': 'Р', '00': 'Ы', '28': 'Г', '03': 'Ч', '13':
 'Ш', '66': 'Х', '87': 'К', '83': 'Ж', '82': 'Й', '11': 'Щ',
 '97': 'Ц'}
```

**Задача 1.2** Раскрыть шифр вертикальной перестановки:

АЕЧСЕ ЛЫАИЛ ОПЗИЕ СТЫБД ТТДРД ОВИГР ЙВКАЛ МАШ-  
ЛУ ПЗЖТЯ РОСЗГ ЕНОПЫ ИОМЕО ОЯТТХ ОДАЛР УИВИО ООИ-  
НИ ОВЫЫБ ИАОРС ОТГАБ СОЕЧД ВУНЛУ НИМОЕ ШШАВН ЕАВ-  
МЙ

**Решение.**

Длина текста 120 букв. Наиболее целесообразно было бы использо-  
вать ключ длины 10 или 12 (близкой к  $\sqrt{120}$ ). Проверим различные  
длины ключей на основе известного соотношения гласных к согласным:  
44% к 56%.

```

>>> def get_mse(text, n):
...     vn = lambda row: sum([x in list('АЕЁИОУЫЭЮЯ') for x in row])
...     table = np.array(list(text)).reshape((n, len(text) // n)).T
...     ratio = np.array([vn(row) / len(row) for row in table])
...     return sum((ratio - 0.44) ** 2) / (len(text) // n)
...
>>> mse = [(round(get_mse(text, i), 5), i) for i in [6, 8, 10, 12,
15]]
>>> sorted(mse, key = lambda x: x[0])
[(0.00216, 15), (0.02229, 12), (0.02577, 10), (0.03514, 8),
(0.03966, 6)]
```

Видим, что наименьшая среднеквадратичная ошибка достигается при  
ключе длины 15.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
А	И	Т	Д	К	П	З	О	Х	В	О	Р	О	У	А
Е	Л	Ы	О	А	З	Г	М	О	И	В	С	Е	Н	В
Ч	О	Б	В	Л	Ж	Е	Е	Д	О	Ы	О	Ч	И	Н
С	П	Д	И	М	Т	Н	О	А	О	Ы	Т	Д	М	Е
Е	З	Т	Г	А	Я	О	О	Л	О	Б	Г	В	О	А
Л	И	Т	Р	Ш	Р	П	Я	Р	Н	И	А	У	Е	В
Ы	Е	Д	Й	Л	О	Ы	Т	У	Н	А	Б	Н	Ш	М
Я	С	Р	В	У	С	И	Т	И	И	О	С	Л	Ш	Й

Обратим внимание на столбцы, в которых есть буква 'Ы' – с ними будет проще всего найти не встречающиеся биграммы. Например, столбец 11 сочетается только с 3 и 5 столбцами. Так как, например, 'ДЫМ' встретится чаще, чем 'МЫД', поставим столбцы в порядке 3 - 11 - 5. Во второй строке получаем триграмму 'ЫВА', после которой может быть 'Н', 'Т', 'Е', 'Ю', 'Л', 'Я'. Отметим кандидатами 1, 2, 13 и 14 столбец. В последней строке получается 'РОУЯ', если выбрать первый столбец – отбраковываем, при 14-м столбце в 5-й строке получится 'ТБАО' – отбраковываем. На третьей строке скорее будет 'БЫЛО', чем 'БЫЛЧ', поэтому остановимся на варианте 3 - 11 - 5 - 2.

1	6	3	11	5	2	7	8	9	10	4	12	13	14	15
А	П	Т	О	К	И	З	О	Х	В	Д	Р	О	У	А
Е	З	Ы	В	А	Л	Г	М	О	И	О	С	Е	Н	В
Ч	Ж	Б	Ы	Л	О	Е	Е	Д	О	В	О	Ч	И	Н
С	Т	Д	Ы	М	П	Н	О	А	О	И	Т	Д	М	Е
Е	Я	Т	Б	А	З	О	О	Л	О	Г	Г	В	О	А
Л	Р	Т	И	Ш	И	П	Я	Р	Н	Р	А	У	Е	В
Ы	О	Д	А	Л	Е	Ы	Т	У	Н	Й	Б	Н	Ш	М
Я	С	Р	О	У	С	И	Т	И	И	В	С	Л	Ш	Й

В первой строке видно слово 'ВОЗДУХ', 10 - (8, 13) - 7 - 4 - 14 - 9. На третьей строке оказывается 'ОЕЕ', если выбрать 8-й столбец, и 'ОЧЕ', если выбрать 13-й. Установим столбцы по второму варианту.



1	6	3	11	5	2	12	8	15	10	13	7	4	14	9
А	П	Т	О	К	И	Р	О	А	В	О	З	Д	У	Х
Е	З	Ы	В	А	Л	С	М	В	И	Е	Г	О	Н	О
Ч	Ж	Б	Ы	Л	О	О	Е	Н	О	Ч	Е	В	И	Д
С	Т	Д	Ы	М	П	Т	О	Е	О	Д	Н	И	М	А
Е	Я	Т	Б	А	З	Г	О	А	О	В	О	Г	О	Л
Л	Р	Т	И	Ш	И	А	Я	В	Н	У	П	Р	Е	Р
Ы	О	Д	А	Л	Е	Б	Т	М	Н	Н	Ы	Й	Ш	У
Я	С	Р	О	У	С	С	Т	Й	И	Л	И	В	Ш	И

Видно, что эти два блока можно объединить. Кроме того, можно заметить слова 'ПОТОКИ' и 'ОЧЕВИДНО': 9 - 15 - 12, 6 - 8 - 3. Остаётся последний столбец, для которого становится ясно, что он должен находиться в конце таблицы.

Окончательный ответ:

П	О	Т	О	К	И	В	О	З	Д	У	Х	А	Р	А
З	М	Ы	В	А	Л	И	Е	Г	О	Н	О	В	С	Е
Ж	Е	Б	Ы	Л	О	О	Ч	Е	В	И	Д	Н	О	Ч
Т	О	Д	Ы	М	П	О	Д	Н	И	М	А	Е	Т	С
Я	О	Т	Б	А	З	О	В	О	Г	О	Л	А	Г	Е
Р	Я	Т	И	Ш	И	Н	У	П	Р	Е	Р	В	А	Л
О	Т	Д	А	Л	Е	Н	Н	Ы	Й	Ш	У	М	Б	Ы
С	Т	Р	О	У	С	И	Л	И	В	Ш	И	Й	С	Я



Подставим  $a_{n+r}$  из первого уравнения вместо  $a_{n-r}$  во второе уравнение и  $a_{n+3}$  вместо  $a_{n-3}$  в третье.

$$\begin{cases} a_n = a_{n+r} + a_{n+3}, & (1) \\ a_n = a_{n-r} + a_{n-r+3}, & (2) \\ a_n = a_{n-3} + a_{n+r-3}, & (3) \\ a_n = a_{n-2r} + a_{n-2r+3} + a_{n-r+3}, & (1+2) \\ a_n = a_{n-6} + a_{n+r-6} + a_{n+r-3}. & (1+3) \end{cases}$$

Теперь подставим второе уравнение в пятое.

$$\begin{cases} a_n = a_{n+r} + a_{n+3}, & (1) \\ a_n = a_{n-r} + a_{n-r+3}, & (2) \\ a_n = a_{n-3} + a_{n+r-3}, & (3) \\ a_n = a_{n-2r} + a_{n-2r+3} + a_{n-r+3}, & (1+2) \\ a_n = a_{n-6} + a_{n+r-6} + a_{n+r-3}. & (1+3) \\ a_n = a_{n-r-6} + a_{n-r-3} + a_{n+r-6} + a_{n+r-3}. & (1+2+3) \end{cases}$$

Таким образом, мы получили систему из  $m = 6$  уравнений. Теперь подставим  $r$ , вместо членов последовательности  $a$  подставим члены последовательности  $z$ , опустим индексы  $n$  и получим систему линейных форм:

$$\begin{cases} z + z_5 + z_3 = L_1, \\ z + z_{-5} + z_{-2} = L_2, \\ z + z_{-3} + z_2 = L_3, \\ z + z_{-10} + z_{-7} + z_{-2} = L_4, \\ z + z_{-6} + z_{-1} + z_2 = L_5, \\ z + z_{-11} + z_{-8} + z_{-1} + z_2 = L_6. \end{cases}$$

Каждый  $z_i$  представляет собой  $a_i \oplus \gamma_i$ , где  $\gamma_i$  — это н.о.р.с.в. с  $P(\gamma = 0) = P(f = 0) = \frac{3}{4}$ . Пусть  $b_{ij}$  — это слагаемые правой стороны уравнений системы с  $a_i$ , а  $y_{ij}$  — слагаемые левой стороны уравнений системы с  $z_i$ , не содержащие  $z$ . Тогда уравнения первой системы принимают вид  $a + \sum_{j=0}^t b_{ij} = 0$ , а второй —  $z + \sum_{j=0}^t y_{ij} = L_i$ . Заметим, что в таком случае  $P(z_i = a_i) = P(y_{ij} = b_{ij}) = \frac{3}{4} = p$ .

Пусть вероятность  $s = s(t, p) = P(y_i = b_i)$  не зависит от  $i$ . По формуле полной вероятности получим рекуррентное соотношение:

$$\begin{cases} s(t, p) = p \cdot s(t-1, p) + (1-p)(1-s(t-1, p)), \\ s(1, p) = p. \end{cases}$$

Поскольку  $t = 2$ , то  $s = s(2, \frac{3}{4}) = \frac{3}{4} \cdot \frac{3}{4} + (1 - \frac{3}{4})(1 - \frac{3}{4}) = \frac{5}{8}$ . Определим апостериорную вероятность того, что  $z = a$  при условии события  $B_k$ :  $k$  из  $m$  линейных форм  $L_i$  равны нулю.

$$P(z = a | B_k) = \frac{\binom{m}{k} p s^k (1-s)^{m-k}}{\binom{m}{k} p s^k (1-s)^{m-k} + \binom{m}{k} (1-p) s^{m-k} (1-s)^k} = p^*$$

Найдём матожидания этой величины в двух разных случаях:  $z = a$  и  $z \neq a$ :

$$\begin{aligned} E_0(p^*) &= E(p^* | z = a) = \\ &= \sum_{k=0}^m \binom{m}{k} \frac{p s^k (1-s)^{m-k}}{p s^k (1-s)^{m-k} + (1-p) s^{m-k} (1-s)^k} s^k (1-s)^{m-k} = \\ &= \sum_{k=0}^6 \binom{6}{k} \frac{\frac{3}{4} \cdot (\frac{5}{8})^k (\frac{3}{8})^{6-k}}{\frac{3}{4} \cdot (\frac{5}{8})^k (\frac{3}{8})^{6-k} + \frac{1}{4} \cdot (\frac{5}{8})^{6-k} (\frac{3}{8})^k} \left(\frac{5}{8}\right)^k \left(\frac{3}{8}\right)^{6-k} \approx 0.81 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_1(p^*) &= E(p^* | z \neq a) = \\ &= \sum_{k=0}^m \binom{m}{k} \frac{p s^k (1-s)^{m-k}}{p s^k (1-s)^{m-k} + (1-p) s^{m-k} (1-s)^k} s^{m-k} (1-s)^k = \\ &= \sum_{k=0}^6 \binom{6}{k} \frac{\frac{3}{4} \cdot (\frac{5}{8})^k (\frac{3}{8})^{6-k}}{\frac{3}{4} \cdot (\frac{5}{8})^k (\frac{3}{8})^{6-k} + \frac{1}{4} \cdot (\frac{5}{8})^{6-k} (\frac{3}{8})^k} \left(\frac{5}{8}\right)^{6-k} \left(\frac{3}{8}\right)^k \approx 0.56 \end{aligned}$$

Составим таблицу в соответствии с последней системой. Записываем последовательность  $z$  в том же порядке, в котором она была задана в условии. Далее добавляем столбцы  $z_i$ , участвующие в СЛАУ в качестве слагаемых: это будет та же последовательность, но со сдвигом  $i$ .  $i$  положительное – сдвиг "вверх",  $i$  отрицательное – сдвиг "вниз". Потом заполняем  $L_i$ , исходя из их равенств, уже зная все слагаемые в них.

$N$	$z$	$z_5$	$z_3$	$z_{-5}$	$z_{-2}$	$z_{-3}$	$z_2$	$z_{-10}$	$z_{-7}$	$z_{-6}$	$z_{-1}$	$z_{-11}$	$z_{-8}$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$L_5$	$L_6$
1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0
4	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1
5	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
6	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1
7	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1
8	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
9	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
10	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0
11	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
12	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
13	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
14	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0
15	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1
16	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	0
17	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1
18	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1
19	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
20	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0
21	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
22	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1
23	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1
24	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1
25	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
26	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1
27	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1
28	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
29	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	1
30	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
31	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	0	1

Выберем  $r$  строк, в которых  $L_i$  принимают наибольшее количество нулей. Это строки 2, 1, 5, 20, 28. Выразим  $a$  с соответствующими номерами через начальное заполнение регистров.

$$\begin{cases} a_2 = x_2 + x_5 = 1, \\ a_1 = x_1 + x_4 = 0, \\ a_5 = x_1 + x_3 + x_4 + x_5 = 0, \\ a_{20} = x_3 + x_4 + x_5 = 1, \\ a_{28} = x_2 = 1. \end{cases}$$

Решив систему уравнений, получим  $\vec{x} = (1, 1, 0, 1, 0)$ . Выполним проверку:

---

```
>>> def check_solution(x):
...     true_z = [int(c) for c in '0101011011110011000101111001000']
...     z = []
...     for i in range(len(true_z)):
...         gamma = x[3] * x[4]
...         a = (x[0] + x[3]) % 2
...         z += [(gamma + a) % 2]
...         x = x[1:] + [a]
...     return z == true_z
...
>>> x = [1, 1, 0, 1, 0]
>>> check_solution(x)
False
```

---

К сожалению, не повезло. Значит, надо выбрать другие строки. Попробуем взять 2, 1, 5, 3, 28. Тогда четвёртое уравнение в системе изменится на  $a_3 = x_1 + x_3 + x_4 = 0$ . Новая система будет иметь два решения:  $\vec{x} = (0, 1, 0, 0, 0)$  и  $\vec{x} = (1, 1, 0, 1, 0)$ . Второе из них уже было проверено выше, проверим первое:

---

```
>>> x = [0, 1, 0, 0, 0]
>>> check_solution(x)
True
```

---

Победа.

Ответ:  $m = 6$ ,  $E_0(p^*) \approx 0.81$ ,  $E_1(p^*) \approx 0.56$ ,  $\vec{x} = (0, 1, 0, 0, 0)$ .

### 2.3 Дифференциальный криптоанализ.

**Задача 3.1**  $N$  – количество слов длины  $l$  в алфавите  $A$ ,  $n$  – количество пар вариантов сообщений  $M$  и  $M'$ ,  $p$  – вероятность успешной атаки.

Доказать теорему: Пусть  $N, n \rightarrow \infty$ , но  $\frac{n^2}{N} \rightarrow t > 0$ , тогда:

$$p = (1 - e^{-t})(1 + o(1)).$$

**Решение.**

Известно, что:  $1 - p = \frac{[(N-n)!]^2}{N!(N-2n)!}$ . Следовательно:

$$\begin{aligned} p &= 1 - \frac{[(N-n)!]^2}{N!(N-2n)!} = \\ &= 1 - \frac{\left[\left(\frac{N-n}{e}\right)^{N-n} \sqrt{2\pi(N-n)} \left(1 + \frac{1}{12(N-n)} + O\left(\frac{1}{(N-n)^2}\right)\right)\right]^2}{\left(\frac{N}{e}\right)^N \sqrt{2\pi N} \left(1 + \frac{1}{12N} + O\left(\frac{1}{N^2}\right)\right) \left(\frac{N-2n}{e}\right)^{N-2n} \sqrt{2\pi(N-2n)} \left(1 + \frac{1}{12(N-2n)} + O\left(\frac{1}{(N-2n)^2}\right)\right)} = \\ &= 1 - \frac{\left(\frac{1}{e}\right)^{2N-2n} \cdot \frac{(N-n)^{2N-2n}}{N^N (N-2n)^{N-2n}} \cdot \sqrt{\frac{(N-n)^2}{N(N-2n)}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{1}{12(N-n)} + O\left(\frac{1}{(N-n)^2}\right)\right)^2}{\left(1 + \frac{1}{12N} + O\left(\frac{1}{N^2}\right)\right) \left(1 + \frac{1}{12(N-2n)} + O\left(\frac{1}{(N-2n)^2}\right)\right)} = \\ &= \left\{ \frac{(N-n)^{2N-2n}}{N^N (N-2n)^{N-2n}} = \left(\frac{N^2 - 2nN + n^2}{N^2 - 2nN}\right)^N \cdot \left(\frac{N^2 - 4nN + 4n^2}{N^2 - 2nN + n^2}\right)^n = \left(1 + \frac{n^2}{N} \cdot \frac{1}{N-2n}\right)^N \cdot \right. \\ &\cdot \left(1 - \frac{2nN - 3n^2}{N^2 - 2nN + n^2}\right)^n = \left(1 + \frac{n^2}{N} \cdot \frac{1}{N-2n}\right)^N \cdot \left(1 - \frac{2}{\frac{N}{n^2}n - 1} + \left(\frac{1}{\frac{N}{n^2}n - 1}\right)^2\right)^n = \\ &= \exp\left\{N \ln\left(1 + \frac{n^2}{N} \cdot \frac{1}{N-2n}\right) + n \ln\left(1 - \frac{2}{\frac{N}{n^2}n - 1} + \left(\frac{1}{\frac{N}{n^2}n - 1}\right)^2\right)\right\} = \\ &= \left\{\frac{n^2}{N} \cdot \frac{1}{N-2n} \sim \frac{t}{N-2\sqrt{tN}} \xrightarrow{t \ll N} 0, \quad \frac{1}{\frac{N}{n^2}n - 1} \sim \frac{t}{n-t} \xrightarrow{t \ll n} 0\right\} = \{\ln(1+\alpha) = \alpha + o(\alpha)\} = \\ &= \exp\left\{N \left(\frac{n^2}{N} \cdot \frac{1}{N-2n} + o\left(\frac{1}{N-2\sqrt{tN}}\right)\right) + n \left(-\frac{2}{\frac{N}{n^2}n - 1} + \left(\frac{1}{\frac{N}{n^2}n - 1}\right)^2 + o\left(\frac{1}{n-t}\right)\right)\right\} = \\ &= \exp\left\{\frac{n^2}{N} \cdot \frac{1}{1 - 2\frac{n^2}{N} \frac{1}{n}} - \frac{n^2}{N} \cdot \frac{2}{1 - \frac{n^2}{N} \frac{1}{n}} - \left(\frac{n^2}{N}\right)^2 \frac{1}{n - 2\frac{n^2}{N} + \left(\frac{n^2}{N}\right)^2 \frac{1}{n}} + o\left(\frac{N}{(N-2\sqrt{tN})^3}\right) + o\left(\frac{n}{(n-t)^3}\right)\right\} = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \exp\left\{\frac{n^2}{N} \cdot \frac{3\frac{n^2}{N}\frac{1}{n} - 1}{1 - 3\frac{n^2}{N}\frac{1}{n} + 2\left(\frac{n^2}{N}\right)^2\frac{1}{n^2}} + o(1)\right\} = \exp\left\{-\frac{n^2}{N} \cdot \frac{1 + o(1)}{1 + o(1)} + o(1)\right\} = \\
&= 1 - \exp\left\{-\frac{n^2}{N} \cdot \frac{1 + o(1)}{1 + o(1)} + o(1)\right\}. \\
&\cdot \sqrt{\frac{(N-n)^2}{N(N-2n)}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{1}{12(N-n)} + O\left(\frac{1}{(N-n)^2}\right)\right)^2}{\left(1 + \frac{1}{12N} + O\left(\frac{1}{N^2}\right)\right)\left(1 + \frac{1}{12(N-2n)} + O\left(\frac{1}{(N-2n)^2}\right)\right)} = \\
&= \left\{\sqrt{\frac{(N-n)^2}{N(N-2n)}} = \sqrt{1 + \frac{n^2}{N} \frac{1}{N-2\sqrt{tN}}} = 1 + O\left(\frac{n^2}{N} \frac{1}{N-2\sqrt{tN}}\right) = 1 + o(1)\right\} = \\
&= 1 - \exp\left\{-\frac{n^2}{N} \cdot \frac{1 + o(1)}{1 + o(1)} + o(1)\right\} \cdot (1 + o(1)) \cdot \frac{\left(1 + \frac{1}{12(N-n)} + O\left(\frac{1}{(N-n)^2}\right)\right)^2}{\left(1 + \frac{1}{12N} + O\left(\frac{1}{N^2}\right)\right)\left(1 + \frac{1}{12(N-2n)} + O\left(\frac{1}{(N-2n)^2}\right)\right)} = \\
&= 1 - \exp\left\{-\frac{n^2}{N} \cdot \frac{1 + o(1)}{1 + o(1)} + o(1)\right\} \cdot (1 + o(1)) \cdot \frac{(1 + o(1))^2}{(1 + o(1))^2} \xrightarrow{\frac{n^2}{N} \rightarrow t} (1 - e^{-t})(1 + o(1)).
\end{aligned}$$



## 2.4 Линейный криптоанализ

Поскольку мы не связаны никакими ограничениями в выборе тех или иных функций, исследуем, как изменится эффективность метода Мицуру Мацуи, если допустить хотя бы малейшие необдуманные изменения в оригинальном алгоритме DES.

Пусть функция расширения будет иметь вид:

$$E(\vec{X}) = (X[4], X[3], X[1], X[3], X[2], X[4], X[6], X[7], X[5], X[7], X[8], X[6])$$

Функция перестановки:

$$P(\vec{X}) = (X[2], X[6], X[4], X[7], X[3], X[8], X[5], X[1])$$

Возьмём следующие S-боксы:

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	13	4	14	1	2	11	15	8	3	10	6	12	7	9	0	5
1	0	8	7	4	14	2	13	9	10	6	12	11	1	5	3	15
2	4	0	14	8	13	6	2	11	15	12	9	7	3	10	5	1
3	13	12	8	2	4	9	1	7	5	3	11	14	10	0	6	15

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	10	1	8	14	6	11	3	4	9	12	2	13	7	0	5	15
1	3	5	4	7	15	2	8	14	12	0	1	10	6	9	11	13
2	0	2	7	11	10	4	13	1	5	8	12	6	9	3	14	15
3	13	11	10	1	3	15	4	2	8	6	7	12	5	0	14	9

Построим таблицу значений  $NS_1(\alpha, \beta)$  :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	-2	-2	-4	-4	2	-2	4	2	0	0	6	6	-4	0	-2
3	-2	-6	0	-4	2	2	0	2	8	-4	2	6	4	-12	2
4	4	2	-2	2	2	-8	0	2	2	0	8	0	-4	2	6
5	-4	-6	6	-2	-2	-4	-4	-2	6	-4	4	0	-4	2	-2
6	-6	0	2	-2	4	-2	-4	0	-2	4	2	2	-4	-2	-8
7	-6	4	6	2	0	-2	4	4	-6	-12	-6	2	-4	2	-4
8	8	2	6	-4	-4	-2	2	-4	-4	-2	2	0	0	2	-2
9	0	2	-2	-4	-4	6	-6	0	0	2	6	4	-4	-2	2
10	-6	0	-2	0	2	4	2	-6	4	2	0	-6	4	-2	4
11	2	-4	-6	0	-14	0	6	-2	0	2	0	-2	-8	-2	-4
12	-4	4	4	-2	6	-2	2	2	2	2	-2	4	-8	0	8
13	4	4	4	2	2	-6	-2	2	2	10	-2	0	4	-4	-4
14	-2	2	-4	2	4	-4	2	4	6	2	0	2	0	0	2
15	-2	-2	8	-2	0	4	-6	-4	-2	-2	-4	-2	-4	0	2
16	6	6	0	0	2	2	0	-2	8	-4	2	2	0	-4	-18
17	2	-6	0	0	-2	-2	8	-2	4	8	-6	2	-4	0	-2
18	0	0	-4	-8	4	0	0	-4	0	4	4	8	0	0	-4
19	4	0	-8	0	0	-8	-12	-4	-4	-4	0	0	4	0	0
20	2	4	2	-6	-4	-2	4	0	10	0	-2	2	4	2	0
21	-2	8	-6	-2	4	-2	0	12	2	0	2	-6	0	6	0
22	4	6	-2	2	-2	-4	4	2	6	-4	4	-4	0	2	2
23	0	6	-6	6	6	0	-4	-10	-2	0	-4	-4	-4	2	-2
24	2	8	2	0	6	4	2	6	-4	6	4	2	-4	-2	0
25	-2	4	-6	0	-6	0	2	2	-4	6	8	-2	4	-2	-4
26	0	-6	2	0	-4	2	6	0	-4	-6	6	-4	4	6	-2
27	4	2	6	-8	0	-6	2	-4	-4	6	-2	0	4	2	-2
28	-2	6	4	2	0	0	-2	-4	2	-2	4	-2	4	8	-2
29	2	-6	4	-2	0	0	-6	4	6	-6	4	-6	-4	-8	2
30	-4	0	-4	2	-2	-2	-6	2	6	-2	-6	4	-8	4	0
31	0	0	0	-2	-2	2	2	2	-6	-2	-2	-8	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	2	-6	4	0	2	6	0	2	-4	-4	6	10	4	8	2
35	2	-2	0	0	2	2	4	2	4	0	-6	-6	-4	4	-2
36	0	-6	-6	6	2	4	0	2	-2	0	-4	-4	4	-2	-10
37	-8	2	2	2	-2	-8	-4	-2	2	-4	8	-4	4	-2	-2
38	2	4	-2	6	-4	2	0	0	-2	0	-2	2	4	2	4
39	2	0	-6	-6	8	-6	0	4	-6	-8	-2	2	4	-2	0
40	4	-2	-2	0	-4	-2	-2	4	0	2	2	-4	-8	10	2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
41	-4	-2	-10	0	-4	-10	6	0	-4	-2	-2	8	-4	-2	-2
42	2	0	-2	0	2	-4	2	2	-4	-6	0	2	4	-2	4
43	-6	4	2	0	2	0	14	-2	0	-6	0	-2	0	-2	-4
44	4	0	0	6	6	2	6	-6	2	-2	10	-4	-8	-4	4
45	-4	0	0	-6	2	-2	2	2	-6	-2	2	0	-4	0	0
46	-6	2	8	6	-4	-8	2	-4	2	2	4	6	0	4	2
47	-6	6	-4	2	-8	8	2	-4	2	-2	0	10	4	4	2
48	-2	-2	0	0	2	2	0	-2	0	4	2	2	0	-4	-2
49	-6	2	0	0	-2	-2	-8	-2	-4	0	-6	2	-4	0	-2
50	-4	-4	-4	-4	4	0	4	-4	4	0	-4	-4	8	0	8
51	0	4	0	4	0	0	0	-4	0	0	0	4	-4	-8	4
52	6	-4	6	6	4	-6	4	0	-2	0	-6	6	4	-2	0
53	2	0	-2	-6	-4	-6	0	-4	6	0	-2	-2	0	2	0
54	4	2	-6	2	-2	8	0	2	-2	0	0	4	0	-2	6
55	0	-6	-2	6	6	4	0	6	6	-4	0	4	-4	6	-6
56	-10	4	2	-4	-2	4	-2	6	0	2	4	-2	4	-2	-4
57	2	0	-6	-4	2	0	-2	-6	8	-6	0	2	4	6	0
58	0	2	2	8	4	2	-2	0	4	2	-2	4	4	6	-2
59	4	2	-2	0	8	2	2	-12	-4	-2	6	0	-4	2	-2
60	-2	10	0	-6	0	4	2	-4	2	-6	-8	-2	-4	-4	2
61	2	-2	0	-10	0	4	-2	-4	-2	-2	0	2	-4	4	-2
62	0	0	0	-10	6	2	2	2	2	6	-2	0	0	8	0
63	-12	-8	-4	2	6	-2	2	-6	-2	6	2	-4	0	4	0

Наибольшее по модулю число в этой таблице находится на позиции (16, 15), оно равно -18. Тогда уравнение

$$\vec{X}[2] \oplus \vec{Y}[1, 2, 3, 4] = \vec{K}[2]$$

является эффективным линейным статистическим аналогом 1-го S-бокса в классе всех линейных статистических аналогов вида

$$(\vec{Y}, \vec{j}) = (\vec{X} \oplus \vec{K}, \vec{i})$$

с вероятностью  $p_1 = \frac{-18+32}{64} = \frac{7}{32}$  и  $\Delta_1 = |1 - \frac{7}{16}| = \frac{9}{16}$

Повторим то же самое со вторым S-боксом:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	-2	2	-2	2	0	-8	-4	4	-6	-2	-2	2
3	0	0	-8	2	6	2	-2	0	0	-4	4	-2	10	2	6
4	0	2	2	6	2	0	4	4	4	-2	-2	-2	2	0	12
5	4	2	-2	6	-2	0	-8	0	-4	2	6	-6	2	4	-4
6	-4	-2	-6	-4	0	2	-2	-4	0	-2	2	0	-4	2	6
7	0	-2	-2	0	0	6	-2	0	8	10	2	-8	0	2	2
8	4	4	0	2	2	-2	-2	0	-8	-4	-4	-2	2	10	-2
9	4	0	-4	2	2	2	2	-4	4	-4	-4	2	6	-6	-2
10	0	4	4	4	4	0	-8	0	4	0	4	4	0	-4	0
11	0	0	8	0	0	0	0	4	0	8	-4	-4	0	0	4
12	0	6	-2	0	0	-2	6	-4	0	2	-2	4	0	-6	-2
13	-4	2	-2	0	4	2	-10	4	-4	6	-2	4	-4	-2	6
14	0	2	2	2	-2	-4	8	-4	0	2	6	2	2	0	0
15	-4	-2	-6	-2	-2	-4	12	4	4	6	6	-2	2	0	4
16	0	-6	2	4	0	-6	-2	4	0	6	2	0	-8	-2	-10
17	4	2	-2	4	-4	2	2	0	0	2	2	-4	0	10	-2
18	4	2	6	2	6	0	4	-4	4	-6	10	2	-14	4	12
19	0	-6	2	-2	6	4	4	0	-4	-2	-6	2	-2	4	0
20	-4	-8	-4	-2	2	-6	-2	-4	4	4	-4	6	-2	2	2
21	12	0	-4	-2	2	2	-2	4	4	4	-4	-2	-2	2	2
22	4	-4	0	4	-4	4	4	4	-4	4	4	8	4	4	0
23	12	4	0	0	0	-8	0	-4	-4	4	-4	-4	0	0	4
24	-8	-2	-2	2	2	4	4	0	0	6	6	-2	6	0	0
25	4	-6	6	2	6	8	-4	0	-4	2	-2	6	2	-4	0
26	8	-2	-2	-4	0	-2	2	0	0	2	2	-4	0	2	-2
27	-4	10	6	0	0	6	-2	0	-4	-2	2	-8	0	2	-6
28	0	4	-4	4	0	-4	0	8	0	-4	4	4	0	4	0
29	0	0	0	4	0	0	-4	4	4	-4	4	8	-4	4	0
30	-4	0	4	-2	2	2	-2	0	4	-4	0	2	-2	2	-2
31	4	-4	8	2	-2	-6	-2	-12	0	4	0	2	6	-2	2
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	-4	4	6	-6	2	-2	4	4	-4	-12	-2	-6	-2	2
35	0	-4	-4	2	6	-2	2	4	-4	-4	4	-6	-2	-6	-2
36	0	-2	-2	-2	-6	4	-8	0	0	-2	-2	2	6	8	4
37	-4	-2	2	-2	-2	4	4	-4	0	2	-2	-2	-2	12	-4
38	4	-10	2	-12	0	2	-2	-4	0	-2	10	0	-4	2	-2
39	0	6	-2	0	0	-2	-2	0	0	-6	2	0	0	-6	-6
40	0	4	-4	2	-2	-2	-6	0	-4	4	8	6	-2	-6	2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
41	0	0	-8	2	-2	2	-2	-12	0	-4	0	2	-6	2	-6
42	4	0	-4	4	-8	-4	0	-4	4	0	0	0	0	-4	-4
43	4	-4	0	8	12	4	0	-8	8	0	0	-8	0	0	0
44	-4	2	6	0	-4	-6	-2	0	-8	2	2	0	0	2	10
45	0	-2	-2	0	-8	-2	-10	0	4	-2	2	-8	-4	-2	2
46	-4	-6	-2	10	2	-4	-4	-4	-4	-6	2	-6	6	0	4
47	0	6	-2	-2	2	4	0	-4	0	6	2	6	-2	0	0
48	4	-2	2	-4	-4	6	6	0	-8	-2	-2	-4	0	-10	2
49	0	-2	-2	4	-8	-2	2	-4	0	2	-2	0	-8	2	2
50	0	2	2	2	2	0	0	-4	0	2	-2	2	-2	-4	0
51	4	2	-2	-2	-6	-4	0	0	0	-2	-2	2	2	4	4
52	-8	0	-8	6	6	-6	2	4	0	4	-8	-2	-6	2	-2
53	-8	0	0	-2	-2	2	2	-4	0	-4	0	-2	2	2	-2
54	0	0	0	-4	0	0	-4	0	4	4	0	-4	4	-4	4
55	8	0	-8	-8	4	-4	0	8	4	-4	0	0	0	0	0
56	0	2	2	-6	2	0	0	4	-4	-2	-2	-6	-6	0	0
57	4	6	-6	2	6	4	0	-4	-8	10	-2	2	-2	4	0
58	0	-2	6	4	0	-10	2	0	0	2	2	-4	0	2	-2
59	-4	2	-2	-8	8	-10	-2	-8	-4	-2	-6	0	0	2	2
60	0	-4	-4	4	0	4	0	0	-8	4	4	-4	-8	-4	0
61	0	0	8	-4	8	-8	-4	4	4	4	4	0	4	4	-8
62	4	-12	0	6	2	-2	2	4	-8	-4	0	6	2	2	-2
63	-4	-8	-4	-6	-2	-2	-6	0	-4	4	0	-2	2	-2	2

Наибольшее по модулю число в этой таблице находится на позиции (18, 13), оно равно -14. Тогда уравнение

$$\vec{X}[2, 5] \oplus \vec{Y}[1, 2, 4] = \vec{K}[2, 5]$$

является эффективным линейным статистическим аналогом 2-го S-блока в классе всех линейных статистических аналогов вида

$$(\vec{Y}, \vec{j}) = (\vec{X} \oplus \vec{K}, \vec{i})$$

с вероятностью  $p_2 = \frac{-14+32}{64} = \frac{9}{32}$  и  $\Delta_2 = |1 - \frac{9}{16}| = \frac{7}{16}$ .

Получаем  $\Delta_1 > \Delta_2$ , значит, эффективным линейным статистическим аналогом произвольного раунда DES является уравнение:

$$\vec{X}_i[2] \oplus \vec{Y}_i[1, 2, 3, 4] = \vec{K}_i[2]$$

С учётом расширения и перестановки:

$$\vec{X}_i[3] \oplus \vec{Y}_i[8, 1, 5, 3] = \vec{K}_i[2]$$

Запишем для первого и третьего раунда:

$$\vec{P}_L[3] \oplus (\vec{X}_2 \oplus \vec{P}_H)[8, 1, 5, 3] = \vec{K}_1[2]$$

$$(\vec{C}_L \oplus \vec{Y}_4)[3] \oplus (\vec{X}_2 \oplus \vec{C}_L)[8, 1, 5, 3] = \vec{K}_3[2]$$

Ещё нам понадобится уравнение, содержащее  $\vec{Y}_4[3]$ . До перестановки это четвёртый бит первого S-блока. То есть, надо искать по первому столбцу. На позиции (63, 1) максимальный по модулю элемент -12. Тогда  $p_* = \frac{-12+32}{64} = \frac{5}{16}$  и  $\Delta_* = |1 - \frac{5}{8}| = \frac{3}{8}$

$$\vec{X}_i[1, 2, 3, 4, 5, 6] \oplus \vec{Y}_i[4] = \vec{K}_i[1, 2, 3, 4, 5, 6]$$

Учтя расширение и перестановку, получим:

$$\vec{X}_i[1, 2] \oplus \vec{Y}_i[3] = \vec{K}_i[1, 2, 3, 4, 5, 6]$$

Запишем для четвёртого раунда

$$\vec{C}_L[1, 2] \oplus \vec{Y}_4[3] = \vec{K}_4[1, 2, 3, 4, 5, 6]$$

Сложив все уравнения, получим:

$$\vec{P}_L[3] \oplus \vec{P}_H[1, 3, 5, 8] \oplus \vec{C}_L[2, 5, 8] = \vec{K}_1[2] \oplus \vec{K}_3[2] \oplus \vec{K}_4[1, 2, 3, 4, 5, 6]$$

Получим результирующую эффективность и вероятность:

$$\Delta = \Delta_1 \cdot \Delta_1 \cdot \Delta_* = \frac{9}{16} \cdot \frac{9}{16} \cdot \frac{3}{8} = \frac{243}{2048} \approx 0.12$$

$$p = \frac{1 - \Delta}{2} = \frac{1805}{4096} \approx 0.44$$

Тогда можно раскрыть 8 бит ключа  $K = (K_1, K_2, K_3, K_4)$ , зная  $|p - \frac{1}{2}|^{-2} = 284$  открытых текста с вероятностью успеха 97.7%. Из статьи Мицуру Мацуи можно сделать вывод, что лучший стат. аналог для оригинального *DES/4* требует 269 открытых текстов для раскрытия 2 бит ключа. То есть, стало хуже примерно в 4 раза.

Это означает, что "мудрить" с алгоритмами нельзя, а подбирать все параметры нужно крайне обдуманно, иначе можно значительно ухудшить стойкость криптографических алгоритмов.

## Часть 3

## Экзамен

1. *Определение шифра. Шифр простой замены, перестановки, гаммирования. Основные условия криптоанализа.*

Отображение  $T : X \times K \rightarrow Y$  называется **шифром**, если  $\forall k \in K$   
 $\exists T^{-1}(y, k) = x$ .

Пусть  $A = \{a_1, \dots, a_m\}$  – конечный алфавит,  $S_m$  – множество всех подстановок на  $A$ . Для некоторого натурального  $n$  положим  $X = A^n$ . Если  $x = (a_{i_1}, \dots, a_{i_n})$ ,  $k \in S_m$ , то определим **шифр простой замены** следующим образом:

$$T(x, k) = (k(a_{i_1}), k(a_{i_2}), \dots, k(a_{i_n})) = y = (b_{i_1}, \dots, b_{i_n}).$$

Пусть  $A = \{a_1, \dots, a_m\}$  – конечный алфавит,  $n$  – натуральное число,  $S_n$  – симметрическая группа подстановок на множестве  $\{1, \dots, n\}$ ,  $X = A^n$ . Если  $x = (a_{i_1}, \dots, a_{i_n})$ ,  $k = \begin{pmatrix} 1 & \dots & n \\ j_1 & \dots & j_n \end{pmatrix} \in S_n$ , то **шифр перестановки** на  $X$  определяется следующим образом:

$$T(x, k) = (a_{i_{j_1}}, a_{i_{j_2}}, \dots, a_{i_n}) = y.$$

Пусть  $A = \{0, \dots, m-1\}$  – алфавит,  $X = A^n$  – множество открытых текстов. Рассмотрим кольцо вычетов  $\mathbb{Z}_m$ . Положим  $K = A^n$  и  $\forall x \in X, k \in K$ , определим **шифр гаммирования**:

$$y = T(x, k) = (x + k) \pmod{m},$$

где сложение происходит в кольце  $\mathbb{Z}_m$ .

### Основные условия криптоанализа:

1. Известен шифртекст  $y$ , один или несколько. Задачи:
  - а) Нахождение  $T$  – преобразования зашифрования;
  - б) Нахождение  $T, T^{-1}, x$  – дешифрование по шифртексту.
2. Известны одна или несколько пар  $(x, y)$ . Определить  $T(T^{-1})$  и найти  $k$  – ключ шифрования.
3. Известны  $T(T^{-1})$ , один или несколько шифртекстов  $y$ . Найти:
  - а)  $x$  – бесключевое чтение;
  - б)  $k, x$  – дешифрование по шифртексту при известной шифрсистеме.
4. Известны  $T, T^{-1}, (x, y)$ . Найти  $k$ .
  - а) Известны особые  $x$  – атака выбранного открытого текста;
  - а) Известны особые  $y$  – атака с использованием шифртекста.
5. Известны  $T, T^{-1}$ , шифртекст  $y$  или пары  $(x, y)$ , некоторая форма преобразования  $T(., k)$ , но неизвестны  $k$  и  $T^{-1}(., k)$  – системы с открытым ключом (Диффи и Хеллман, 1976 г.)

2. *Теоретическая стойкость по Шеннону. Практическая стойкость. Пример совершенного шифра.*

**Теоретическая стойкость** (совершенная секретность) – Система является безопасной против атак противника с неограниченным временем и ресурсами.

**Практическая стойкость** (вычислительная) – Система является безопасной против атак противника в ограниченный период времени с ограниченными ресурсами.

Шеннон определил совершенную секретность условием:

$$P(x|y) = P(x) \quad \forall x \in X, y \in Y,$$

где  $X, Y$  – множества открытых сообщений и возможных шифртекстов.

**Пример совершенного шифра** – шифр гаммирования, в котором равновероятный ключ имеет ту же длину, что и открытый текст. Пусть  $X = \{0, 1\}$ ,  $Y = \{0, 1\}$ ,  $K = \{0, 1\}$ ,  $T(x, k) = (x \oplus k) \pmod{2}$ ,

$$T^{-1}(y, k) = (y \oplus k) \pmod{2}, \quad X \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ p & q \end{pmatrix}, \quad q = 1 - p, \quad Y \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix},$$

$$K \sim \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}, \quad P(Y|X) = \frac{P(X,Y)}{P_X(X)} = \begin{pmatrix} y/x & 0 & 1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}.$$

По формуле Байеса:

$$P(X = x|Y = y) = \frac{P_X(x)P(y|x)}{P(y)} = \frac{P_X(x)}{\frac{1}{2}} = P_X(x).$$



3. Метод полного перебора, его средняя трудоемкость. Параллельное опробование с помощью случайно выбираемого на каждом шагу ключа.

Пусть известны  $T, T^{-1}, (x, y)$ , а ключ неизвестен. **Методом полного перебора** называется поиск решения уравнения  $T(x, k) = y$  перебором по всем  $k \in K$ ,  $|K| < \infty$ .

Определим случайные величины:  $\tau$  – количество опробований ключа включительно до момента обнаружения,  $\xi_i = [\text{ключ на } i\text{-м месте}]$ . Ключ равновероятен, тогда  $P(\xi_i = 1) = \frac{1}{|K|}$  для всех  $i = \overline{1, |K|}$ . **Средняя трудоёмкость МПП:**

$$\mathbb{E}\tau = \sum_{i=1}^{|K|} i P(\xi_i = 1) = \frac{1}{|K|} \sum_{i=1}^{|K|} i = \frac{|K|(|K| + 1)}{|K| \cdot 2} = \frac{|K| + 1}{2}.$$

Пусть параллельно работают  $N$  машин. Если  $t$  – число шагов работы машин, то  $Nt$  – число опробований. Число тактов опробования – случайная величина  $\eta$ . Аналогом является задача о размещении: в каждую из  $|K|$  ячеек может попасть от 0 до  $N$  частиц. Вероятность того, что из комплекта  $i$  ни одна частица не попадёт в данную ячейку, равна  $q = (1 - \frac{1}{|K|})^N$ . Первое попадание в данную ячейку на комплекте с номером  $t$ , означающее, что ключ получен, имеет вероятность  $P(\eta = t) = q^{t-1}(1 - q)$  – с.в.  $\eta$  имеет геометрическое распределение. Тогда **средняя трудоёмкость МПП при параллельном опробовании** равна:

$$\mathbb{E}\eta = \frac{1}{1 - q} = \frac{1}{1 - (1 - \frac{1}{|K|})^N} \approx \{N \ll |K|\} \approx \frac{1}{1 - 1 + \frac{N}{|K|}} = \frac{|K|}{N}.$$

4. Аналитический метод криптоанализа. Треугольные системы и их решение. Линейные системы. Сложность решения методом Гаусса.

Пусть  $K = K_1 \times K_2 \times \dots \times K_r$ ,  $x = (x_1 x_2 \dots x_s)$ ,  $y = (y_1 y_2 \dots y_s)$ ,  $x_i, y_i \in A$ . **Идея аналитического метода** заключается в том, чтобы записать систему уравнений и решить её относительно ключа:

$$\begin{cases} y_1 = f_1(x_1, \dots, x_s, k_1, \dots, k_r) \\ \dots \\ y_s = f_s(x_1, \dots, x_s, k_1, \dots, k_r) \end{cases}$$

Известны  $f_i$  и  $(x, y)$ .

Пусть эту систему можно преобразовать к **треугольной системе**:

$$\begin{cases} g_1(x, y) = h_1(x, y, k_1) \\ g_2(x, y) = h_2(x, y, k_1, k_2) \\ \dots \\ g_r(x, y) = h_r(x, y, k_1, \dots, k_r) \end{cases}$$

1. Опробуем  $k_1 \in K_1$ , число опробований  $\leq |K_1| \Rightarrow$  восстанавливаем  $k_1$ .
2. Опробуем  $k_2 \in K_2$ , число опробований  $\leq |K_2| \Rightarrow$  восстанавливаем  $k_2$ .
- ...
- r. Опробуем  $k_r \in K_r$ , число опробований  $\leq |K_r| \Rightarrow$  восстанавливаем  $k_r$ .

Таким образом, сложность  $\leq |K_1| + |K_2| + \dots + |K_r|$ .

Пусть имеется **линейная система**:

$$\begin{cases} b_{11}k_1 + b_{12}k_2 + \dots + b_{1r}k_r = g_1(x, y) \\ b_{21}k_1 + b_{22}k_2 + \dots + b_{2r}k_r = g_2(x, y) \\ \dots \\ b_{r1}k_1 + b_{r2}k_2 + \dots + b_{rr}k_r = g_r(x, y) \end{cases}$$

Методом Гаусса решается за  $\sum_{k=1}^r k^2 = \frac{r(r+1)(2r+1)}{6} \approx \frac{r^3}{3}$  операций.

5. *Регистр сдвига с нелинейной обратной связью. Линейная сложность. Условия регулярности (теорема с доказательством).*

Последовательность  $\gamma$  называется **линейной рекуррентной последовательностью** (ЛРП) порядка  $r > 0$  над  $GF(2)$ , если она описывается **законом рекурсии**:

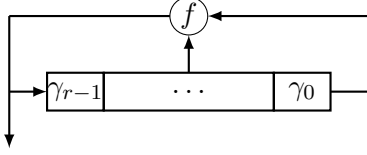
$$\gamma_{n+r} = \sum_{i=0}^{r-1} \alpha_i \gamma_{n+i}, \quad n = 0, 1, \dots$$

$\alpha_i \in GF(2)$ ,  $i = 1, \dots, r-1$  и все операции выполняются в поле  $GF(2)$ .

**Нелинейная рекуррентная последовательность** (НЛРП) определяется выражением:

$$\gamma_{n+r} = f(\gamma_n, \gamma_{n+1}, \dots, \gamma_{n+r-1}), \quad n = 0, 1, \dots$$

**Регистр сдвига с нелинейной обратной связью** (НЛРС) выглядит следующим образом:



Нелинейный регистр сдвига называется **регулярным**, если порождаемая им выходная последовательность  $\gamma$  периодична при любом начальном заполнении регистра.

**Условие регулярности:** если НЛРС регулярен, то для любого начального заполнения существует ЛРС (вида) размера  $v$  ( $v \geq r$ ) такой, что порождаемая им последовательность совпадает с последовательностью, порождаемой при этом начальном заполнении НЛРС.

▣ НЛРС регулярен  $\Rightarrow$  при любом начальном заполнении последовательность  $\gamma$  периодична  $\Rightarrow$  ЛРС вида  $\gamma_{n+T} = \gamma_n$ ,  $n = 0, 1, \dots$  порождает ту же последовательность.

▣

6. Метод “встреча посередине”. Трудоемкость метода. Пример реализации метода “встреча посередине”.

Пусть даны два шифра:  $T_1(x, k_1)$  и  $T_2(z, k_2)$ . Положим

$$y = T_2(T_1(x, k_1), k_2).$$

Ключ  $k = (k_1, k_2)$ , где  $k_1 \in K_1$ ,  $k_2 \in K_2$ ,  $K = K_1 \times K_2$ . Считаем, что в  $T_1$  и  $T_2$  согласованы области определения и области значений.

**Описание метода.** Пусть для пары  $(x, y)$  существует единственный ключ. Составим две таблицы вида:

$$z_1 = T_1(x, k_1^{(1)}) \dots z_{|K_1|} = T_1(x, k_1^{(|K_1|)}),$$

$$z'_1 = T_2^{-1}(y, k_2^{(1)}) \dots z'_{|K_2|} = T_2^{-1}(y, k_2^{(|K_2|)}),$$

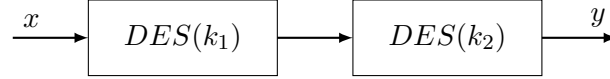
затем объединим их и упорядочим. Пара  $z_i = z'_j$  определяет искомый ключ  $k = (k_1^{(i)}, k_2^{(j)})$ .

**Трудоёмкость метода.** Составление таблицы требует  $|K_1| + |K_2|$  операций опробования. Упорядочивание таблицы размера  $M$  оценивается в  $M \ln M$  операций. Таким образом, средняя трудоёмкость метода равна:

$$(|K_1| + |K_2|)(1 + \ln(|K_1| + |K_2|)).$$

Если  $|K| = N$ ,  $|K_1| = |K_2|$ , можно сделать такую оценку:  $\sqrt{N} \ln N$ .

**Пример.** Рассмотрим двойной *DES* на ключах  $k_1$  и  $k_2$ .



Оценка трудоёмкости  $2^{56} \ln 2^{112} \approx 10^{19} \ll 10^{34} \approx \frac{2^{56} \cdot 2^{56}}{2}$ . Памяти требуется  $2N \approx 10^{17}$ .

7. Метод “разделяй и побеждай”. Трудоёмкость метода. Пример реализации метода.

Ключ  $k = (k_1, k_2)$ , где  $k_1 \in K_1$ ,  $k_2 \in K_2$ ,  $K = K_1 \times K_2$ .

Пусть существует критерий  $h$ :

$$h(x, y, k_1) = \begin{cases} 1, & \exists k_2 \in K_2 : T(x, (k_1, k_2)) = y \\ 0, & \forall k_2 \in K_2 : T(x, (k_1, k_2)) \neq y \end{cases}$$

Пусть известна пара  $(x, y)$  достаточной длины, что  $\exists! k : T(x, k) = y$ .

**Описание метода.** Первым шагом отбракуем элементы множества  $K_1$ , используя критерий  $h$ , и получим единственный  $k_1$ . На это потребуется  $\frac{|K_1|}{2}$  опробований. На втором шаге применяем МПП относительно  $k_2$ , на это уйдёт  $\frac{|K_2|}{2}$  опробований.

**Трудоёмкость метода** равна  $\frac{|K_1| + |K_2|}{2}$ .

**Пример.** Рассмотрим двойной *DES* на ключах  $k_1$  и  $k_2$ , устроенный таким образом, что открытый текст разбивается на блоки и каждый блок перед шифрованием складывается с предыдущим зашифрованным блоком. При этом каждый нечётный блок шифруется с использованием ключа  $k_1$ , а каждый чётный – с  $k_2$ :

$$\text{ОТ } x = x_1 x_2 \dots x_{2N}, \quad |x_i| = 64, \quad i = \overline{1, 2N},$$

$$\text{ШТ } y = y_1 y_2 \dots y_{2N}, \quad y_0 = 0,$$

$$DES(x_{2i+1} \oplus y_{2i}, k_1) = y_{2i+1}, \quad i = \overline{0, N-1},$$

$$DES(x_{2i} \oplus y_{2i-1}, k_2) = y_{2i}, \quad i = \overline{1, N}.$$

Пусть известна пара  $(x, y)$ . Получим следующие два множества:

$$A = \{(x_{2i+1} \oplus y_{2i}, y_{2i+1}), \quad i = \overline{0, N-1}, \quad y_0 = 0\}$$

$$B = \{(x_{2i} \oplus y_{2i-1}, y_{2i}), \quad i = \overline{1, N}\}$$

Определим критерий  $h(x, y, k_1) = 1 \Leftrightarrow DES(x_{2i+1} \oplus y_{2i}, k_1) = y_{2i+1}$ ,  $i = \overline{0, N-1}$ .

Трудоёмкость метода составит  $2^{56}$ .

8. Методы криптоанализа при неравновероятной гамме.

Пусть  $x = x_1x_2 \dots x_n$  – ОТ,  $y = y_1y_2 \dots y_n$  – ШТ,  $\gamma = \gamma_1\gamma_2 \dots \gamma_n$  – ключ, используется шифр гаммирования.

**Метод протяжки вероятностного слова.** Пусть для  $(x, y)$  и  $(x', y')$  использовался один и тот же ключ  $\gamma$ . Тогда:

$$y - y' = (x + \gamma) - (x' + \gamma) = x - x'.$$

Значит, если угадано (или предполагается), что начиная с некоторого места  $i$  в  $x$  стоит слово  $a = a_1a_2 \dots a_r$ , то в  $x'$  на том же месте можно прочесть слово  $a' = a'_1a'_2 \dots a'_r$ , где  $a'_j = y'_{i+j} - y_{i+j} + a_j$ ,  $j = \overline{1, r}$ .

**Метод чтения в колонках** (Зигзагообразное чтение).

Пусть всего используется  $r$  значений гаммы. Составляется таблица, где в каждой строке находится сумма ШТ с некоторым значением гаммы  $\gamma_i$ . Всего таких строк  $r$  штук. Криптоаналитик пытается восстановить ОТ, выбирая буквы из столбцов так, чтобы получался осмысленный читаемый текст.

**Таблица ШТ.**

$\gamma_1$	$x_1^{(1)}$	$x_2^{(1)}$	.....	$x_n^{(1)}$
$\gamma_2$	$x_1^{(2)}$	$x_2^{(2)}$	.....	$x_n^{(2)}$
.....	.....	.....	.....	.....
$\gamma_r$	$x_1^{(r)}$	$x_2^{(r)}$	.....	$x_n^{(r)}$

9. Первая теорема Шеннона (теорема с доказательством).

Пусть  $p(a_1) \dots p(a_m)$  – вероятности появления букв на фиксированном месте  $i$  в открытом сообщении длины  $n$ . Предположим, что буквы в сообщении появляются независимо друг от друга с одним и тем же распределением. Обозначим через  $\nu_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  частоты букв  $a_1 \dots a_m$  в последовательности  $x$  (ОТ). Тогда вероятность выбора  $x$  в нашей схеме равна

$$P(x) = p^{\nu_1}(a_1) \cdot \dots \cdot p^{\nu_m}(a_m).$$

Будем считать, что  $p(a_i) > 0$ ,  $H = -\sum_{i=1}^m p(a_i) \log_2 p(a_i)$ .

**Теорема 1.** Для любых  $\epsilon > 0$  и  $\delta > 0$  можно найти такое  $n_0$ , что для любого  $n > n_0$  последовательности из  $V_n$  распадаются на два непересекающихся класса  $B$  и  $\overline{B}$  так, что:

$$\begin{aligned} 1) & P(\overline{B}) < \epsilon \\ 2) & \left| \frac{\log_2 P^{-1}(x)}{n} - H \right| < \delta, \quad \forall x \in B \end{aligned}$$

■ Возьмём произвольные малые  $\epsilon > 0$  и  $\delta > 0$  и рассмотрим события

$$\overline{B}_i = \{x \in V_n, |\nu_i - np(a_i)| > \delta n\}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Эти события означают, что в слове длины  $n$  реальная частота встречаемости буквы  $a_i$  отличается от её теоретической встречаемости больше, чем на  $\delta n$ . Из ЗБЧ следует, что  $\exists n_0^{(i)} : \forall n > n_0^{(i)} \Rightarrow P(\overline{B}_i) < \frac{\epsilon}{m}$  (точнее, из неравенства Чебышёва:  $P(|X - \mu| \geq k\sigma) \leq \frac{1}{k^2}$ ). Определим  $\overline{B} = \bigcup_{i=1}^m \overline{B}_i$ . Тогда:

$$P(\overline{B}) = P\left(\bigcup_{i=1}^m \overline{B}_i\right) \leq \sum_{i=1}^m P(\overline{B}_i) < \epsilon, \quad \forall n > \max_i(n_0^{(i)}).$$

Первое утверждение доказано. Рассмотрим теперь следующее представление множества  $B$ :

$$B = \overline{\overline{B}} = \overline{\bigcup_{i=1}^m \overline{B}_i} = \bigcap_{i=1}^m \overline{\overline{B}_i} = \bigcap_{i=1}^m B_i,$$

$$B_i = \{x \in V_n, |\nu_i - np(a_i)| \leq \delta n\}, \quad i = \overline{1, m}.$$

Обозначим за  $\alpha_i = \nu_i - np(a_i)$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Тогда  $|\alpha_i| \leq \delta n$ . Выразим вероятность выбора ОТ через  $\alpha_i$  (см. выражение перед теоремой):

$$P(x) = p^{\alpha_1 + np(a_1)}(a_1) \cdot \dots \cdot p^{\alpha_m + np(a_m)}(a_m) = \prod_{i=1}^m p^{\alpha_i + np(a_i)}(a_i).$$

Тогда получим:

$$\begin{aligned} \log_2 \frac{1}{P(x)} &= \log_2 \prod_{i=1}^m p^{-\alpha_i - np(a_i)}(a_i) = - \sum_{i=1}^m (\alpha_i + np(a_i)) \log_2 p(a_i) = \\ &= -n \sum_{i=1}^m p(a_i) \log_2 p(a_i) - \sum_{i=1}^m \alpha_i \log_2 p(a_i) = nH - \sum_{i=1}^m \alpha_i \log_2 p(a_i) \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \left| \frac{\log_2 P^{-1}(x)}{n} - H \right| &= \left| -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \alpha_i \log_2 p(a_i) \right| \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m |\alpha_i| |\log_2 p(a_i)| < \\ &< \delta \sum_{i=1}^m |\log_2 p(a_i)| = \delta \cdot c \end{aligned}$$

Поскольку  $p(a_i) > 0$ , сумма конечна и является константой (от  $n$  не зависит).



#### 10. Вторая теорема Шеннона (теорема с доказательством).

Упорядочим множество всех возможных последовательностей по убыванию вероятности возможности появления их в качестве открытого текста. Определим множество наиболее вероятных ОТ для  $0 < \epsilon < 1$  таким образом:

$$Q_n(\epsilon) \subseteq V_n : P(Q_n(\epsilon)) \geq 1 - \epsilon, \forall y \in Q_n(\epsilon) : P(Q_n(\epsilon) \setminus y) < 1 - \epsilon.$$

Обозначим  $\beta_n(\epsilon) = |Q_n(\epsilon)|$ .

Докажем, что множество  $Q_n(\epsilon)$  содержит минимальное число последовательностей среди всех множеств  $C$ , таких что  $P(C) \geq 1 - \epsilon$ .

От противного. Пусть  $Q_n(\epsilon)$  – не минимальное множество. Это означает  $|C \setminus Q_n(\epsilon)| < |Q_n(\epsilon) \setminus C|$ . По определению  $Q_n(\epsilon)$ , в нём содержатся наиболее вероятные последовательности. Тогда  $\forall x \in Q_n(\epsilon), x \notin C$  и  $\forall y \notin Q_n(\epsilon), y \in C$  справедливо  $P(x) \geq P(y)$ . Следовательно:

$$\sum_{y \in C \setminus Q_n(\epsilon)} P(y) < \sum_{x \in Q_n(\epsilon) \setminus C} P(x),$$

поскольку справа слагаемых хотя бы на 1 больше и все они не меньше слагаемых в левой сумме.

Пусть  $x_0 = \min_{x \in Q_n(\epsilon) \setminus C} P(x)$ . Значит,

$$P(C \setminus Q_n(\epsilon)) = \sum_{y \in C \setminus Q_n(\epsilon)} P(y) \leq \sum_{x \in Q_n(\epsilon) \setminus (C \cup \{x_0\})} P(x) = P(Q_n(\epsilon) \setminus (C \cup \{x_0\})).$$

$$Q_n(\epsilon) \setminus \{x_0\} = (Q_n(\epsilon) \cap C) \cup ((Q_n(\epsilon) \setminus C) \setminus \{x_0\}) \text{ (очев.)}$$

$$P(Q_n(\epsilon) \setminus \{x_0\}) < 1 - \epsilon \text{ (опр.)}$$

$$\begin{aligned} P(C) &= P(C \cap Q_n(\epsilon)) + P(C \setminus Q_n(\epsilon)) \leq P(C \cap Q_n(\epsilon)) + \\ &\quad + P(Q_n(\epsilon) \setminus (C \cup \{x_0\})) = P(Q_n(\epsilon) \setminus \{x_0\}) < 1 - \epsilon \end{aligned}$$

Получили  $P(C) < 1 - \epsilon$  – противоречие, значит,  $Q_n(\epsilon)$  – минимальное множество.

**Теорема 2.**  $\forall \epsilon > 0$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log_2 \beta_n(\epsilon)}{n} = H$$

■ Возьмём малое  $\delta > 0$  и рассмотрим множество  $B$  из первой теоремы Шеннона. Тогда,  $\forall x \in B$  по этой теореме получим:

$$\begin{aligned} \left| \frac{\log_2 P^{-1}(x)}{n} - H \right| < \delta &\Rightarrow H - \delta < \frac{-\log_2 P(x)}{n} < H + \delta \Rightarrow \\ \Rightarrow -n(H + \delta) < \log_2 P(x) < -n(H - \delta) &\Rightarrow 2^{-n(H+\delta)} < P(x) < 2^{-n(H-\delta)} \end{aligned}$$

Так как  $B$  и  $\bar{B}$  не пересекаются, можно записать:

$$\begin{aligned} P(Q_n(\epsilon)) &= \sum_{x \in Q_n(\epsilon)} P(x) = \sum_{x \in Q_n(\epsilon) \cap B} P(x) + \sum_{x \in Q_n(\epsilon) \cap \bar{B}} P(x) < \\ &< \sum_{x \in Q_n(\epsilon) \cap B} 2^{-n(H-\delta)} + P(\bar{B}) = |Q_n(\epsilon) \cap B| 2^{-n(H-\delta)} + P(\bar{B}) < \\ &< |Q_n(\epsilon)| 2^{-n(H-\delta)} + \epsilon = \beta_n(\epsilon) 2^{-n(H-\delta)} + \epsilon \end{aligned}$$

По определению:

$$1 - \epsilon \leq P(Q_n(\epsilon)) < \beta_n(\epsilon) 2^{-n(H-\delta)} + \epsilon \Rightarrow \beta_n(\epsilon) > 2^{n(H-\delta)}(1 - 2\epsilon)$$

С другой стороны,

$$\beta_n(\epsilon) = |Q_n(\epsilon)| \leq |B| = \sum_{x \in B} 1 < \sum_{x \in B} \frac{P(x)}{2^{-n(H+\delta)}} \leq 2^{n(H+\delta)}$$

Тогда

$$\begin{aligned} 2^{n(H-\delta)} < \beta_n(\epsilon) < 2^{n(H+\delta)} &\Rightarrow H - \delta < \frac{\log_2 \beta_n(\epsilon)}{n} < H + \delta \Rightarrow \\ \Rightarrow \left| \frac{\log_2 \beta_n(\epsilon)}{n} - H \right| < \delta &\Rightarrow \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\log_2 \beta_n(\epsilon)}{n} = H. \end{aligned}$$





11. Модель открытого текста, оценка числа открытых текстов.

**Модель открытого текста.** Пусть  $p(a_1) \dots p(a_m)$  – вероятности появления букв на фиксированном месте  $i$  в открытом сообщении длины  $n$ . Предположим, что буквы в сообщении появляются независимо друг от друга с одним и тем же распределением. Обозначим через  $\nu_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  частоты букв  $a_1 \dots a_m$  в последовательности  $x$  (ОТ). Тогда вероятность выбора  $x$  в нашей схеме равна

$$P(x) = p^{\nu_1}(a_1) \cdot \dots \cdot p^{\nu_m}(a_m).$$

Будем считать, что  $p(a_i) > 0$ ,  $H = -\sum_{i=1}^m p(a_i) \log_2 p(a_i)$ .

Возьмём произвольные малые  $\epsilon > 0$  и  $\delta > 0$  и рассмотрим события

$$B_i = \{x \in V_n, |\nu_i - np(a_i)| \leq \delta n\}, \quad i = \overline{1, m},$$

$$\overline{B}_i = \{x \in V_n, |\nu_i - np(a_i)| > \delta n\}, \quad i = \overline{1, m}.$$

**Оценка по теореме Шеннона.** Множество ОТ можно представить как  $X = B \cup \overline{B}$ . Из первой теоремы Шеннона следует, что  $\overline{B}$  имеет очень малую вероятность ( $P(\overline{B}) \ll 1$ ). Из той же теоремы следует свойство равномерности: для каждого  $x \in B$  справедливо  $P(x) \approx 2^{-nH}$ . Таким образом,  $|\overline{B}| \approx 0$  и  $|B| \approx 2^{nH}$ . Тогда число ОТ можно оценить как  $|X| \approx 2^{nH}$ .

12. Перекрытия гаммы. Средняя длина цикла с данной точкой в случайной подстановке.

**Перекрытия гаммы.** Пусть  $x = x_1 x_2 \dots x_n$  – ОТ,  $y = y_1 y_2 \dots y_n$  – ШТ,  $\gamma = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_n$  – ключ, используется шифр гаммирования. Есть две различные пары  $(x, y)$  и  $(x', y')$ . Какова вероятность перекрытия?

Пусть  $p(a_1) \dots p(a_m)$  – вероятности появления букв на фиксированном месте  $i$  в открытом сообщении длины  $n$  (распределение  $P$ ). Тогда с.в.  $\xi = x - x'$  имеет распределение  $P^* = P * P$  – свёртка  $P$  с  $P$ .

В случае, если имеется перекрытие, получим  $y - y' = x - x'$  – имеет то же распределение  $P^*$ .

Если перекрытия нет, то  $y - y' = (x - x') + (\gamma - \gamma')$ . Поскольку гамма выбирается равновероятно, то  $\gamma - \gamma'$  тоже имеет равновероятное распределение, а следовательно, и  $y - y'$ .

Пусть есть статистический критерий, проверяющий гипотезу  $H_0$  о равновероятности  $y - y'$  против альтернативы  $H_1$ , что  $y - y'$  имеет распределение  $P^*$ . Тогда принятие гипотезы  $H_0$  будет означать отсутствие перекрытия гаммы, а принятие  $H_1$  – наличие перекрытия.

**Средняя длина цикла с данной точкой в случайной подстановке.** Гамму получают с помощью конечного автомата  $A$  без входа, в котором начальное состояние является ключом  $k$ . Из-за конечности множества состояний автомата обязательно возникнет период. Пусть  $A$  – равновероятная подстановка на множестве  $\{1, \dots, n\}$ . Оценим количество шагов автомата до того, как он попадёт обратно в состояние  $k$ .

Пусть  $t$  – длина полученного цикла. Введём случайную величину

$$\xi_i = \begin{cases} 1, & t = i \\ 0, & t \neq i \end{cases}.$$

Тогда  $t = \sum_{i=1}^n i\xi_i$  и  $\mathbb{E}t = \sum_{i=1}^n i\mathbb{E}\xi_i$ .

Получим  $P(\xi_i = 1)$ . Для того, чтобы цикл был длины  $i$ , можно выбрать  $i - 1$  состояний случайным образом (начальное состояние фиксировано –  $k$ ) –  $C_{n-1}^{i-1}$ , расположить их же случайным образом –  $(i - 1)!$  и случайно расположить оставшиеся состояния –  $(n - i)!$ . При этом всего различных автоматов (-перестановок) длины  $n - n!$  штук.

$$P(\xi_i = 1) = \frac{C_{n-1}^{i-1}(i-1)!(n-i)!}{n!} = \frac{(n-1)!(i-1)!(n-i)!}{(i-1)!(n-i)!n!} = \frac{1}{n}$$

$$\mathbb{E}\xi_i = 1 \cdot P(\xi_i = 1) + 0 \cdot P(\xi_i = 0) = P(\xi_i = 1) = \frac{1}{n}$$

Следовательно,

$$\mathbb{E}t = \sum_{i=1}^n i\mathbb{E}\xi_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i = \frac{1}{n} \cdot \frac{n(n+1)}{2} = \frac{n+1}{2}.$$

### 13. Линейный криптоанализ блочных шифров.

Рассмотрим схему произвольного итеративного блочного шифра в  $i$ -ом раунде:  $\vec{Y}(i) = E(\vec{X}(i), \vec{K}(i))$ , где  $E$  – функция шифрования,  $\vec{X}(i)$  – блок открытого текста в  $i$ -ом раунде,  $\vec{Y}(i)$  – блок шифртекста,  $\vec{K}(i)$  – подключ, используемый в  $i$ -ом раунде.  $\vec{Y}(i), \vec{X}(i) \in V_n$ ,  $\vec{K}(i) \in V_m$ ,  $n$  – размер блока,  $m$  – размер подключа.

Обозначим через  $(\vec{X}, \vec{\alpha}) = X_1\alpha_1 \oplus \dots \oplus X_n\alpha_n = X_{i_1} \oplus \dots \oplus X_{i_k} = X[i_1, \dots, i_k]$  – скалярное произведение двоичных векторов  $\vec{X}$  и  $\vec{\alpha}$ , где  $(\alpha_{i_1}, \dots, \alpha_{i_k})$  – единичные координаты вектора  $\vec{\alpha}$ .

**Линейным статистическим аналогом нелинейной функции E (ЛСА)** называется случайная величина

$$S(i) = (\vec{Y}(i), \alpha(i)) \oplus (\vec{X}(i), \beta(i)) \oplus (\vec{K}(i), \gamma(i)),$$

для которой  $P(S(i) = 1) = p \neq \frac{1}{2}$  для произвольного  $\vec{X}(i)$ .

$\Delta(S(i)) = |1 - 2p|$  – **эффективность линейного стат. аналога.**

**Эффективным линейным статистическим аналогом (ЭЛСА)** называется линейный статистический аналог

$$S_{1\dots n} = (\vec{X}(1), \vec{\alpha}) \oplus (\vec{Y}(n), \vec{\beta}) \oplus \sum_{i=1}^n (\vec{K}(i), \vec{\gamma}(i))$$

из заданного множества с наибольшим  $\Delta$ .

**Задачи линейного криптоанализа:**

1. Найти ЭЛСА и вычислить его вероятность.
2. Определить несколько или все биты ключа с помощью ЭЛСА.

**Задача нахождения ЭЛСА для S-боксов DES.**  $\vec{Y} \in V_4$ ,  $\vec{X}, \vec{K} \in V_6$ . Нелинейная функция, реализующая S-бокс может быть записана в виде

$$\vec{Y} = F_a(\vec{X} \oplus \vec{K}), \quad a = \overline{1, 8}$$

Пусть  $1 \leq i < 64$ ,  $1 \leq j < 16$ , а  $\vec{k}$  – двоичное представление числа  $k \in \mathbb{N}$ . ЛСА для каждого из таких уравнений будет уравнение вида

$$(\vec{Y}, \vec{j}) = (\vec{X} \oplus \vec{K}, \vec{i}).$$

Обозначим через  $S_a(i, j)$  число ненулевых  $\vec{X} \in V_6$  для  $a$ -го S-бокса DES таких, что выполняется указанное уравнение. Пусть

$$S_a^*(i^*, j^*) : |S_a^*(i^*, j^*) - 32| = \max_{1 \leq i < 64, 1 \leq j < 16} |S_a(i, j) - 32|.$$

Тогда уравнение

$$(\vec{Y}, \vec{j}^*) = (\vec{X} \oplus \vec{K}, \vec{i}^*)$$

является ЭЛСА  $a$ -го S-бокса в классе всех ЛСА указанного вида с вероятностью

$$p_a = \frac{S_a^*(i^*, j^*)}{64}.$$

#### 14. Дифференциальный криптоанализ блочных шифров.

Пусть есть схема блочного шифра, состоящая из  $r$  блоков длины  $N$ , где выход одного блока соединяется с входом другого, ключи  $\vec{Z} = (Z(1), \dots, Z(r))$  получаются по некоторой схеме из  $Z_0$  или выбираются независимо равномерно. Пусть  $X(1), X^*(1)$  – пара ОТ,  $Y(i), Y^*(i)$  – соответствующие им ШТ на  $i$ -ом цикле,

$$\Delta X(1) = X(1) - X^*(1)$$

$$\Delta Y(i) = Y(i) - Y^*(i)$$

**Идея дифференциального криптоанализа** заключается в том, чтобы найти такие  $\Delta X(1)$ , что при случайном равновероятном выборе  $X(1), Z(1), \dots, Z(r-1)$  с вероятностью более  $\frac{1}{2^N}$  появится  $\Delta Y(r-1)$ .

Преобразование  $f$  называется **криптографически слабым**, если по  $\Delta Y(r-1), Y(r)$  и  $Y^*(r)$  для некоторого (малого) числа пар  $(X(1), X^*(1))$  можно найти (хотя бы часть)  $Z(r)$ .

Пара  $(\alpha, \beta)$  возможных значений вектора  $(\Delta X(1), \Delta Y(i))$  называется **дифференциалом  $i$ -го цикла**.

Пусть  $f$  определяет операции в  $\Delta$  и  $f$  криптографически слаба. Тогда возможна следующая атака.

1. Выбираем дифференциал  $(r-1)$ -го цикла  $(\alpha, \beta)$ , для которого вероятность  $P(\Delta Y(r-1) = \beta \mid \Delta X(1) = \alpha)$  большая.
2. Случайно выбираем  $X(1)$  и подбираем  $X^*(1)$ , чтобы  $\Delta X(1) = \alpha$ . Пусть известны  $Y(r)$  и  $Y^*(r)$ .
3. Делаем предположение, что  $\Delta Y(r-1) = \beta$  и, зная  $Y(r)$  и  $Y^*(r)$ , находим  $Z(r)$ .
4. Повторяем 2 и 3, пока один (частичный) ключ не начнет появляться чаще других. Это и будет  $Z(r)$ .
5. Повторяем 1-4 до нахождения полного ключа.

#### 15. Метод коллизий для хэш-функций (теорема с доказательством).

Пусть  $A = \{a_1, \dots, a_m\}$  – алфавит,  $A^*$  – множество слов конечной длины в алфавите  $A$ . Пусть  $H : A^* \leftarrow A^l$  – хэш-функция.  $N = |A^l|$ .

Используется задача о днях рождения. Пусть у злоумышленника есть два сообщения:  $M$  – то, которое жертва подпишет, и  $M'$  – то, которое злоумышленнику нужно подписать. Варьируя стилем, шрифтом,

интервалами и т.д. получаем  $n$  различных вариантов каждого из сообщений с сохранением смысла. Затем, просматривая пары, злумышленник ищет совпадение:

$$H(M_i) = H(M'_j), \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, n}$$

**Теорема.** Пусть  $N, n \rightarrow \infty$ , но  $\frac{n^2}{N} \rightarrow t > 0$ , тогда:

$$p = (1 - e^{-t})(1 + o(1)).$$

■ Найдём вероятность того, что при наборе из  $n$  таких пар не окажется ни одного совпадения. Мы выбираем  $n$  хэшей  $H(M_i)$  из множества  $A^l$  ( $C_N^n$  вариантов). Поскольку нет ни одного совпадения, то по правой стороне выбираем  $n$  хэшей из множества  $A^l \setminus \{H(M_1), \dots, H(M_n)\}$  ( $C_{N-n}^n$  вариантов). Всего возможных вариантов выбора  $(C_N^n)^2$ . Таким образом,

$$1 - p = \frac{C_N^n C_{N-n}^n}{(C_N^n)^2} = \frac{(N-n)!n!(N-n)!}{n!(N-2n)!N!} = \frac{[(N-n)!]^2}{N!(N-2n)!}.$$

Используем формулу Стирлинга:

$$\begin{aligned} 1 - p &= \frac{[(N-n)!]^2}{N!(N-2n)!} = \\ &= \frac{\left[\left(\frac{N-n}{e}\right)^{N-n} \sqrt{2\pi(N-n)}\right]^2 (1+o(1))}{\left(\frac{N}{e}\right)^N \sqrt{2\pi N} \left(\frac{N-2n}{e}\right)^{N-2n} \sqrt{2\pi(N-2n)} (1+o(1))} = \\ &= \frac{\left(1 - \frac{n}{N}\right)^{2N-2n}}{\left(1 - \frac{2n}{N}\right)^{N-2n}} (1+o(1)) \end{aligned}$$

Отсюда, используя разложение логарифма в ряд:

$$\begin{aligned} \ln(1-p) &= [(2N-2n) \ln\left(1 - \frac{n}{N}\right) - (N-2n) \ln\left(1 - \frac{2n}{N}\right)](1+o(1)) = \\ &= [(2N-2n)\left(-\frac{n}{N} - \frac{n^2}{2N^2} + O\left(\frac{n^3}{N^3}\right)\right) - (N-2n)\left(-\frac{2n}{N} - \frac{2n^2}{N^2} + O\left(\frac{n^3}{N^3}\right)\right)](1+o(1)) = \\ &= -\frac{n^2}{N}(1+o(1)) = -t(1+o(1)) \end{aligned}$$

Следовательно,

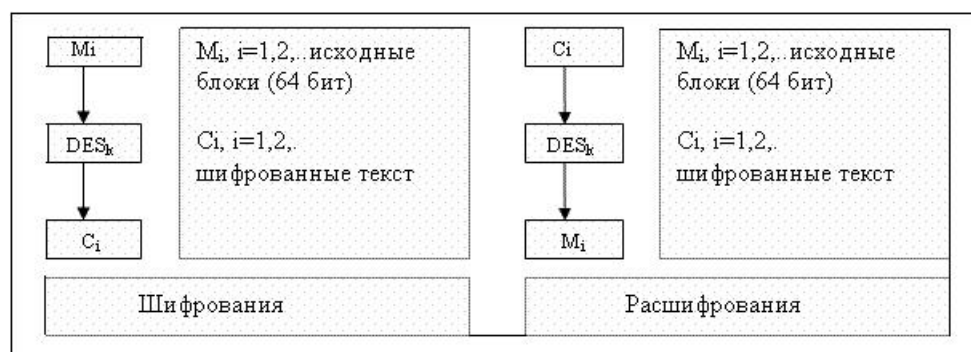
$$\begin{aligned} 1 - p &= e^{-t}(1+o(1)), \\ p &= (1 - e^{-t})(1+o(1)). \end{aligned}$$



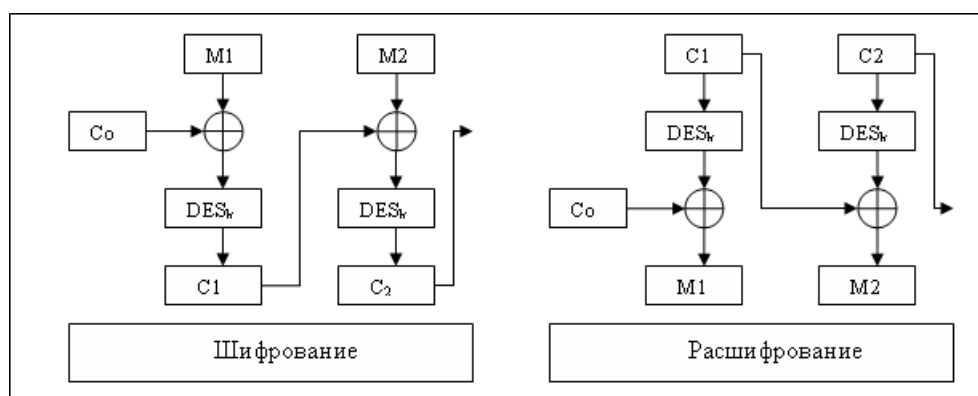
### 16-20. Атаки на тройной DES.

#### Режимы использования DES.

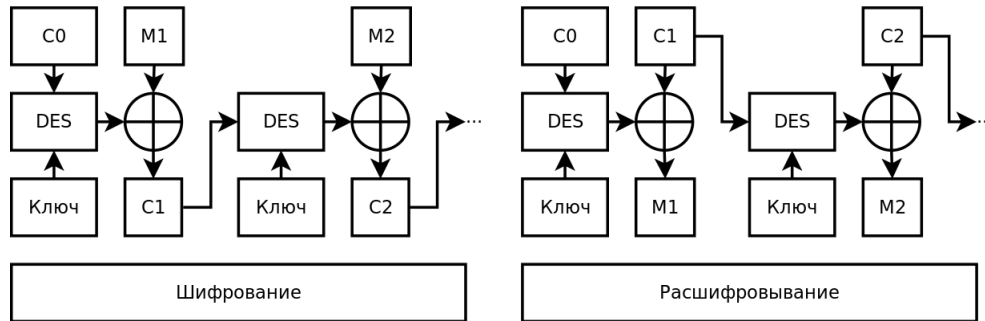
Режим электронной кодовой книги (ECB – Electronic Codebook):



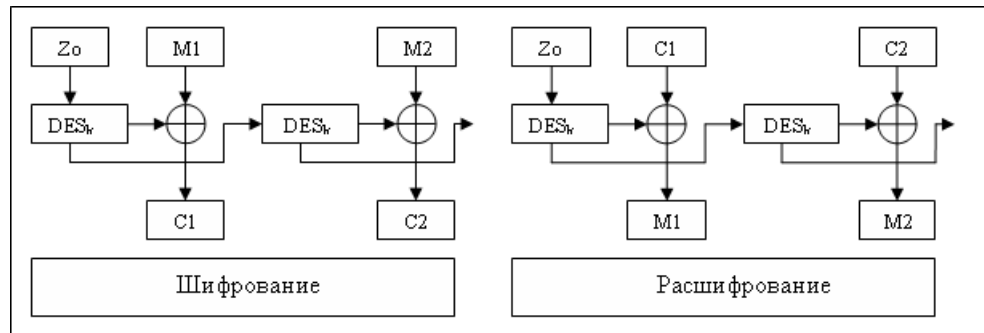
Режим сцепления блоков шифротекста (CBC – Cipher Block Chaining):



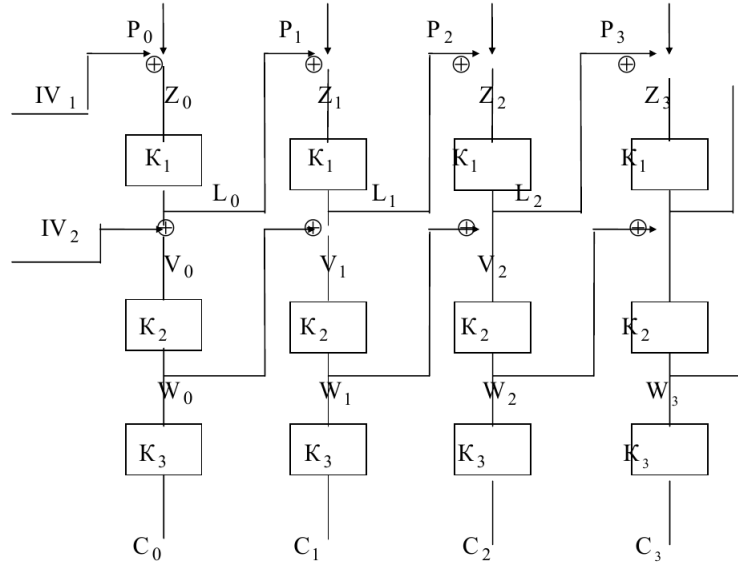
Режим обратной связи по шифротексту (CFB – Cipher Feedback):



Режим обратной связи по выходу (OFB – Output Feedback):



16. Атака на тройной DES в режиме CBC/CBC/ECB.



Используется атака выбранного шифротекста. Сначала будем искать ключ  $K_3$ . Среди всех ШТ выберем две тройки блоков следующего вида:  $(C_0, C_1, C_2)$  и  $(C_0^*, C_1, C_2)$ , где  $C_0 \neq C_0^*$ .

Для первой тройки обозначим за  $Z_i, V_i, W_i$  – входы первого, второго и третьего блоков соответственно,  $L_i$  – выход первого блока,  $P_i$  – ОТ. Те же обозначения для второй тройки со звездочкой:  $Z_i^*, V_i^*, W_i^*, L_i^*, P_i^*$ .

Так как  $C_1 = C_1^*, C_2 = C_2^*$ , то  $W_1 = W_1^*, W_2 = W_2^*, V_1 = V_1^*, V_2 = V_2^*$ . Тогда  $L_2 = L_2^*$  и  $Z_2 = Z_2^*$ . Видно, что

$$W_0 \oplus L_1 = V_1, \quad W_0^* \oplus L_1^* = V_1^* \Rightarrow W_0 \oplus W_0^* = L_1 \oplus L_1^*$$

$$P_2 \oplus L_1 = Z_2, \quad P_2^* \oplus L_1^* = Z_2^* \Rightarrow P_2 \oplus P_2^* = L_1 \oplus L_1^*$$

Окончательно получим:

$$P_2 \oplus P_2^* = W_0 \oplus W_0^* = DES_{K_3}^{-1}(C_0) \oplus DES_{K_3}^{-1}(C_0^*)$$

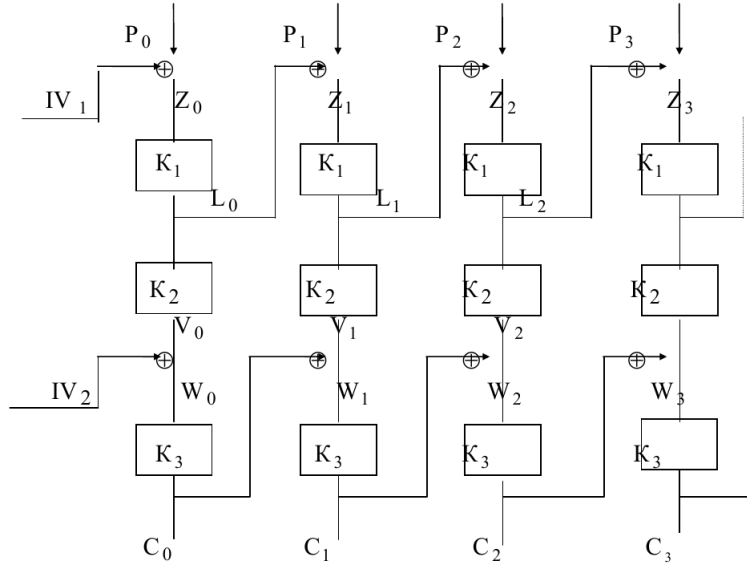
Поскольку мы выбрали ШТ (а значит, знаем ОТ), мы можем совершить  $2^{55}$  опробований в среднем, чтобы получить  $K_3$ .

Вероятность найти  $C_1 = C_1^*, C_2 = C_2^*$  равна  $\frac{1}{2^{128}}$ . А значит, по задаче о днях рождения вероятность хоть какой-нибудь пары  $\sqrt{\frac{1}{2^{128}}} = \frac{1}{2^{64}}$ . Тогда потребуется  $2^{64}$  блоков ШТ.



Для извлечения всего ключа требуется  $3 * 2^{55}$  операций опробования и  $3 * 2^{64}$  блоков ШТ.

17. Атака на тройной DES в режиме CBC/ECB/CBC.



Используется линейный криптоанализ. Пусть найдено достаточно много шифртекстов  $(C_0, C_1, C_2)$ , где  $C_1$  и  $C_2$  фиксированы, а  $C_0$  произвольные и различные.

1. Ищем  $K_2$ . Можно заметить, что  $W_1 = C_0 \oplus V_1$ ,  $V_1 = DES_{K_2}(L_1)$ . Тогда  $L_1 = DES_{K_2}^{-1}(C_0 \oplus W_1)$ . Учитывая  $L_1 \oplus P_2 = Z_2$ , получим

$$P_2 = DES_{K_2}^{-1}(C_0 \oplus W_1) \oplus Z_2$$

Пусть  $D^*$  – ЛСА  $DES_{K_2}^{-1}$ . Тогда, набрав достаточно уравнений, статистически выделим решение  $K_2, W_1$  и  $Z_2$ .

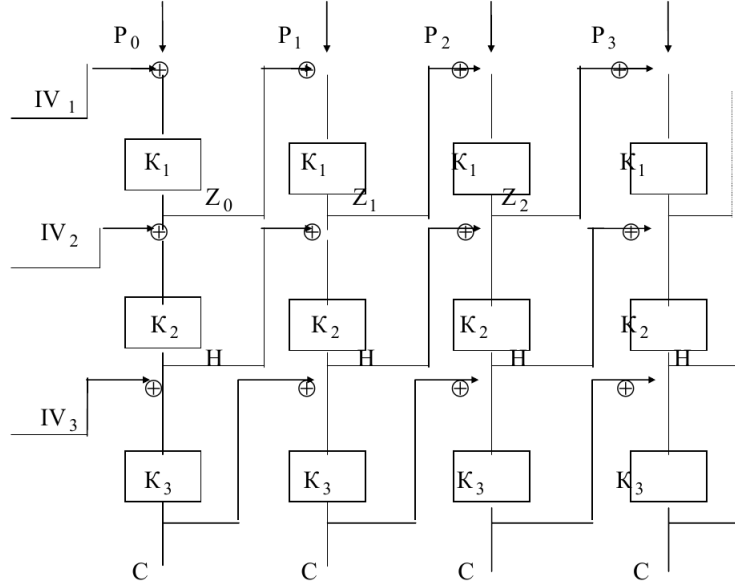
2. Ищем  $K_3$ . С помощью МПП  $DES_{K_3}(W_1) = C_1$ .

3. Ищем  $K_1$ . Получим  $L_1$ :

$$L_2 = DES_{K_2}^{-1}(C_1 \oplus W_2) = DES_{K_2}^{-1}(C_1 \oplus DES_{K_3}^{-1}(C_2))$$

И далее МПП  $DES_{K_1}(Z_2) = L_2$ .

18. Атака на тройной DES в режиме CBC/CBC/CBC.



Атака, основанная на задаче о днях рождения. Пусть найдено  $2^{33}$  шифртекстов вида  $(C, C, C, C)$ . Сначала ищем  $K_3$ .

На выходе второго блока имеем  $(?, H, H, H)$ , где  $H = C + DES_{K_3}^{-1}(C)$ .  $H$  – не взаимно-однозначное отображение, тогда для одного и того же  $H$  с большой вероятностью (по задаче о днях рождения) найдутся различные  $C$  и  $C^*$ , при этом у них будет один и тот же  $P_3$ :

$$Z_2 = H \oplus DES_{K_2}^{-1}(H)$$

$$DES_{K_1}(P_3 \oplus Z_2) = H \oplus DES_{K_2}^{-1}(H)$$

Тогда

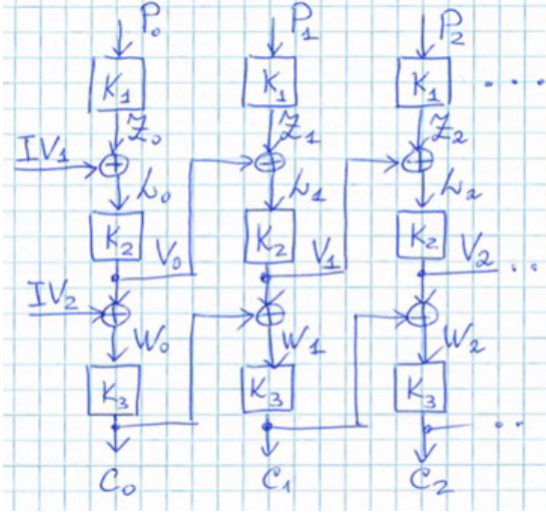
$$P_3 = DES_{K_1}^{-1}(H \oplus DES_{K_2}^{-1}(H)) \oplus DES_{K_2}^{-1}(H) \oplus H$$

Для такой пары  $C, C^*$  получим уравнение:

$$C + DES_{K_3}^{-1}(C) = C^* + DES_{K_3}^{-1}(C^*)$$

Решив его МПП, получим  $K_3$ . Аналогично остальные ключи.

## 19. Атака на тройной DES в режиме ECB/CBC/CBC.



Атака использует дифференциальный криптоанализ. Сначала будем искать ключ  $K_1$ . Среди всех ШТ выберем две тройки блоков следующего вида:  $(C_0, C_1, C_2)$  и  $(C_0^*, C_1, C_2)$ , где  $C_0 \neq C_0^*$ . Пусть  $\Delta = C_0 \oplus C_0^*$ .

Для первой тройки обозначим за  $Z_i, V_i, W_i$  – входы первого, второго и третьего блоков соответственно,  $L_i$  – выход первого блока,  $P_i$  – ОТ. Те же обозначения для второй тройки со звездочкой:  $Z_i^*, V_i^*, W_i^*, L_i^*, P_i^*$ .

Так как  $C_1 = C_1^*, C_2 = C_2^*$ , то  $W_1 = W_1^*, W_2 = W_2^*, V_2 = V_2^*, L_2 = L_2^*$ . Тогда

$$V_1 = C_0 \oplus DES_{K_3}^{-1}(C_1), V_1^* = C_0 \oplus \Delta \oplus DES_{K_3}^{-1}(C_1) \Rightarrow V_1^* = V_1 \oplus \Delta$$

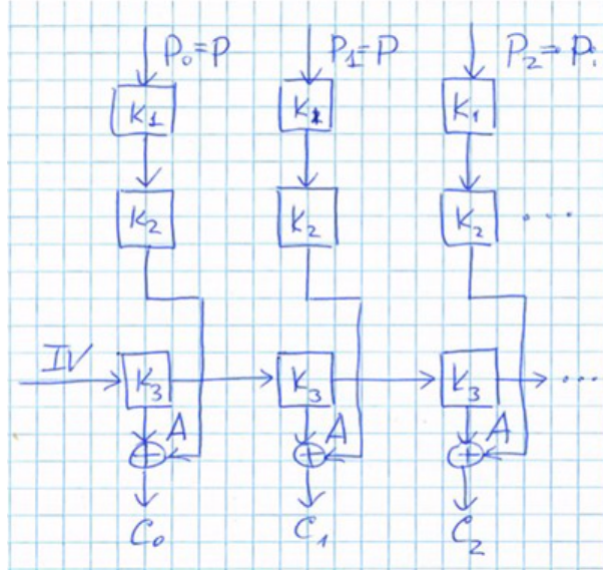
$$Z_2 = L_2 + V_1, Z_2^* = L_2^* + V_1^* \Rightarrow Z_2^* = Z_2 \oplus \Delta$$

Далее находим  $K_1$ , используя дифференциальный криптоанализ из

$$DES_{K_1}(P_2) \oplus DES_{K_1}(P_2^*) = C_0 \oplus C_0^*$$

Затем последовательно находим остальные ключи.

## 20. Атака на тройной DES в режиме ECB/ECB/OFB.



Сначала ищем ключ  $K_3$ . Выбираем произвольное  $\vec{P} = (P, \dots, P)$  из  $2^{64}$  одинаковых блоков, пусть ему соответствует  $C = (C_0, \dots, C_{2^{64}-1})$ . Период режима OFB  $\leq 2^{64}$ . Обозначим  $A = DES_{K_2}(DES_{K_1}(P))$  и поток OFB  $= v_0, \dots, v_{2^{64}-1}$ . Тогда  $C_i = v_i \oplus A$ . Таким образом, можно найти разности OFB-блоков:

$$C_0 \oplus C_1 = v_0 \oplus v_1, \dots, C_{2^{64}-2} \oplus C_{2^{64}-1} = v_{2^{64}-2} \oplus v_{2^{64}-1}$$

1. Выбираем произвольное  $u_0 = v_i$ .
2. Перебирая  $K$ , вычисляем  $u_1 = DES_K(u_0)$ ,  $u_2 = DES_K(u_1)$ . Далее находим  $u_0 \oplus u_1$ ,  $u_1 \oplus u_2$ , расположенные последовательно, в указанном выше ряде. Если такой пары нет, то либо  $K \neq K_3$ , либо  $u_0$  не принадлежит периоду OFB. Перебрав все  $K$ , но не найдя такой пары, меняем  $u_0$ . Ожидается, что опробований  $u_0$  будет  $2^{64}/\text{порядок OFB}$ .
3. Как только нашли такие  $u_0$  и  $K$ :  $K_3 = K$ ,  $v_i = u_0$ ,  $v_{i+1} = u_1$ . Получаем весь цикл OFB, что даёт нам возможность атаковать двойной DES в режиме ECB методом "встречи посередине".

**Сложность атаки:** Кол-во ОТ/кол-во шагов/память  $= 2^{64}/2^{58}/2^{56}$ .