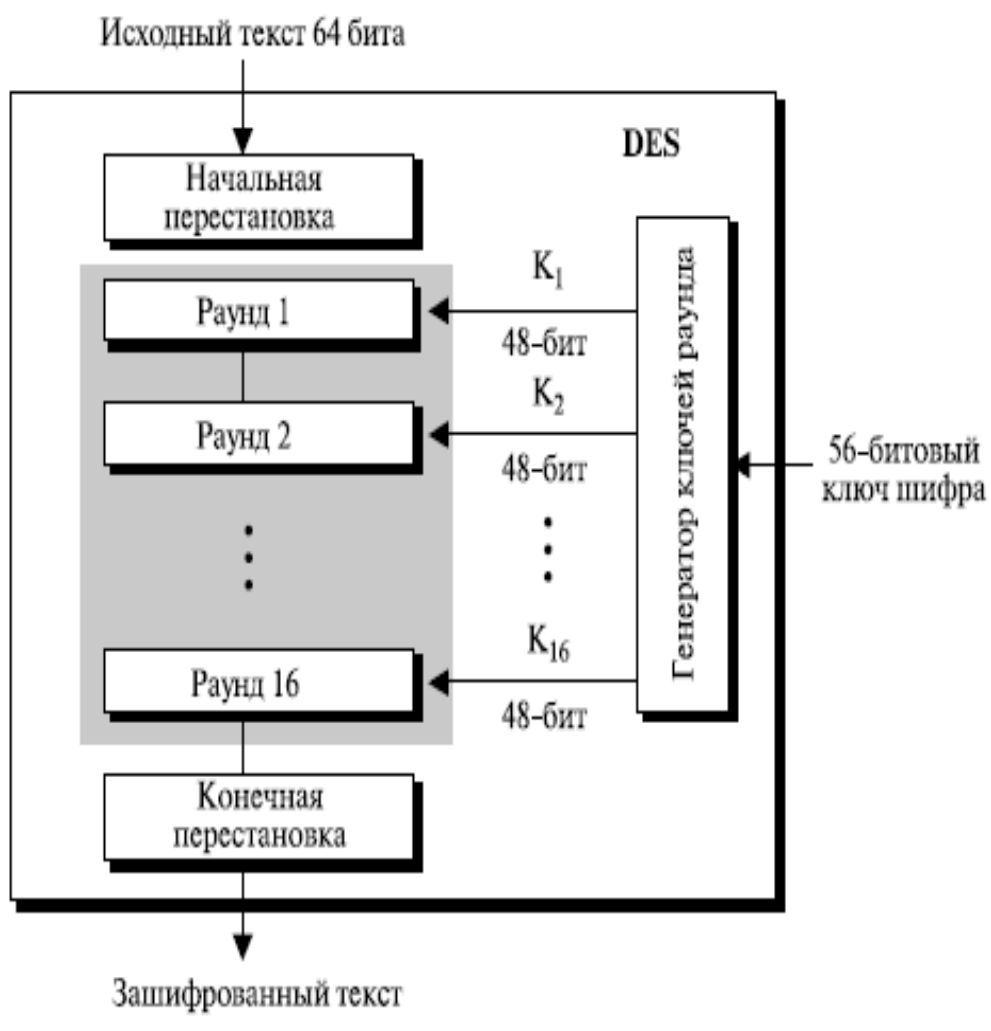
МЕТОДЫ СИММЕТРИЧНОГО ШИФРОВАНИЯ

Алгоритм стандарта шифрования DES (*Data Encryption Standard*)

Историческая справка о DES

- Стандарт шифрования данных (DES) — блочный шифр с симметричными ключами, разработан Национальным Институтом Стандартов и Технологии (*NIST – National Institute of Standards and Technology*).
- В l973 году NIST издал запрос для разработки предложения национальной криптографической системы с симметричными ключами. Предложенная IBM модификация проекта, названного Lucifer, была принята как DES.
- DES был издан в марте 1975 года как Федеральный Стандарт Обработки Информации (*FIPS – Federal Information Processing Standard*).

Структура DES



- Открытый текст шифруется блоками 64 бит, используя 64 битный ключ шифра (56 битов фактический ключ+8 битов четности)
- Процесс шифрования состоит из двух перестановок (P -блоки) и 16-ти раундов Фейстеля
- Каждый раунд использует различные 48 - битовые раундовые ключи, сгенерированный на основе ключа шифра
- Для шифрования и дешифрования используется один и тот же алгоритм и ключ

Начальная и конечная перестановки

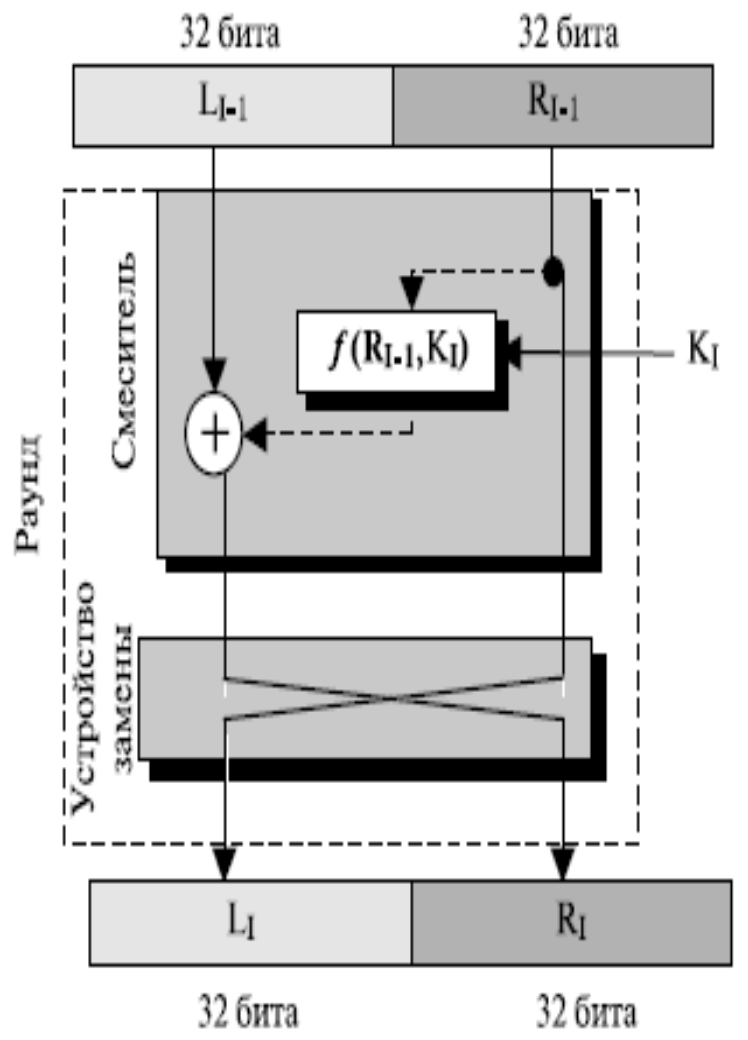
Прямая перестановка IP блока открытого текста

58	50	42	34	26	18	10	2	60	52	44	36	28	20	12	4
62	54	46	38	30	22	14	6	64	56	48	40	32	24	16	8
57	49	41	33	25	17	9	1	59	51	43	35	27	19	11	3
61	53	45	37	29	21	13	5	63	55	47	39	31	23	15	7

Обратная перестановка IP^{-1} блока шифротекста

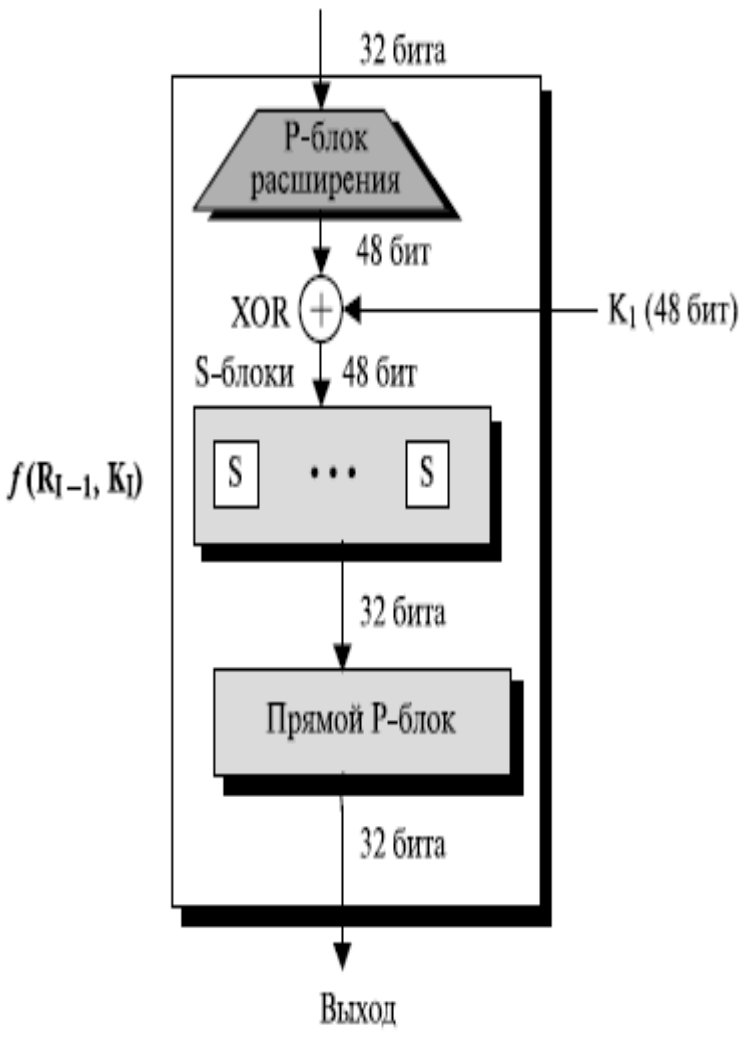
40	8	48	16	56	24	64	32	39	7	47	15	55	23	63	31
38	6	46	14	54	22	62	30	37	5	45	13	53	21	61	29
36	4	44	12	52	20	60	28	35	3	43	11	51	19	59	27
34	2	42	10	50	18	58	26	33	1	41	9	49	17	57	25

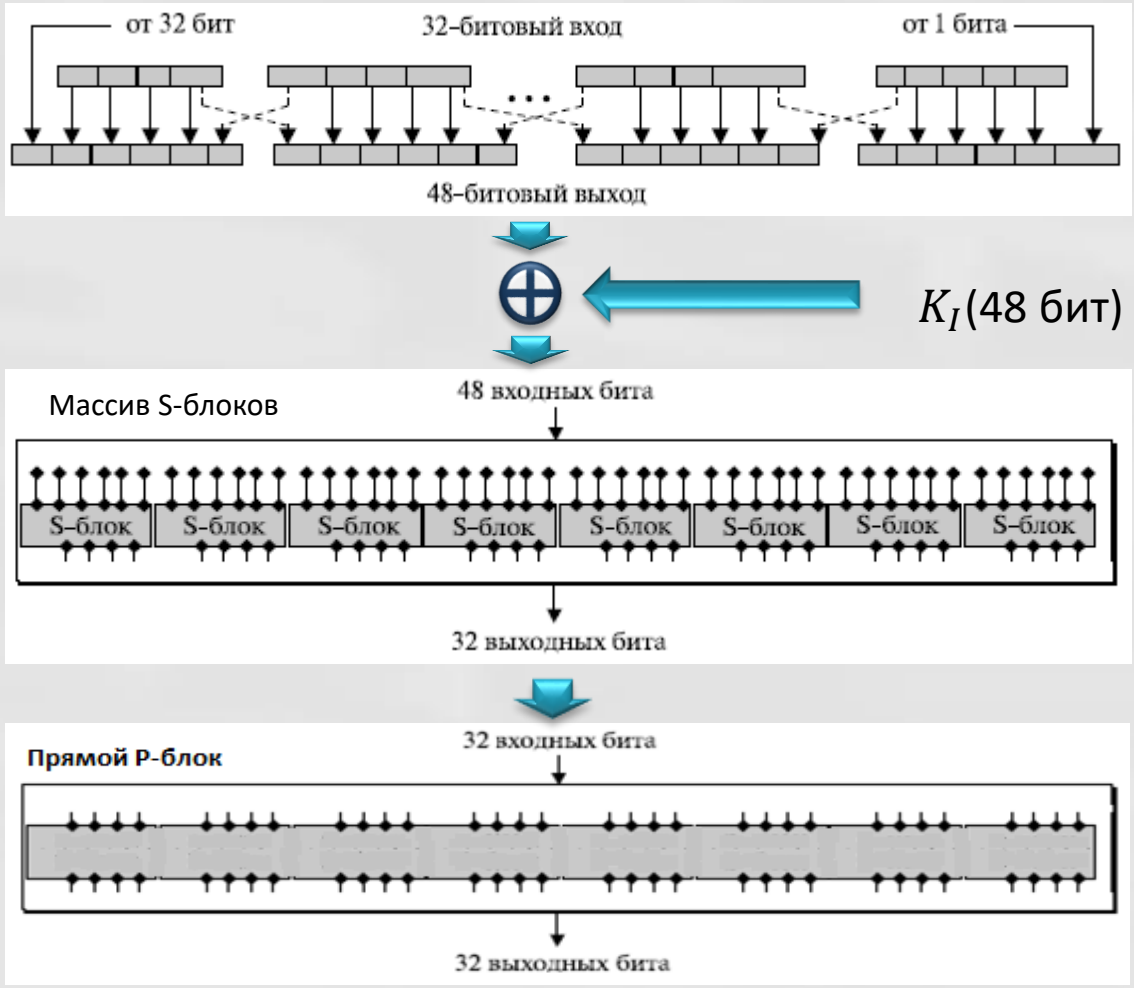
Раунды DES



- На входе раунда субблоки от предыдущего раунда
- Выполняется необратимое преобразование (функция DES) правого субблока
- Вычисляется XOR левого субблока и результата преобразования
- Субблоки меняются местами

Функция шифрования DES





P-блоки перестановки

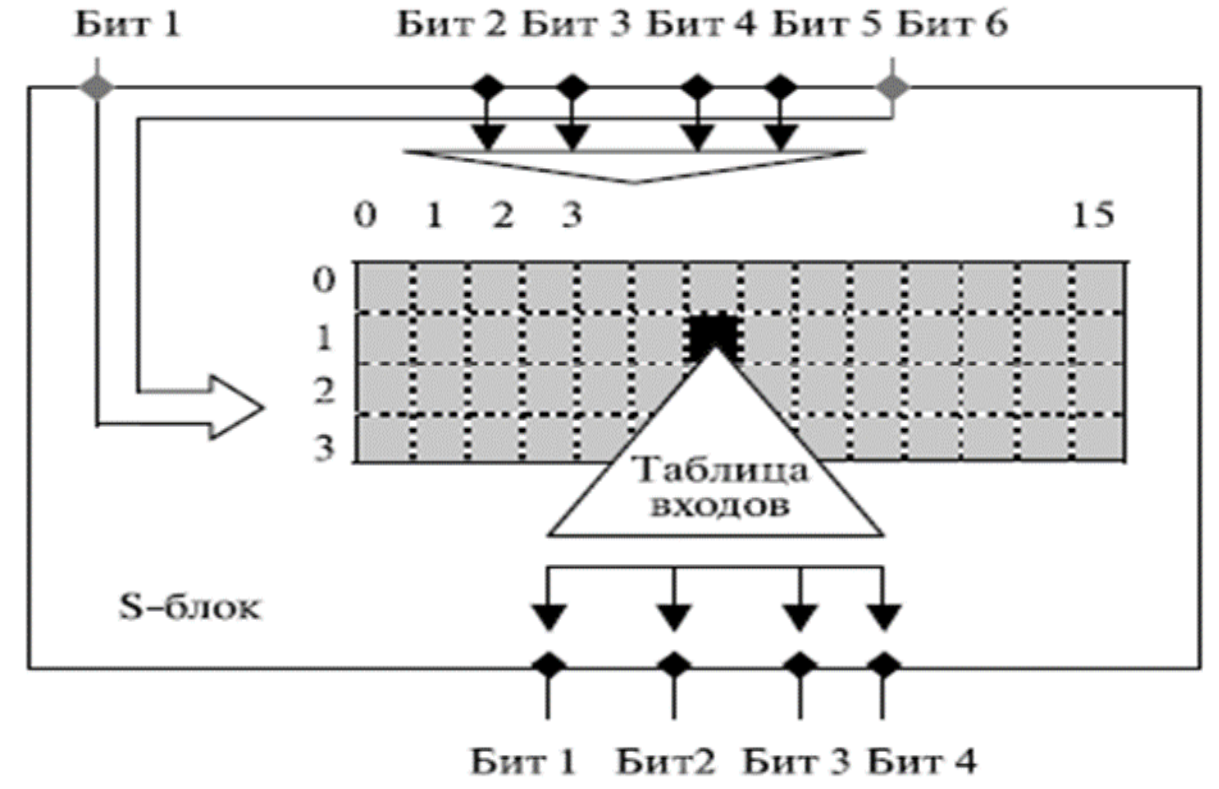
P-блок расширения (переставляет биты субблока R_{I-1})

32	1	2	3	4	5
4	5	6	7	8	9
8	9	10	11	12	13
12	13	14	15	16	17
16	17	18	19	20	21
20	21	22	23	24	25
24	25	26	27	28	29
28	29	30	31	32	1

Прямой P-блок (переставляет биты выходов S-блоков)

16	7	20	21	29	12	28	17
1	15	23	26	5	18	31	10
2	8	24	14	32	27	3	9
19	13	30	6	22	11	4	25

S- блоки функции DES



- Для каждого S -блока есть собственная таблица (всего 8)
- Комбинация битов 1 и 6 на входе определяет одну из четырех строк
- Комбинация битов от 2 -го до 5 -го определяет один из шестнадцати столбцов
- 4-х битовая подстановка берется из клетки на пересечении строки и столбца
- Пример: S-блок 1

1 0110 0

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	14	04	13	01	02	15	11	08	03	10	06	12	05	09	00	07
1	00	15	07	04	14	02	13	10	03	06	12	11	09	05	03	08
2	04	01	14	07	13	06	02	11	15	12	09	07	03	10	05	00
3	15	12	08	02	04	09		07	05	11	03	14	10	00	06	13

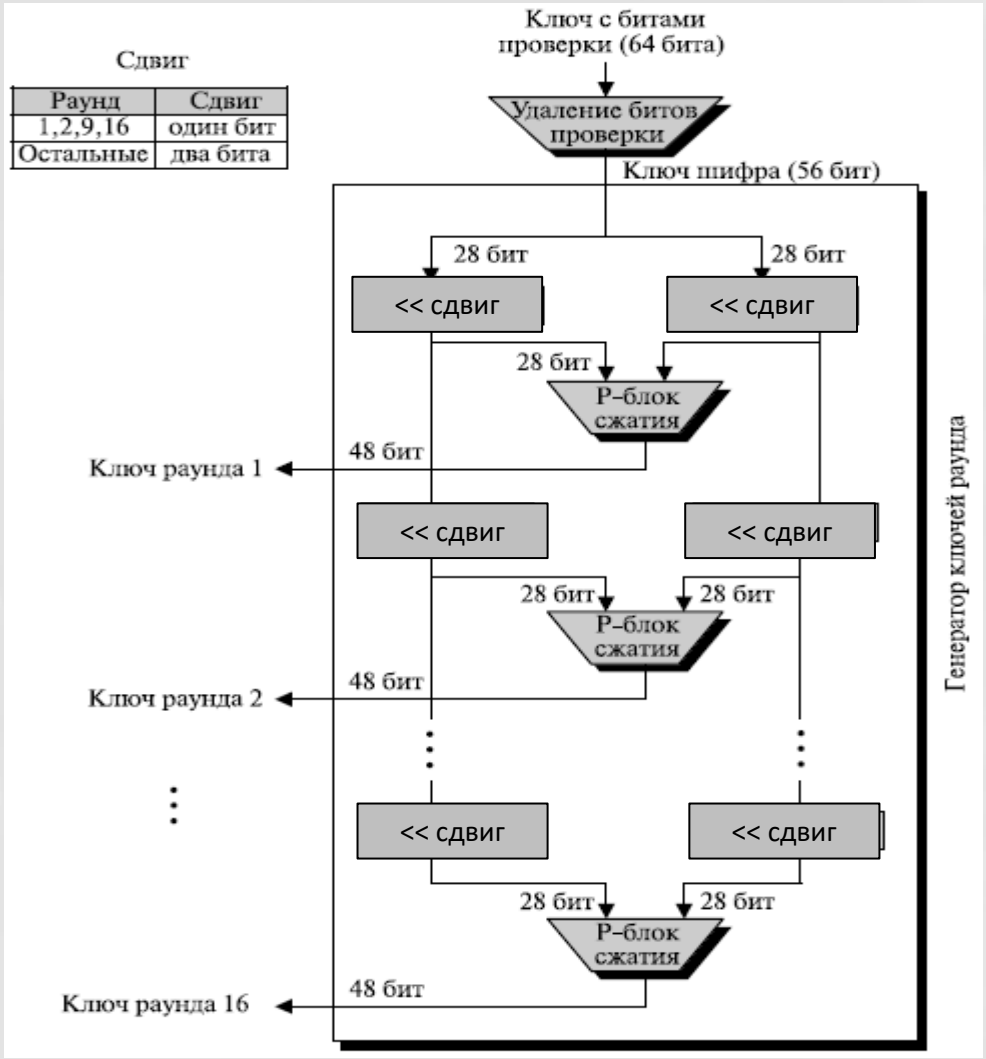
0010

Таблицы подстановок S-блоков

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0	14	4	13	1	2	15	11	8	3	10	6	12	5	9	0	7	
1	0	15	7	4	14	2	13	1	10	6	12	11	9	5	3	8	S_1
2	4	1	14	8	13	6	2	11	15	12	9	7	3	10	5	0	
3	15	12	8	2	4	9	1	7	5	11	3	14	10	0	6	13	
0	15	1	8	14	6	11	3	4	9	7	2	13	12	0	5	10	
1	3	13	4	7	15	2	8	14	12	0	1	10	6	9	11	5	S_2
2	0	14	7	11	10	4	13	1	5	8	12	6	9	3	2	15	
3	13	8	10	1	3	15	4	2	11	6	7	12	0	5	14	9	
0	10	0	9	14	6	3	15	5	1	13	12	7	11	4	2	8	
1	13	7	0	9	3	4	6	10	2	8	5	14	12	11	15	1	S_3
2	13	6	4	9	8	15	3	0	11	1	2	12	5	10	14	7	
3	1	10	13	0	6	9	8	7	4	15	14	3	11	5	2	12	
0	7	13	14	3	0	6	9	10	1	2	8	5	11	12	4	15	
1	13	8	11	5	6	15	0	3	4	7	2	12	1	10	14	9	S_4
2	10	6	9	0	12	11	7	13	15	1	3	14	5	2	8	4	
3	3	15	0	6	10	1	13	8	9	4	5	11	12	7	2	14	

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0	7	13	14	3	0	6	9	10	1	2	8	5	11	12	4	15	
1	13	8	11	5	6	15	0	3	4	7	2	12	1	10	14	9	S_4
2	10	6	9	0	12	11	7	13	15	1	3	14	5	2	8	4	
3	3	15	0	6	10	1	13	8	9	4	5	11	12	7	2	14	
0	2	12	4	1	7	10	11	6	8	5	3	15	13	0	14	9	
1	14	11	2	12	4	7	13	1	5	0	15	10	3	9	8	6	S_5
2	4	2	1	11	10	13	7	8	15	9	12	5	6	3	0	14	
3	11	8	12	7	1	14	2	13	6	15	0	9	10	4	5	3	
0	12	1	10	15	9	2	6	8	0	13	3	4	14	7	5	11	
1	10	15	4	2	7	12	9	5	6	1	13	14	0	11	3	8	S_6
2	9	14	15	5	2	8	12	3	7	0	4	10	1	13	11	6	
3	4	3	2	12	9	5	15	10	11	14	1	7	6	0	8	13	
0	4	11	2	14	15	0	8	13	3	12	9	7	5	10	6	1	
1	13	0	11	7	4	9	1	10	14	3	5	12	2	15	8	6	S_7
2	1	4	11	13	12	3	7	14	10	15	6	8	0	5	9	2	
3	6	11	13	8	1	4	10	7	9	5	0	15	14	2	3	12	
0	13	2	8	4	6	15	11	1	10	9	3	14	5	0	12	7	
1	1	15	13	8	10	3	7	4	12	5	6	11	0	14	9	2	S_8
2	7	11	4	1	9	12	14	2	0	6	10	13	15	3	5	8	
3	2	1	14	7	4	10	8	13	15	12	9	0	3	5	6	11	

Генерация раундовых ключей DES



Сдвиг

Раунд	Сдвиг
1,2,9,16	один бит
Остальные	два бита

- Удаляются биты проверки 8, 16,32,…,64, ключ разделяется пополам и выполняется перестановка 56 бит фактического ключа

57	49	41	33	25	17	9	1	58	50	42	34	26	18
10	2	59	51	43	35	27	19	11	3	60	52	44	36

63	55	47	39	31	23	15	7	62	54	46	38	30	22
14	6	61	53	45	37	29	21	13	5	28	20	12	4

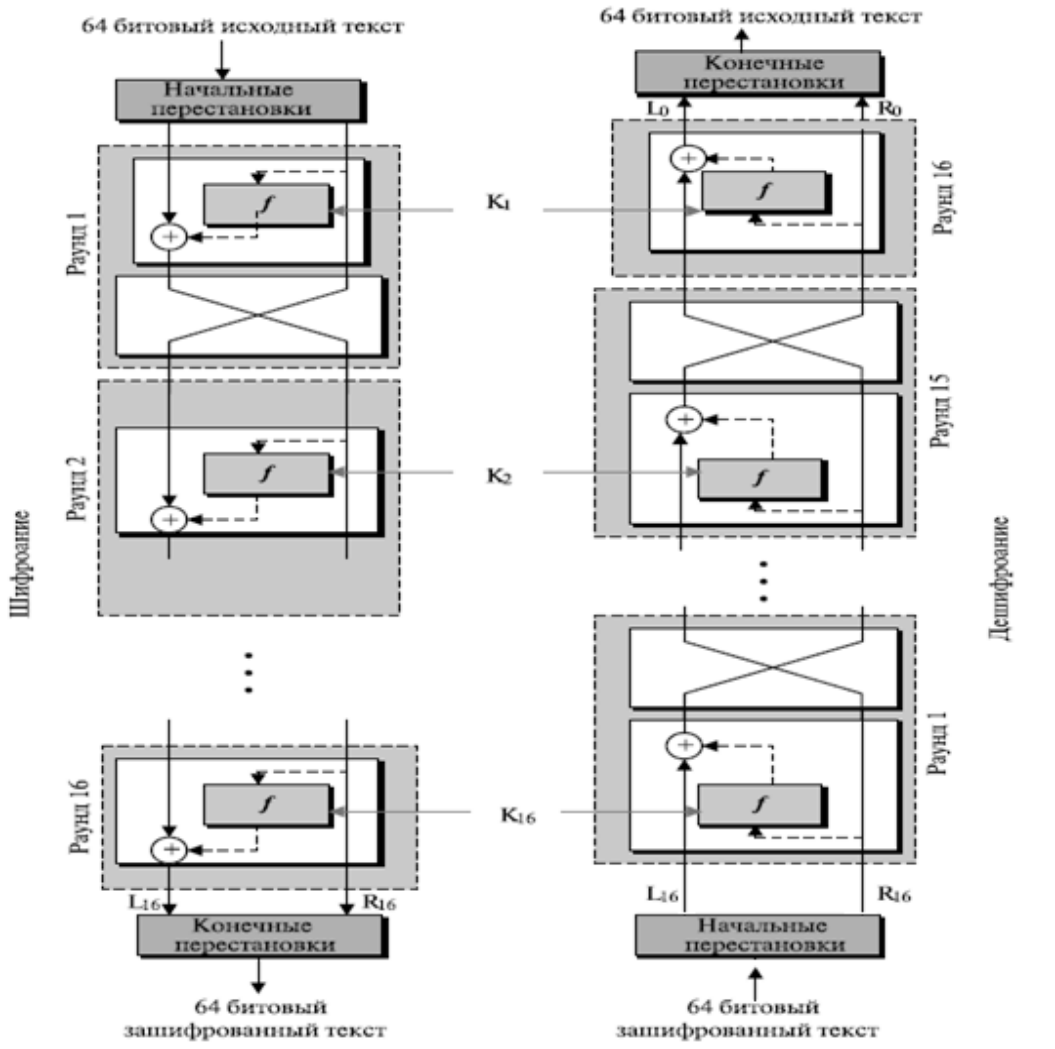
- Каждая половинка циклически сдвигается влево в зависимости от номера раунда

Раунд	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Число бит	1	1	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	1

- Половинки ключа объединяются и обрабатываются P-блоком сжатия

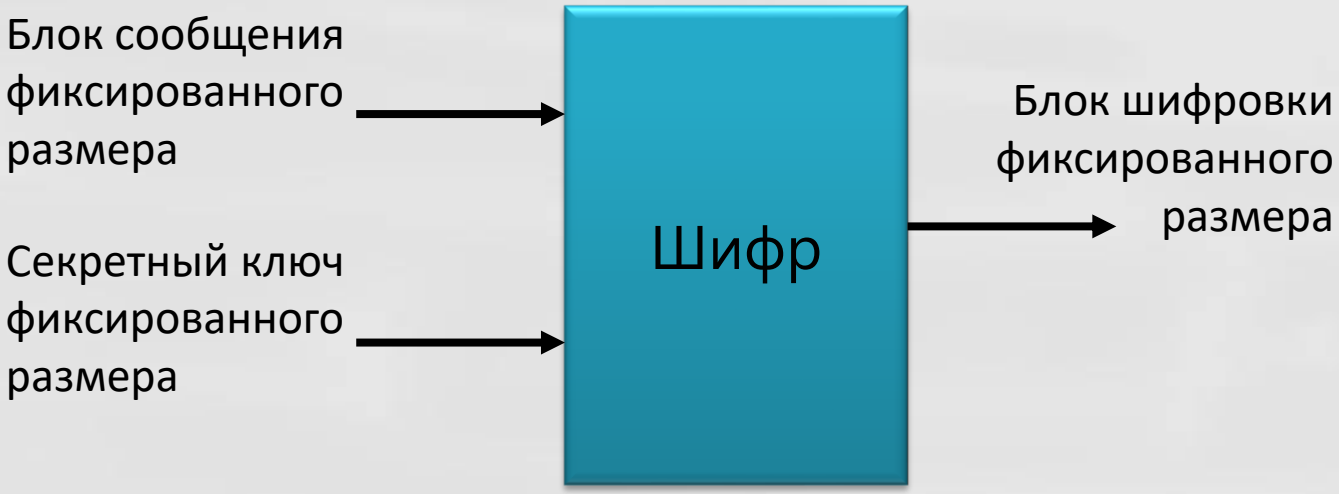
14	17	11	24	1	5	3	28	15	6	21	10	23	19	12	4
26	8	16	7	27	20	13	2	41	52	31	37	47	55	30	40
51	45	33	48	44	49	39	56	34	53	46	42	50	36	29	32

Обратимость DES



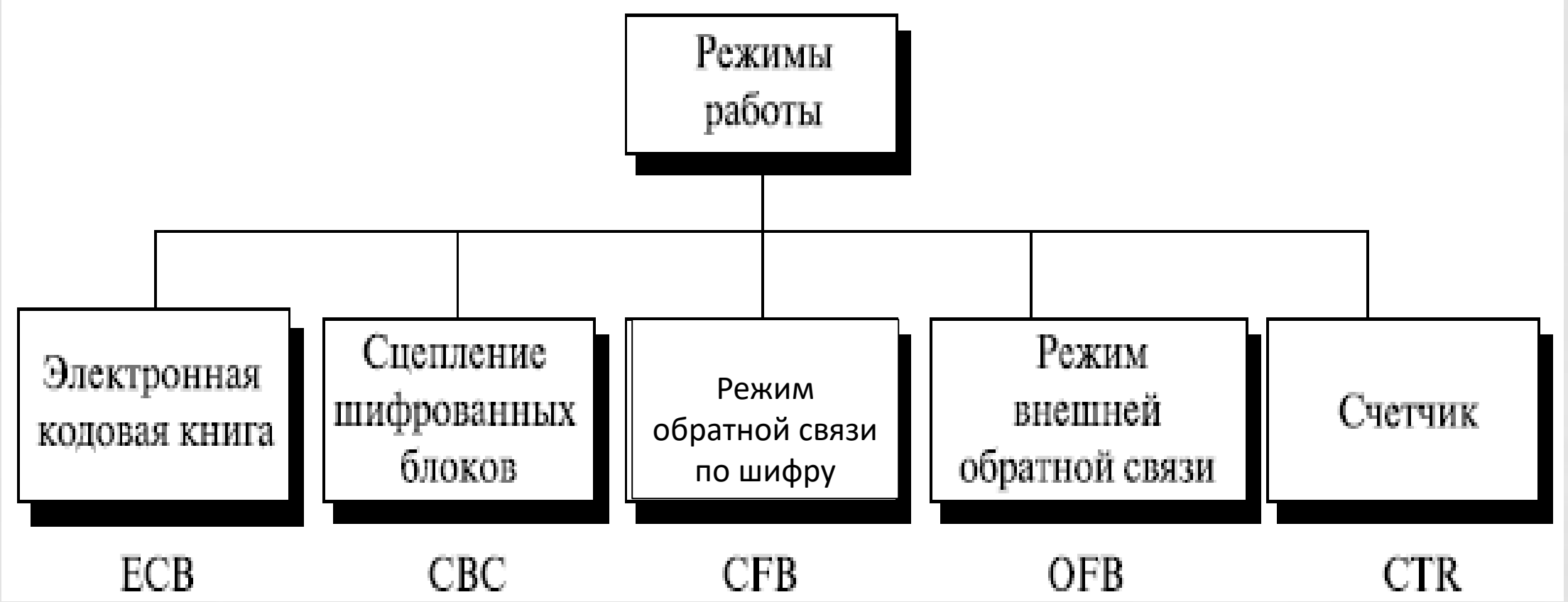
- Последний раунд отличается других: он содержать только смеситель и не содержит устройства замены
- Ключи раундов применяются при шифровании и дешифровании в обратном порядке

Спецификация симметричного блочного шифра

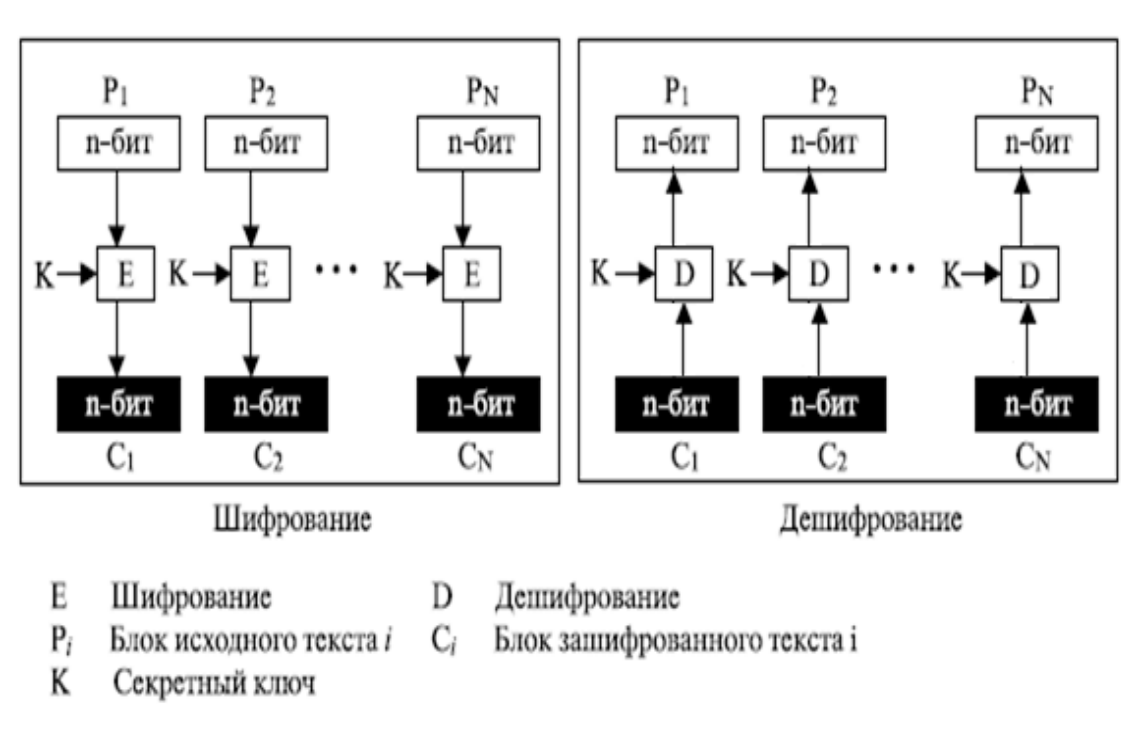


- Пример: Шифр DES:
  - Блок сообщения 64 бит
  - Секретный ключ 64 бит
  - Блок шифровки 64 бит

Режимы работы блочных шифров



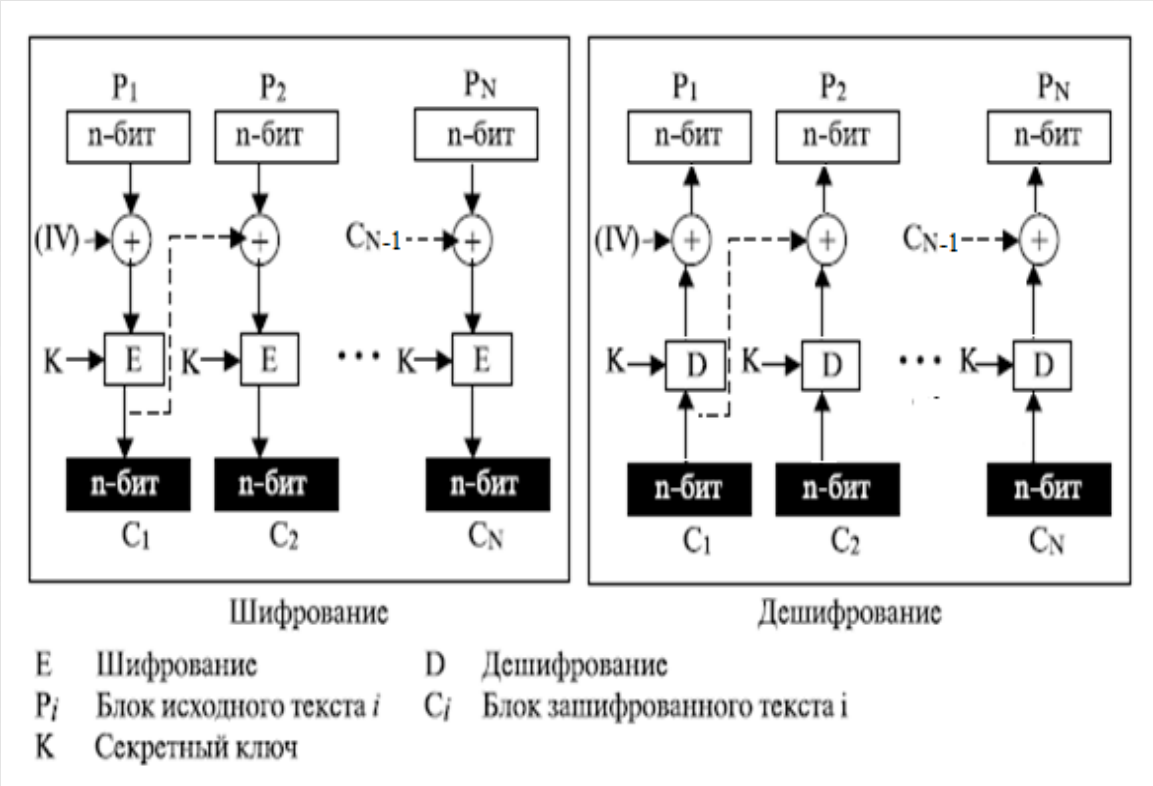
Режим электронной кодовой книги



ECB — Electronic Code Book

- Достоинства:
  - Шифрование может быть параллельным
  - Ошибка в передаче блока не имеет никакого воздействия на другие блоки
- Недостатки:
  - Одинаковые блоки открытого текста будут преобразовываться в одинаковые блоки шифротекста
  - Независимость блоков создает возможность для замены некоторых блоков зашифрованного текста без знания ключа

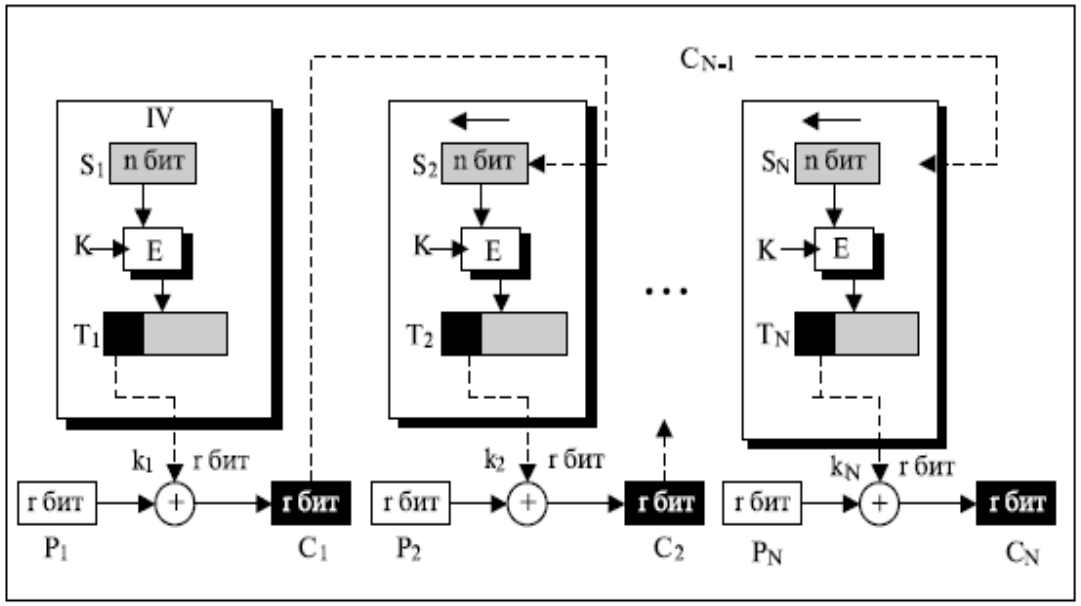
Режим сцепления блоков шифротекста



- Достоинства:
  - Одинаковые блоки исходного текста, преобразуются в различные блоки шифротекста.
  - Если при передаче произойдёт изменение одного бита шифротекста, то данная ошибка распространится на следующие блоки, но при расшифровке произойдет самовосстановление
  - Последний блок шифротекста зависит от всех бит отрытого текста сообщения и может использоваться для контроля целостности сообщения
- Недостатки:
  - Зашифрование сообщения не поддаётся распараллеливанию

CBC — Cipher Block Chaining
IV - Initialization Vector

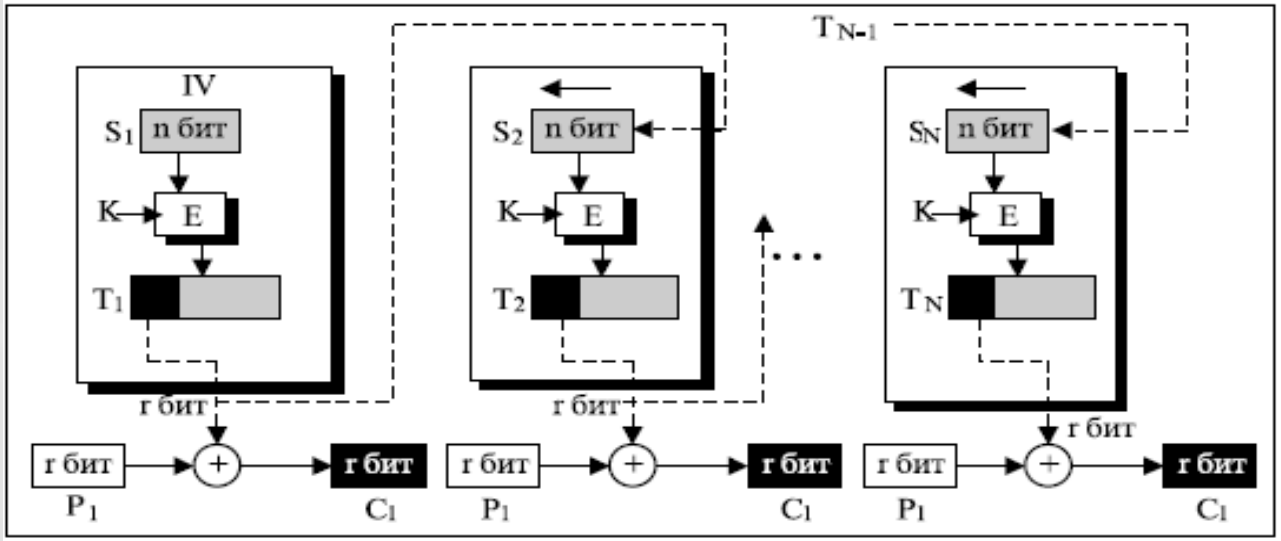
Режим обратной связи по шифру



- Достоинства:
  - Это шифр потока, в котором ключевой поток зависит от зашифрованного текста
  - В этом режиме не требуется дополнение блоков,
- Недостатки:
  - Ошибка в единственном бите в шифротекста создает ошибку в следующих блоках до тех пор, пока, ошибка находятся в регистре сдвига

CFB - Cipher Feedback

Режим обратной связи по выходу



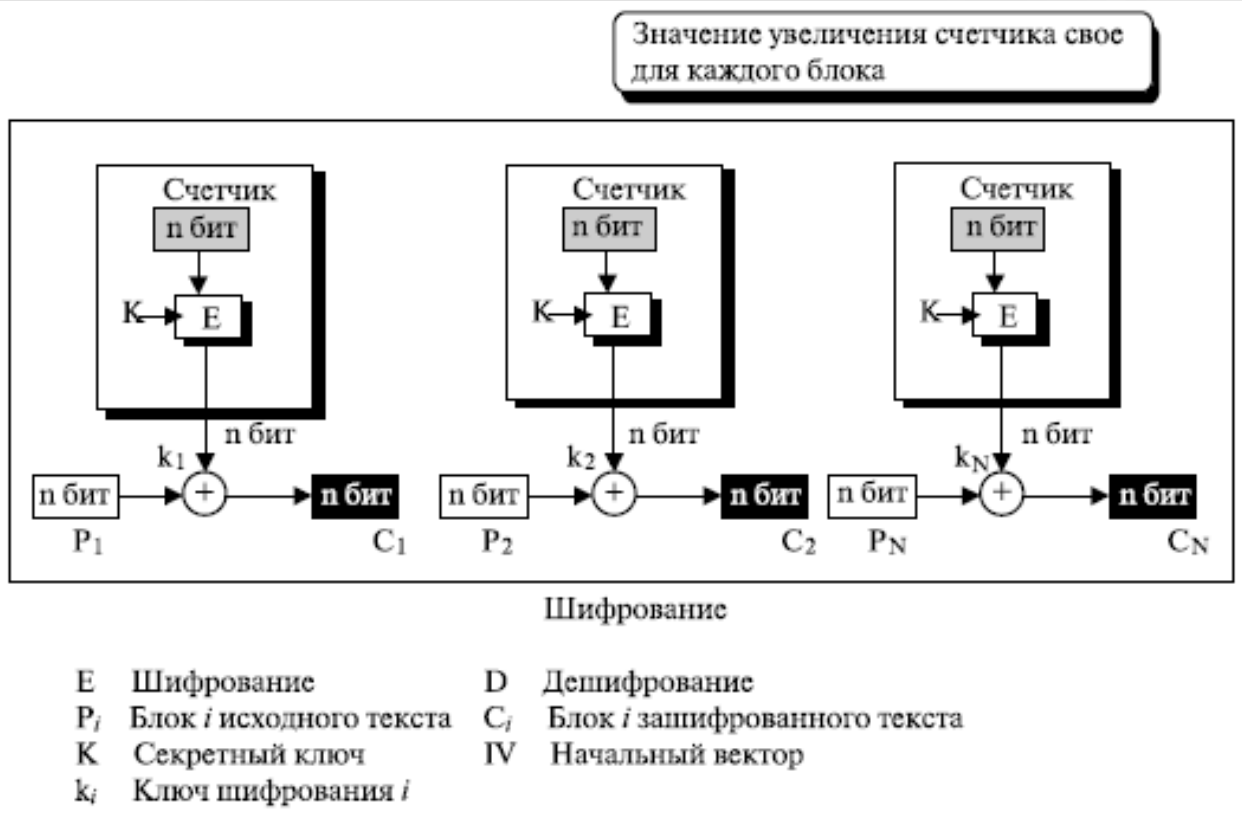
Шифрование

E: Шифрование
D: Дешифрование
P_i: Блок i исходного текста
C_i: Блок i зашифрованного текста
K: Секретный ключ
IV: Начальный вектор (S1)
S_i: Регистр сдвига
T_i: Временный регистр

- Достоинства:
  - Фактически, это шифр потока, в котором ключевой поток не зависит от исходного и зашифрованного текста
  - Каждый бит в зашифрованном тексте независим от предыдущего бита или битов. Это позволяет избежать распространения ошибок
- Недостатки:
  - Чтобы одним и тем же ключом зашифровать больше, чем одно сообщение, значение IV должно быть изменено для каждого сообщения

OFB - Output Feedback

Режим счетчика



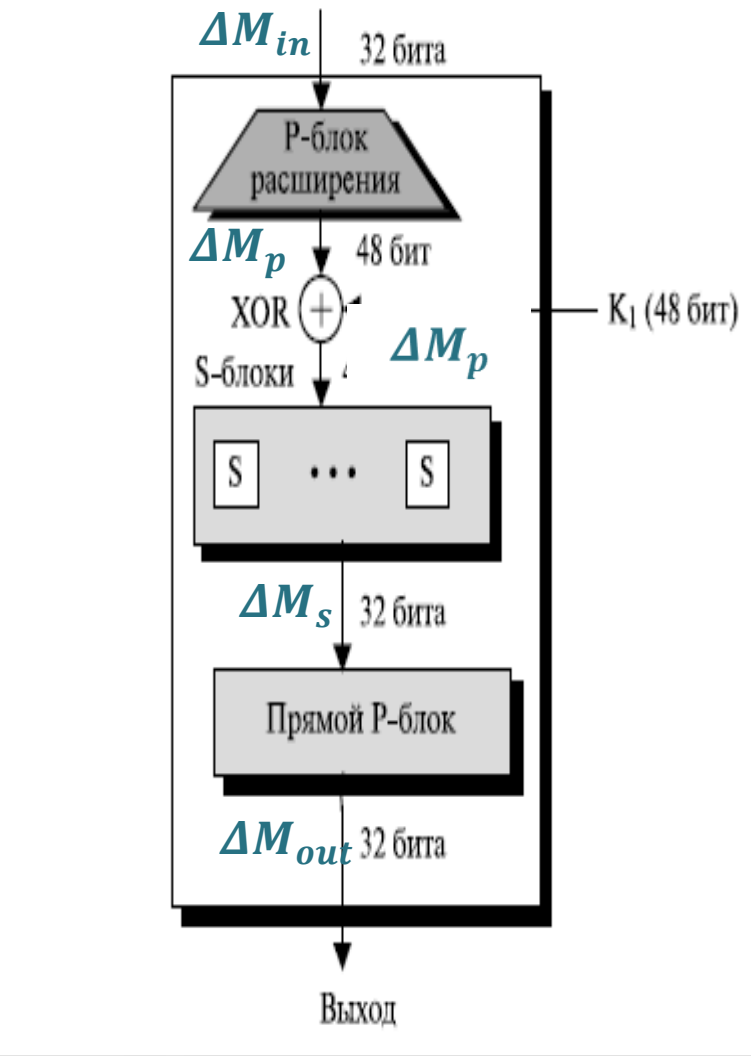
- Достоинства:
  - Создает n -битовый зашифрованный текст, блоки которого независимы друг от друга — они зависят только от значений счетчика. Фактически, это шифр потока
  - Режим, подобно режиму ECB, может использоваться, чтобы зашифровать и расшифровывать файлы произвольного доступа, и значение счетчика может быть связано номером записи в файле
- Недостатки:
  - Если значения счетчиков совпадает, то шифрование производится на одном ключе

CTR - Counter

Дифференциальный криптоанализ DES

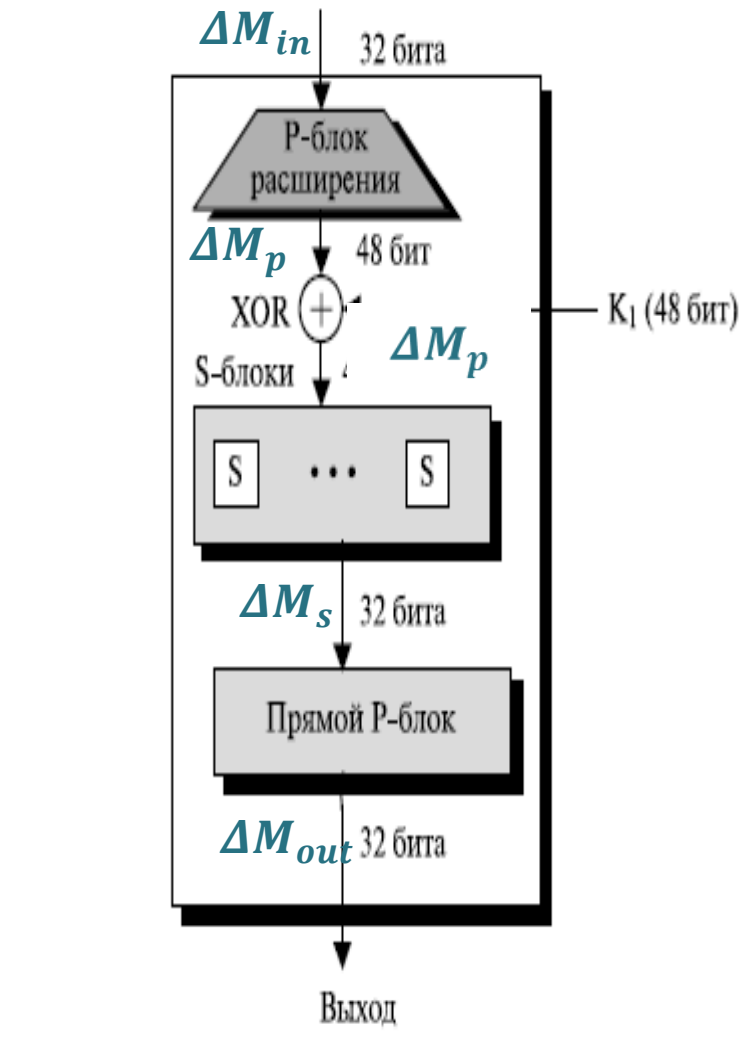
- Авторы: Эли Бихам и Ади Шамир, Израиль, 1990 г.,
- Цель: найти ключ шифра за время лучшее, чем дает метод «грубой силы»
- Это атака с использованием *выбранного открытого текста*
- Основана на изучении преобразования разностей между исходными данными и результатами на различных этапах и раундах шифрования
- Разность для DES определена над открытыми текстами $\Delta M = M \oplus M'$ и соответствующими им криптопреобразованиями $\Delta C = C \oplus C'$
- Пара $\Delta M, \Delta C$ называется дифференциалом
- Взлом шифра основан на том факте, что для заданного ΔM не все значения ΔC равновероятны

Этап 1: Анализ преобразования разностей



- Для всех S-блоков можно вычислить вероятности дифференциалов $(\Delta M_p, \Delta M_s)$: $P(\Delta M_s) = \mathbf{f}(\Delta M_s)/\mathbf{f}(\Delta M_p)$
- Можно построить подобные дифференциальные характеристики и для отдельных раундов, и последовательности раундов
- Подбираются пары исходных текстов с одинаковыми разностями. Для них вычисляются дифференциальные характеристики n-раундовой последовательности

Этап 2: Восстановление ключа



- Выбранные пары исходных текстов шифруются
- На основе сравнения наиболее вероятной дифференциальной характеристики последнего раунда с аналогичной характеристикой вычисленной по полученным шифротекстам выбирается наиболее вероятный 48 битный ключ последнего раунда
- Далее перебором восстанавливается искомый секретный ключ
- Для взлома DES необходимо 2^{47} выбираемых атакующим входных текстов

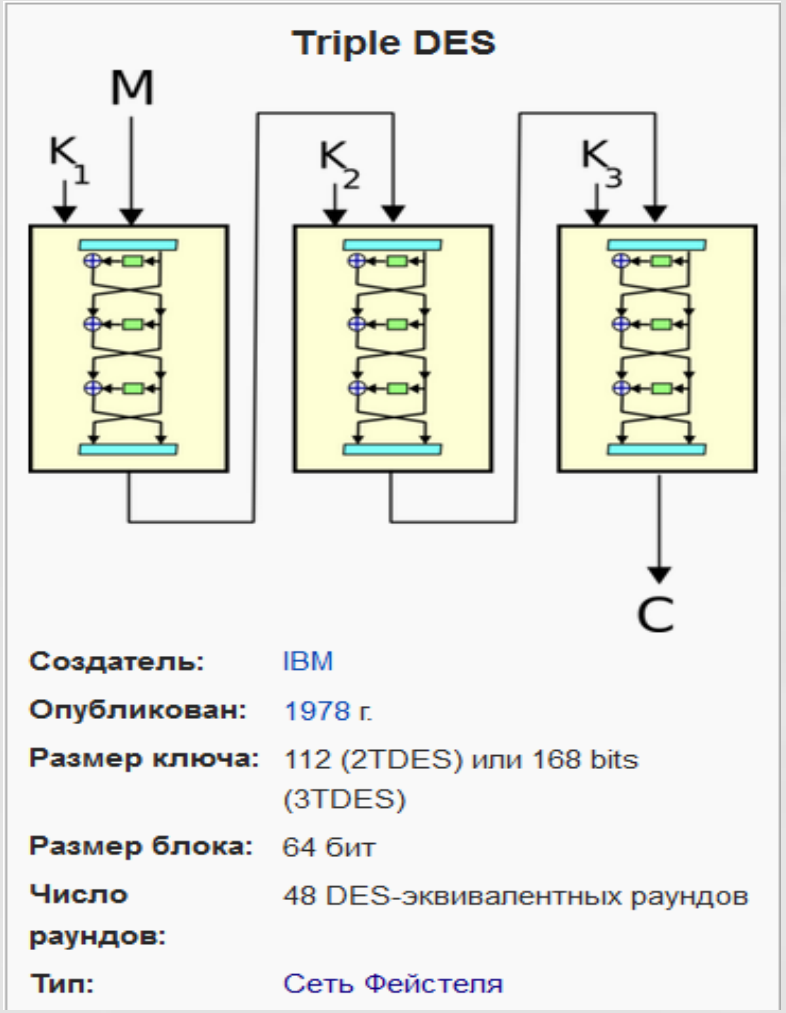
Проблемы DES

- Недостаточная длина ключа. Существует всего 2^{56} = $7{,}2*10^{16}$ возможных ключей, что в настоящее время допускает успешное применение лобовых атак
- Проблемы с ключами шифрования:
  - 4 ключа являются слабыми (порождают одинаковые раундовые ключи). Это ключи, в которых все биты какой-либо из половин расширяемого ключа являются нулевыми или единичными.
  - 6 пар ключей являются эквивалентными (т.е. информация, зашифрованная одним ключом из пары, расшифровывается другим ключом той же пары).
  - 48 ключей являются «возможно слабыми», Возможно слабые ключи при их расширении дают только 4 различных ключа раунда
- Существует опасность, что эти S-блоки (основа алгоритма) конструировались таким образом, чтобы был возможен криптоанализ со стороны разработчика, который знает их слабые стороны (пока нет подтверждений)

Взлом DES

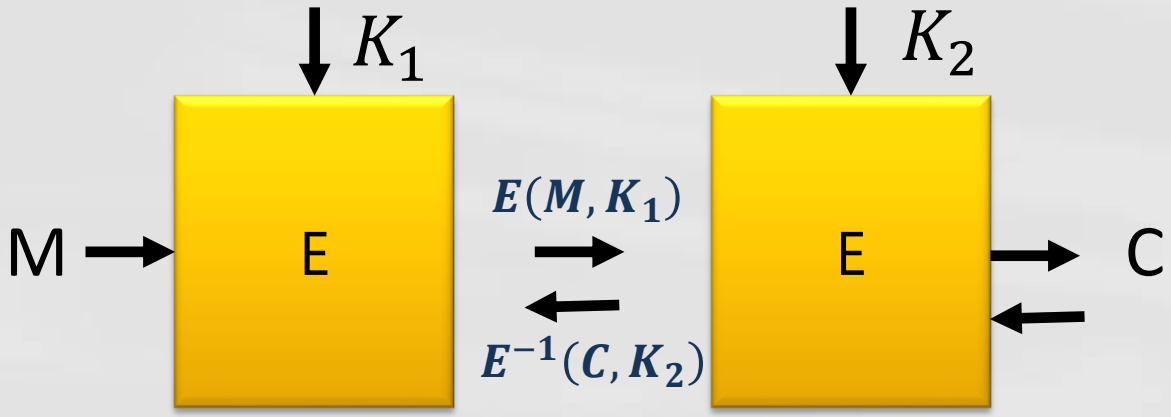
- 1998 г. используя суперкомпьютер стоимостью 250 тыс. долл., сотрудники RSA Laboratory «взломали» DES менее чем за три дня. Эксперимент проходил в рамках исследования DES Challenge II, проводимого RSA Laboratory под руководством общественной организации Electronic Frontier Foundation (EFF). Суперкомпьютер, построенный в RSA Laboratory для расшифровки данных, закодированных методом DES по 56-разрядному ключу, получил название EFF DES Cracker.

Шифр Triple DES



- Модификации:
  - DES-EEE3
  - DES-EDE3
  - DES-EEE2
  - DES-EDE2
- Самая популярная разновидность это DES-EDE3 и DES-EDE2
- Реализован во многих приложениях, ориентированных на работу с Интернет, в том числе в PGP и S/mime.

Атака встреча посередине (meet-in-the-middle attack)



$$C = E(E(M, K_1), K_2)$$
$$M = E^{-1}(E^{-1}(C, K_2), K_1)$$

- Ищем такую пару K_1 и K_2, чтобы $E(M, K_1) = E^{-1}(C, K_2)$
- Сложность атаки (меньше ожидаемой $\sim 2^{112}$)
  - 2^{56} шифрований и $\sim 2^{56}$ ячеек памяти для хранения вариантов K_1
  - 2^{56} расшифрований $\sim 2^{56}$ ячеек памяти для хранения вариантов K_2

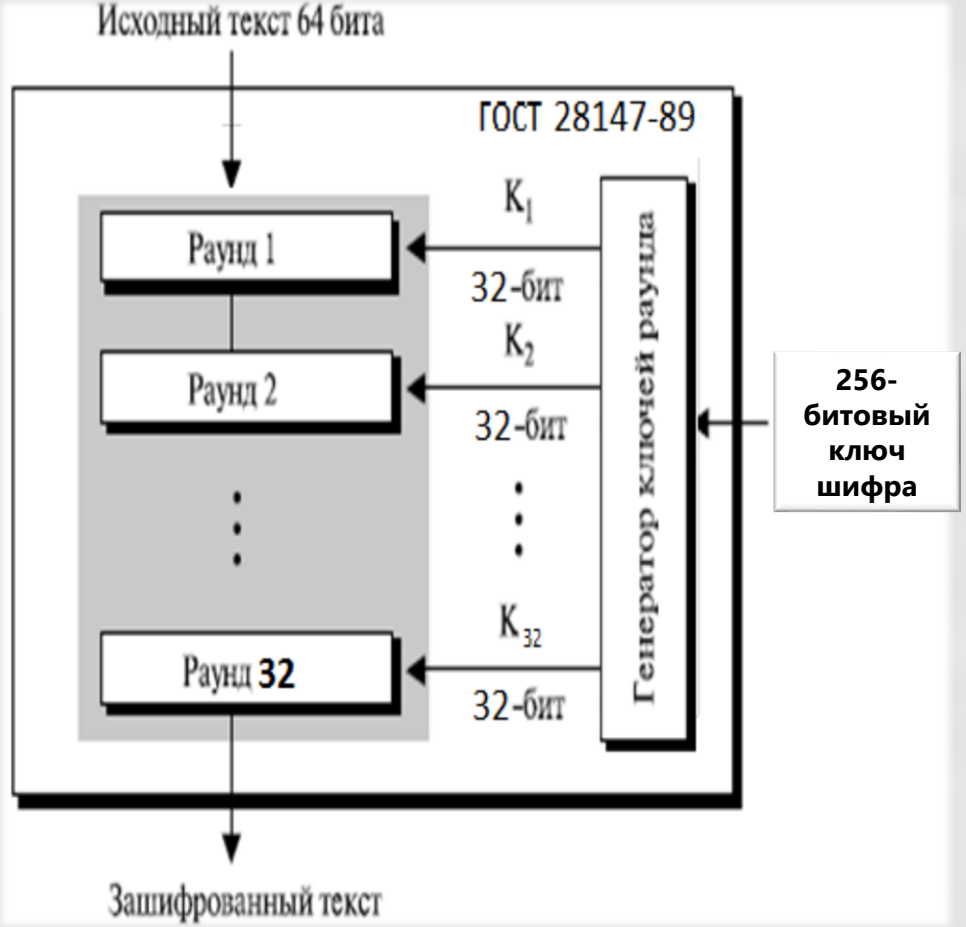
МЕТОДЫ СИММЕТРИЧНОГО ШИФРОВАНИЯ

Алгоритм стандарта шифрования ГОСТ 28147-89

Историческая справка

- ГОСТ 28147—89 — советский и российский стандарт симметричного шифрования, введённый в 1990 году. Полное название — «ГОСТ 28147—89 Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования»
- История создания шифра и критерии разработчиков до сих пор не опубликованы
- По некоторым сведениям, алгоритм, положенный впоследствии в основу стандарта, родился, предположительно, в недрах Восьмого Главного управления КГБ СССР (ныне в структуре ФСБ), скорее всего, в одном из подведомственных ему закрытых НИИ, вероятно, ещё в 1970-х годах в рамках проектов создания программных и аппаратных реализаций шифра для различных компьютерных платформ
- С момента опубликования ГОСТа на нём стоял ограничительный гриф «Для служебного пользования», и формально шифр был объявлен «полностью открытым» только в мае 1994 года.

Структура ГОСТ 28147-89



- Открытый текст шифруется блоками 64 бит, используя 256 битный ключ шифра
- Процесс шифрования состоит из 32-х раундов схемы Фейстеля и назван *базовым циклом зашифрования (32-З)*
- Каждый раунд использует 32 -битовый раундовый ключ (*элемент ключа* шифрования), сгенерированный на основе ключа шифра
- Для расшифрования используется тот же алгоритм и ключ
- Процесс расшифрования назван *базовым циклом расшифровывания (32-Р)*
- Еще есть *базовый цикл выработки имитовставки (16-З)*

Раунды ГОСТ 28147-89

- Раунд назван *основным шагом криптопреобразования*
- На входе раунда субблоки от предыдущего раунда
- В левый субблок копируется содержимое правого субблока
- Правый субблок и раундовый ключ складываются по модулю 2^{32}
- Результат сложения разбивается на восемь 4-битных значений (*блоков кода*), каждое из которых подается для замены на вход S-блока (*узла таблицы замен*)
- Выходы всех S- блоков объединяются в 32-битное слово, которое затем циклически сдвигается на 11 бит влево
- Вычисляется XOR результата с левым субблоком и результат обновляет правый субблок

Пример S-блока ГОСТ 28147-89

1-ый S-блок	4	10	9	2	13	8	0	14
	6	11	1	12	7	15	5	3
2-ой S-блок	14	11	4	12	6	13	15	10
	2	3	8	1	0	7	5	9
3-ий S-блок	5	8	1	13	10	3	4	2
	14	15	12	7	6	0	9	11
4-ый S-блок	**7**	**13**	**10**	**1**	**0**	**8**	**9**	**15**
	14	**4**	**6**	**12**	**11**	**2**	**5**	**3**
5-ый S-блок	6	12	7	1	5	15	13	8
	4	10	9	14	0	3	11	2
6-ой S-блок	4	11	10	0	7	2	1	13
	3	6	8	5	9	12	15	14
7-ой S-блок	13	11	4	1	3	15	5	9
	0	10	14	7	6	8	2	12
8-ой S-блок	1	15	13	0	5	7	10	4
	9	2	3	14	6	11	8	12

1001 → **4-ый S-блок**

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

→ 0100

Генерация раундовых ключей ГОСТ 28147-89

Раунд	1	2	3	4	5	6	7	8
Ключ	1	2	3	4	5	6	7	8
Раунд	9	10	11	12	13	14	15	16
Ключ	1	2	3	4	5	6	7	8
Раунд	17	18	19	20	21	22	23	24
Ключ	1	2	3	4	5	6	7	8
Раунд	25	26	27	28	29	30	31	32
Ключ	8	7	6	5	4	3	2	1

Схема использования раундовых ключей

- 256-битный ключ шифра последовательно разбивается на восемь 32-битных раундовых ключей
- Каждый раундовый ключ используется в четырех различных раундах по определенной схеме

Криптоанализ ГОСТ 28147-89

- XSL-атака (eXtended Sparse Linearization) – метод, основанный на алгебраических свойствах шифра, предполагает решение особой системы уравнений.
- На первом этапе из достаточно большого количества пар открытых-шифрованных текстов выбирается те, которые позволяют рассматривать преобразования на меньшем, чем 32 количестве раундов
- На втором этапе результаты работы S-блоков описываются уравнениями вида:

$$\sum_{i,j} \alpha_{ij} * x_i * x_j + \sum_{i,j} \beta_{ij} * y_i * y_j + \sum_{i,j} \gamma_{ij} * x_i * y_j + \sum_{i} \delta_i * x_i + \sum_{i} \epsilon_i * x_i + \eta = 0$$

Где x_i и y_i – соответственно биты на входе и выходе S-блоков i-го раунда шифрования.

- Практический результат : 2^{64} известных открытых текста и $\sim 2^{64}$ бит памяти для хранения пар "открытый текст/шифртекст" позволяют взломать ГОСТ в 2^8 быстрее, чем простой перебор.

Сравнительный анализ ГОСТ 28147-89

- В ГОСТ применяется 256-битный ключ шифра, а в DES 56-битный . При выборе сильных S-блоков ГОСТ считается очень стойким алгоритмом.
- В DES применяются нерегулярные перестановки P, в ГОСТ используется 11-битный циклический сдвиг влево. Поэтому ГОСТ требуется 8 раундов прежде, чем изменение одного входного бита повлияет на каждый бит результата; DES для этого нужно только 5 раундов.
- В DES только 16 раундов, в ГОСТ - 32 раунда, что делает его более стойким к дифференциальному и линейному криптоанализу
- ГОСТ использует гораздо более простую процедуру создания раундовых ключей, чем DES
- ГОСТ даже по сравнению AES имеет очень большой размер ключа и значительно более низкую стоимость исполнения. Аппаратная реализация ГОСТ дешевле даже стандарта AES, которому требуется в четыре раза больше логических вентилей при сравнимом уровне безопасности