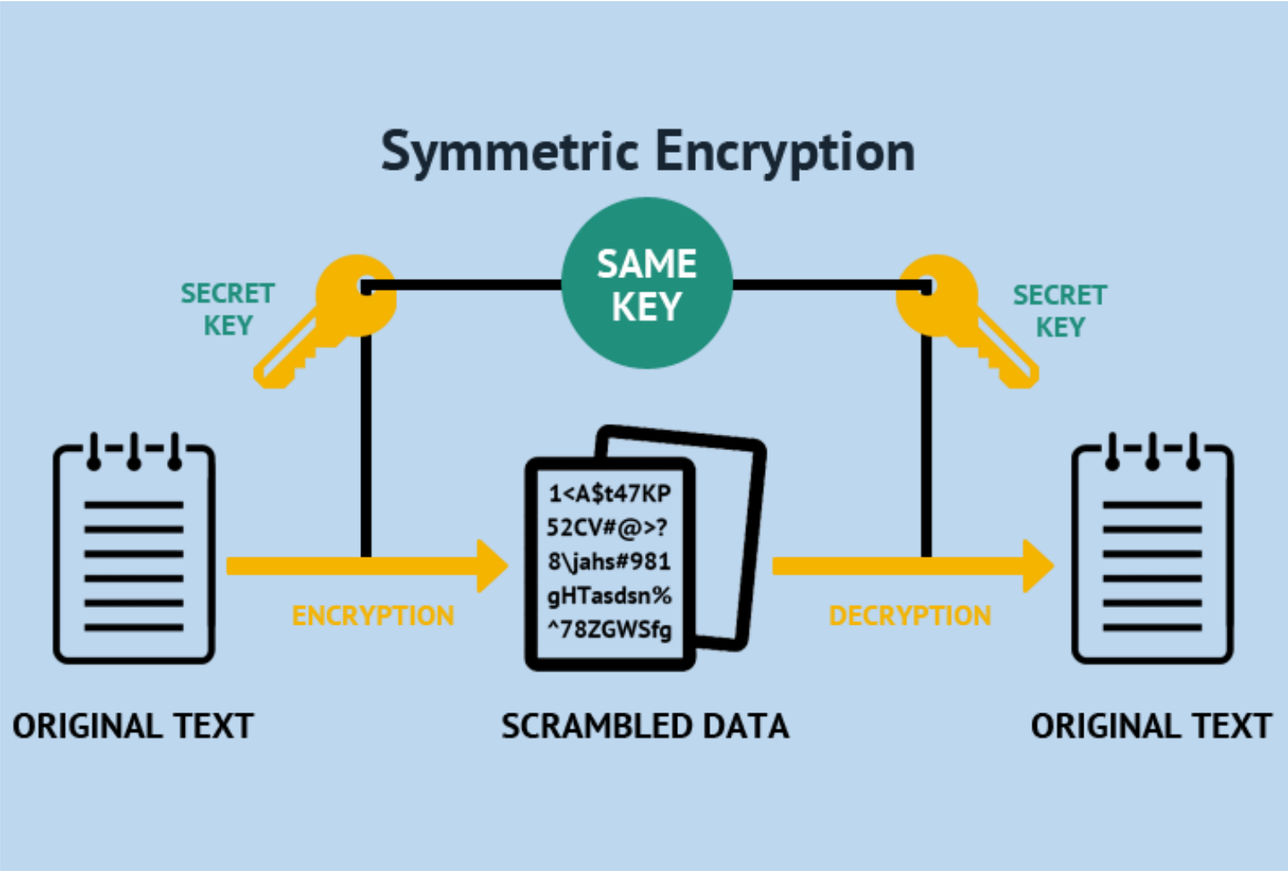
ЛЕКЦІЯ 3

ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Симетричні алгоритми шифрування



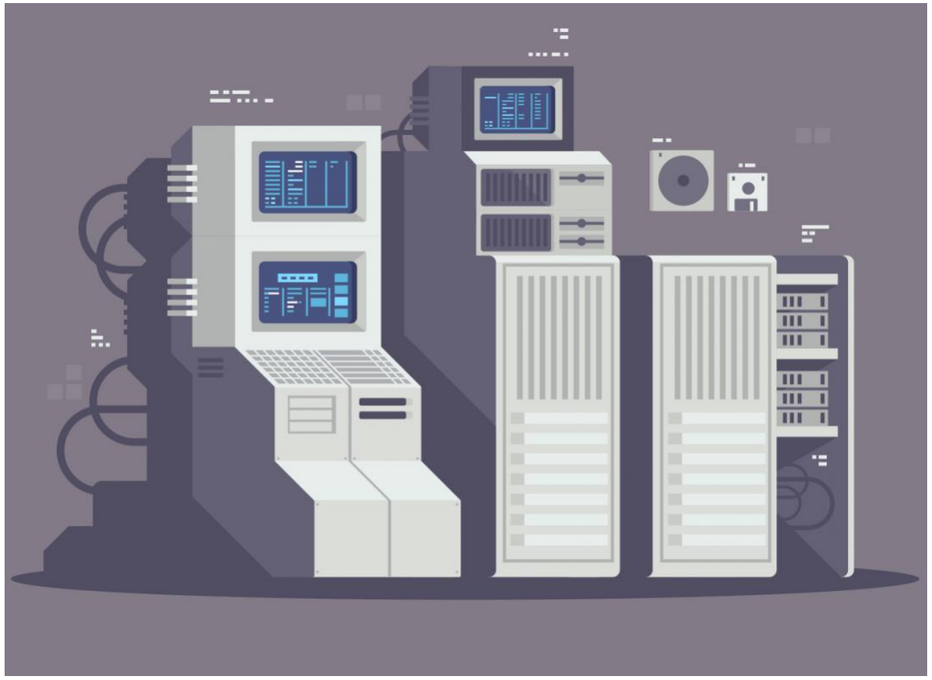
План

1. Шифр Вернама та криптостійкість
2. Мережа Фейстеля
3. Алгоритм DES
4. Модифікації DES

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Види стійкості шифрів (по Шеннону)

Теоретична (абсолютна) стійкість – стійкість криптосистеми за наявності у криптоаналітика необмеженого часу, необмежених обчислювальних ресурсів, найкращих методів криптоаналізу.



Оцінка базується на теорії інформації та теорії ймовірностей

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Види стійкості шифрів (по Шеннону)

Практична (обчислювальна) стійкість – стійкість криптосистеми на поточний момент часу з урахуванням того, що криптоаналітик володіє сучасними методами криптоаналізу, проте час та обчислювальні ресурси обмежені.

Оцінка базується на теорії складності

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Показники стійкості криптосистеми

1. Час, необхідний для реалізації атаки на доступних/перспективних обчислювальних засобах.

2. Обсяг пам'яті, необхідний для виконання криптографічного аналізу.

3. Мінімально необхідна для успішної реалізації атаки кількість пар «відкритий текст – шифротекст».

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Властивості притаманні стійким шифрам

Розсіювання

поширення впливу одного знаку відкритого тексту, а також одного знаку ключа на значну кількість знаків зашифрованого повідомлення

Перемішування

маскування взаємозв'язку статистичних властивостей відкритого тексту та шифротексту

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Творці – Гільберт Вернам зі співробітниками телеграфної компанії AT&T, а також офіцер армії США Джозеф Моборн (1917 рік)

Шифр Вернама є єдиною системою шифрування, для якої доведена абсолютна криптографічна стійкість (Клод Шеннон, 1949 рік)

Гільберт Вернам

Джозеф Моборн

1. Шифр Вернама та криптостійкість

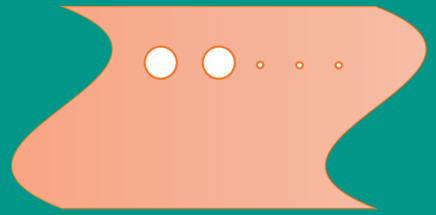
Ідея автоматичного шифрування телеграфних повідомлень

Відкритий текст представлявся у вигляді п'ятизначних імпульсних комбінацій на перфострічці

Ключ: перфострічка з випадковими знаками – «гама»

Наприклад, літера «А» мала вигляд:

+ + - - -



«+» – отвір

«-» – його відсутність

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Шифрування:

імпульси «гами» електромеханічно складалися з імпульсами знаків відкритого тексту. Отримана сума представляла собою шифротекст

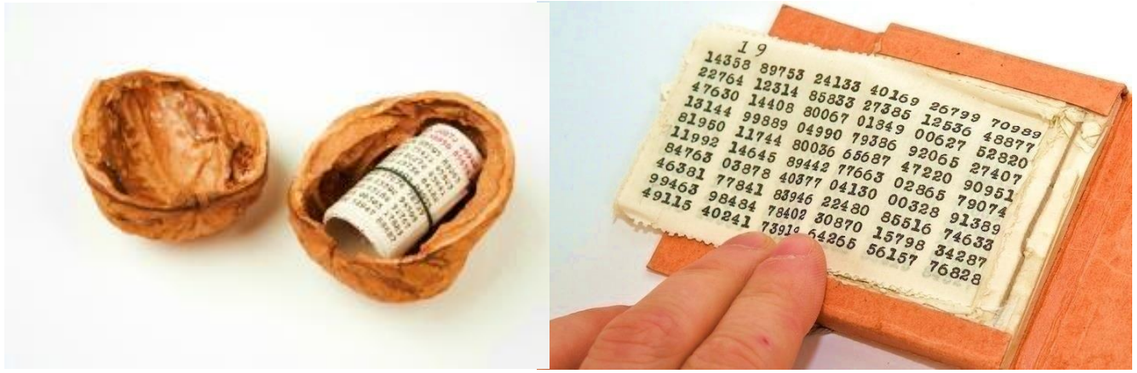
Дешифрування:

імпульси, отримані по каналу зв'язку, електромеханічно складалися з імпульсами тієї самої «гами», в результаті чого відновлювалися вихідні імпульси повідомлення

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Класичний одноразовий блокнот

Ключ: одноразовий блокнот – послідовність випадкових символів, написаних на аркушах паперу



Ключ повинен володіти трьома критично важливими властивостями:

1) бути дійсно випадковим;

2) за розміром збігатися з заданим відкритим текстом (ключ ні в якому разі не зациклюється)

3) застосовуватися тільки один раз!

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Шифрування:

кожен символ ключа використовується для шифрування одного символу повідомлення

Дешифрування:

одержувач, використовуючи точно такий самий блокнот, дешифрує кожний символ шифротексту

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Приклад 1.1:
Ключ: SECRET LISTENERS
Повідомлення: MONITORING TIMES
Шифрування:

Відкритий текст	13 15 14 09 20 15 18 09 14 07 20 09 13 05 19
Ключова гама	19 05 03 18 05 20 12 09 19 20 05 14 05 18 19
Результат додавання	32 20 17 27 25 35 30 18 33 27 25 23 18 23 38
За модулем 26	06 20 17 01 25 09 04 18 07 01 25 23 18 23 12
Шифротекст	FTQAYIDRGAYWRWL

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Приклад 1.2:
Ключ: SECRET LISTENERS
Шифротекст: FTQAYIDRGAYWRWL
Дешифрування:

Шифротекст	06 20 17 01 25 09 04 18 07 01 25 23 18 23 12
Ключова гама	19 05 03 18 05 20 12 09 19 20 05 14 05 18 19
Результат віднімання	-13 15 14 -17 20 -11 -08 09 -12 -19 20 09 13 05 -07
За модулем 26	13 15 14 09 20 15 18 09 14 07 20 09 13 05 19
Відкритий текст	MONITORING TIMES

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Для шифрування бінарних даних (потоку бітів)

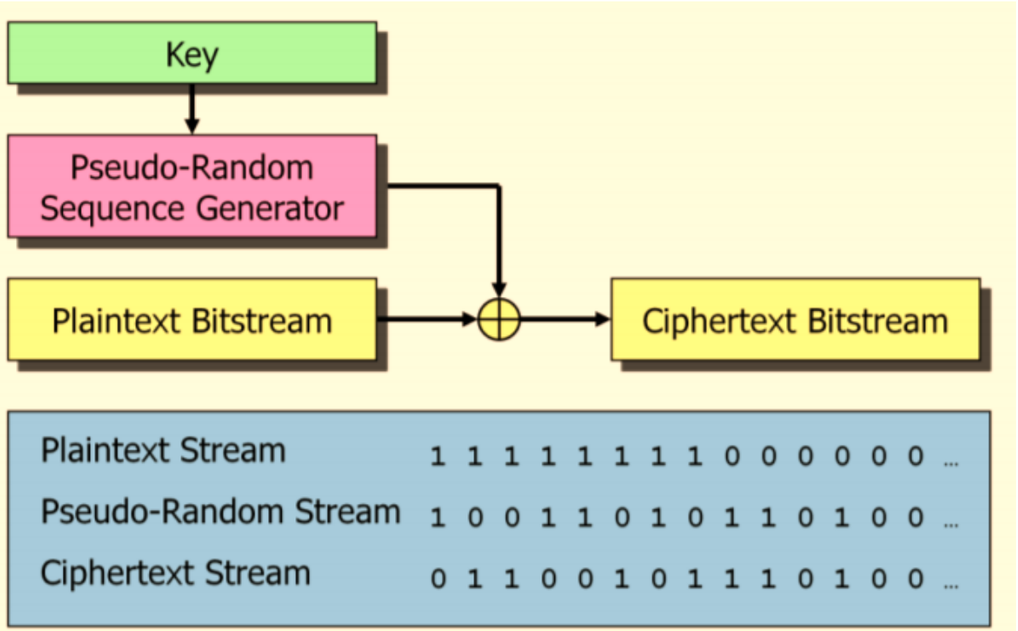
Ключ: послідовність випадкових бітів

$\oplus$	0	1
0	0	1
1	1	0

Виконується додавання бітів за модулем 2 (операція XOR, eXclusive OR – виключне або)

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Потоковий шифр – шифр, що перетворює кожен символ (літеру, біт або байт) відкритого тексту у символ шифротексту, залежно від ключа та розташування символів у тексті.



Ключовий потік (гама) – це бітова послідовність, що визначається за допомогою ключа шифру.

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Приклад 1.3:
Ключ: 00001011 00010010 00001111
Повідомлення: SUN
Шифрування:

Відкритий текст	01010011 01010101 01001110
Ключова гама	00001011 00010010 00001111
Результат додавання за модулем 2	01011000 01000111 01000001
Шифротекст	XGA

1. Шифр Вернама та криптостійкість

Чому ж не використовують абсолютно стійкий шифр?

Навіщо придумали інші шифри, якщо вони не ідеальні?

Недоліки:

- ✓ проблема генерації та зберігання ключа;
- ✓ проблема передавання ключа для дешифування.

2. Мережа Фейстеля

У 1971 році Хорст Фейстель (дослідницький центр IBM) створив шифр Lucifer, на базі якого згодом було розроблено шифр DES

Мережа Фейстеля – один з методів побудови блокових шифрів

Хорст Фейстель

2. Мережа Фейстеля

Дані, представлені в комп'ютерній пам'яті, розбиваються на блоки фіксованої довжини (наприклад, 64 біта, 128 біт).

Якщо останній фрагмент коротше довжини блоку – його доповнюють будь-яким способом (наприклад, незначущими нулями)

Ключ: послідовність бітів фіксованої довжини, з якої генеруються *N* раундових ключів за яким-небудь математичним правилом

2. Мережа Фейстеля

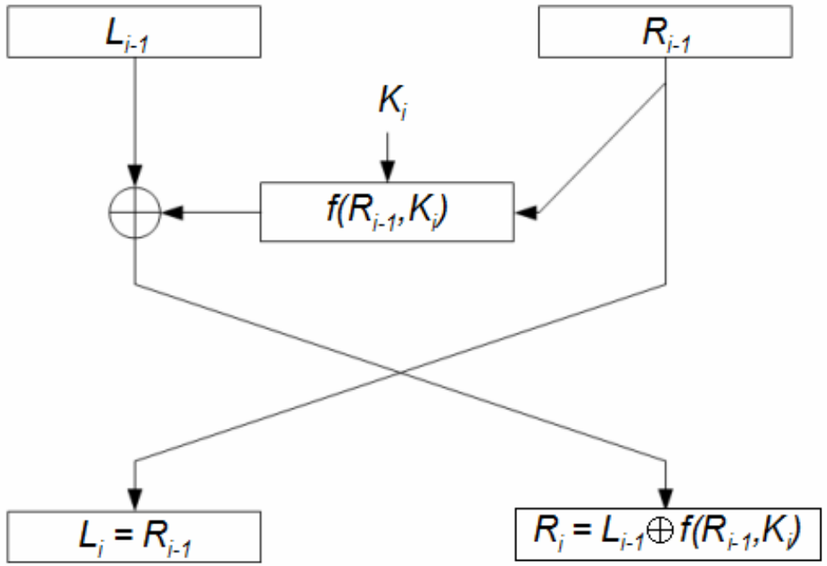
1. Кожен блок даних розбивається на дві рівні частини – ліву (*L*) і праву (*R*)

2. Права частина видозмінюється деякою функцією *f*(*R*,*K*) залежно від раундового ключа *K*

3. Здійснюється додавання за модулем 2 лівої частини *L* та *f*(*R*,*K*)

4. Результат додавання присвоюється новому правому підблоку, а правий підблок присвоюється без змін новому лівому підблоку (вхідні дані для наступного раунду)

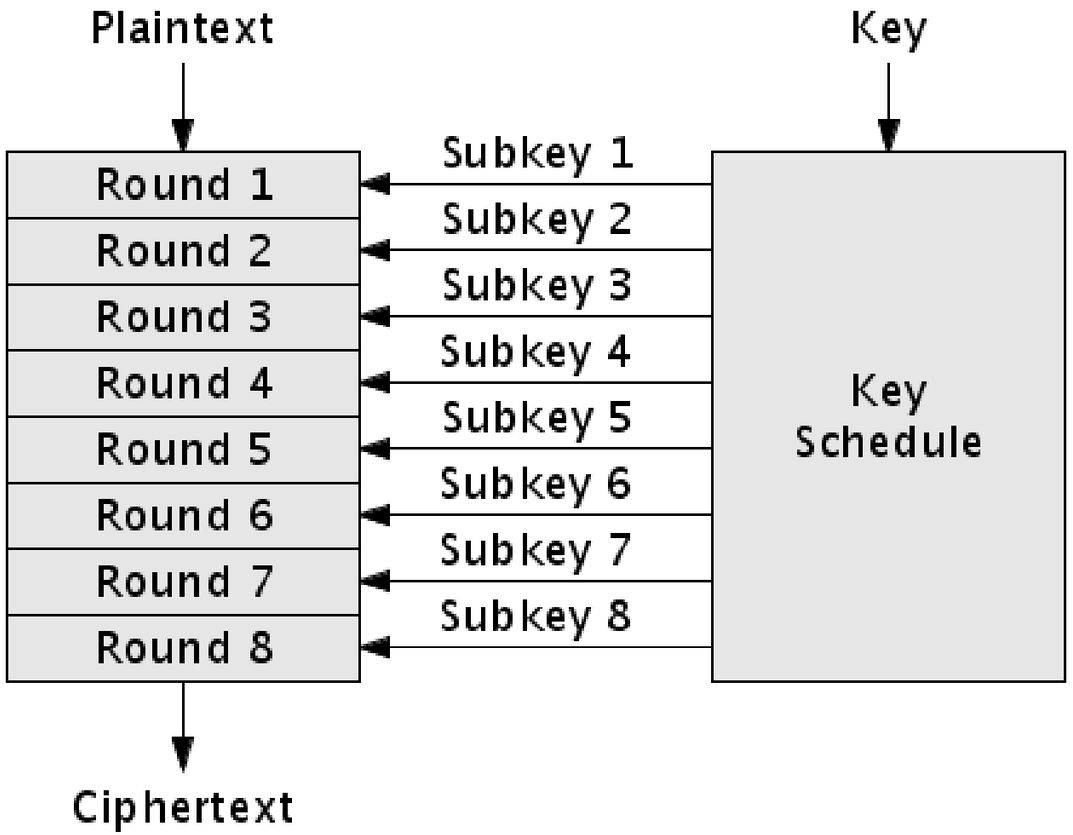
Шифрування:



2. Мережа Фейстеля

Описані операції повторюються *N-1* разів, де *N* – кількість раундів.

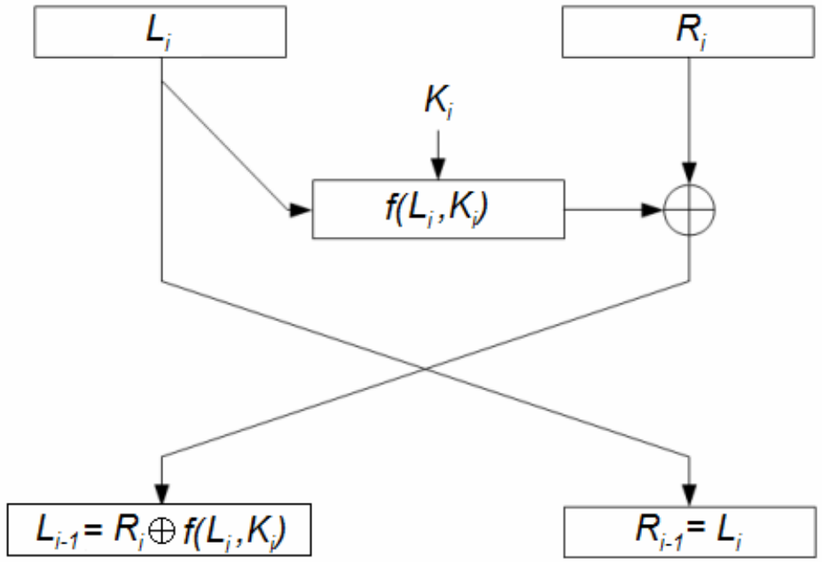
При переході від одного раунду до іншого міняються раундові ключі (K_0 на K_1 і т.д.)



2. Мережа Фейстеля

Дешифрування відбувається так само, як і шифрування, за винятком лише того, що ключі йдуть у зворотному порядку, тобто не від першого до *N*-го, а від *N*-го до першого

Дешифрування:



3. Алгоритм DES

DES (Data Encryption Standard) розроблений фірмою IBM і затверджений урядом США у 1976 році як офіційний стандарт шифрування

Ключ: 56 бітний блок + 8 біт контролю парності, що розміщені в позиціях 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64 (використовується при знаходженні помилок при обміні та зберіганні ключів)

3. Алгоритм DES

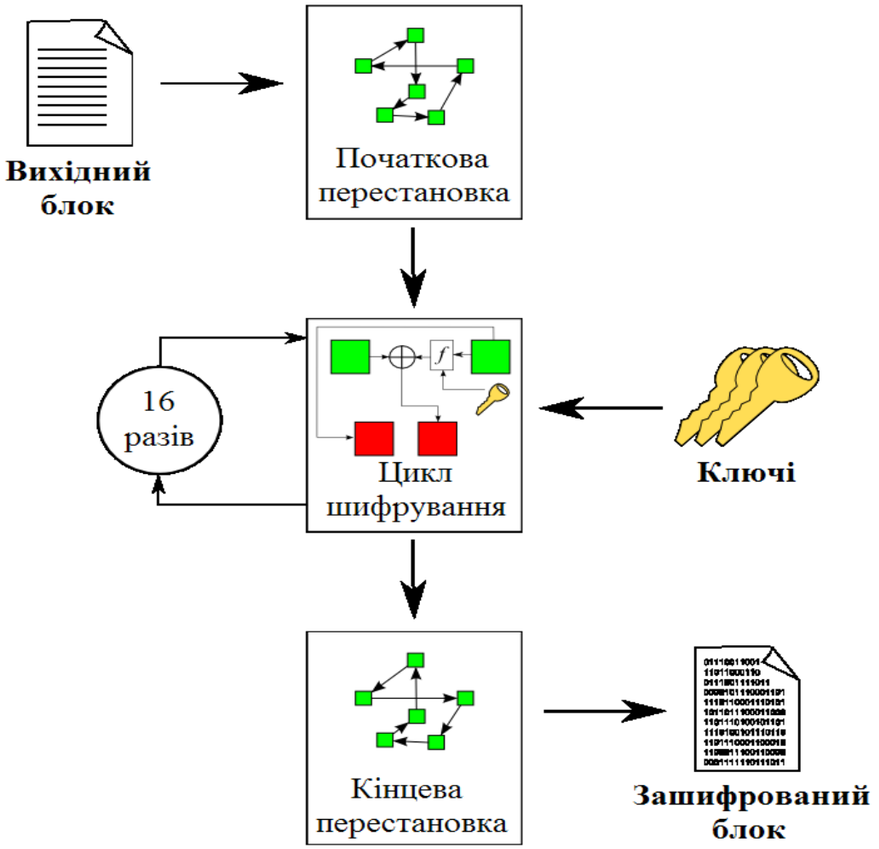
Загальна схема алгоритму DES

Вихідний текст – блок 64 біт

Процес шифрування складається з

- початкової перестановки;
- 16-ти раундів шифрування;
- кінцевої перестановки

Зашифрований текст – блок 64 біт



3. Алгоритм DES

Початкова перестановка

Початковий текст T (блок 64 біт) перетворюється за допомогою початкової перестановки IP(Initial Permutation) за таблицею

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

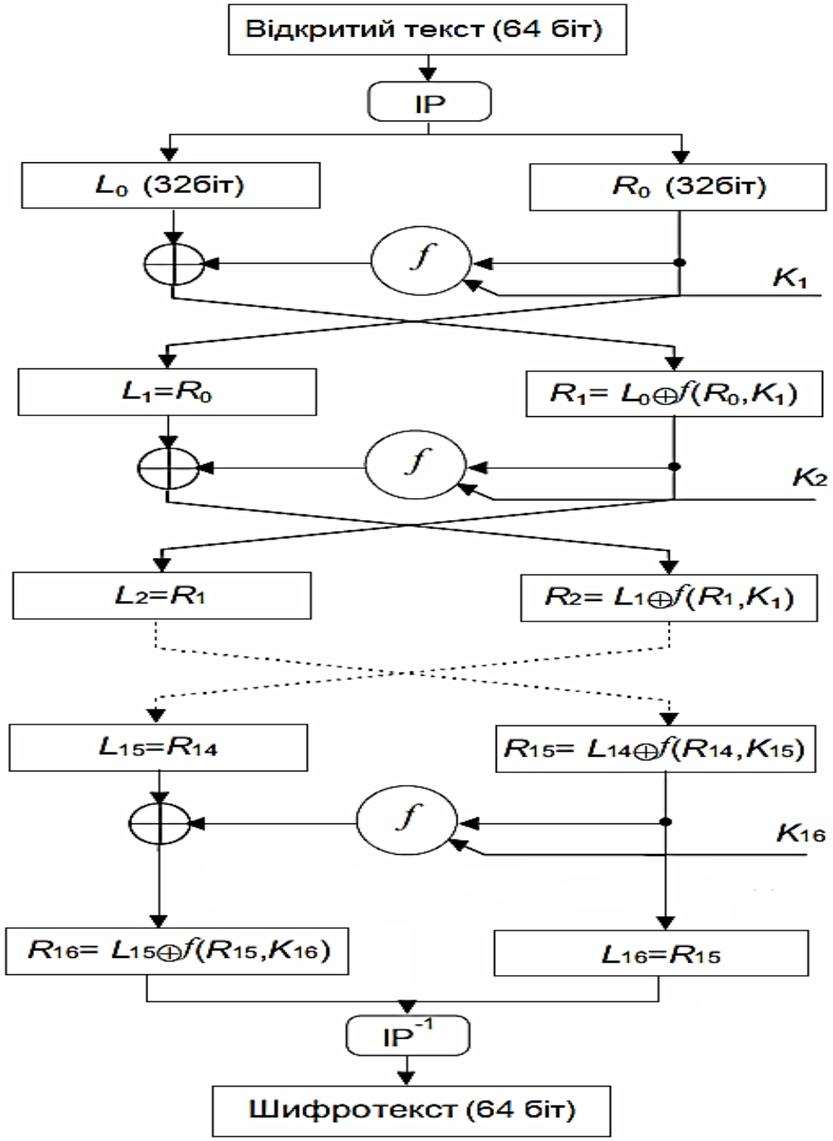
3. Алгоритм DES

Раунди шифрування за мережею Фейстеля

1. Розбити IP(T) на дві половини L_0, R_0, де L_0 – 32 старших біта, а R_0 – 32 молодших біта даного блоку

2. Права половина R_i – це бітове додавання L_{i-1} та $f(R_{i-1},K_i)$ за модулем 2: $R_i = L_{i-1} \oplus f(R_{i-1},K_i)$

3. Ліва половина L_i дорівнює правій половині попереднього блоку R_{i-1} без змін: $L_i = R_{i-1}$



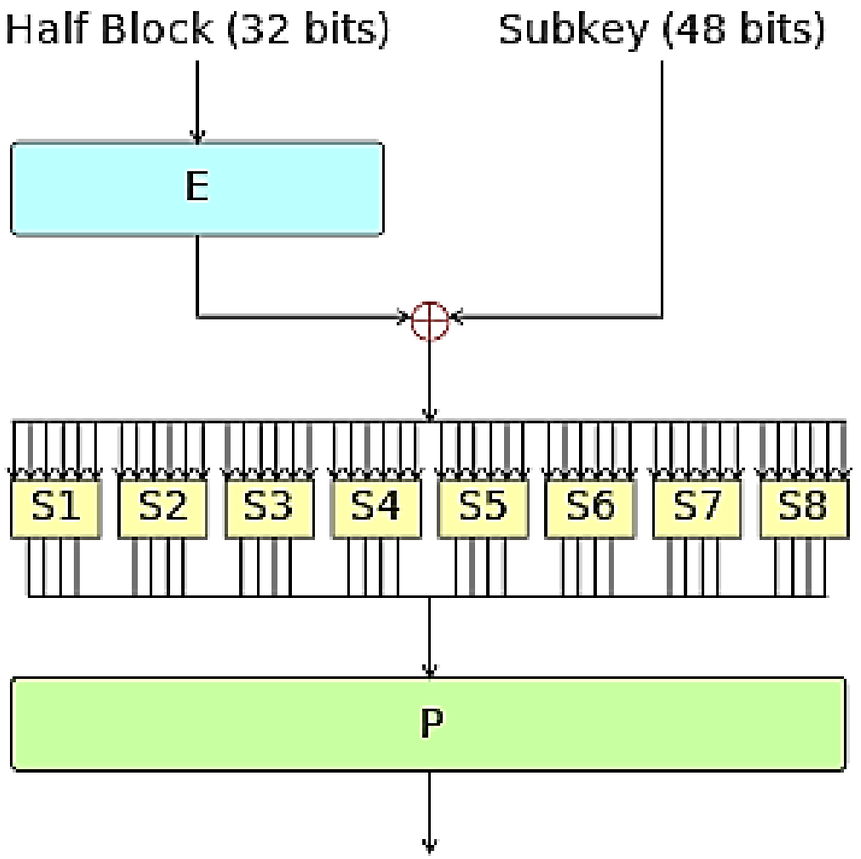
3. Алгоритм DES

Основна функція шифрування (функція Фейстеля)

Аргументи функції *f:*
32-бітовий вектор R_{i-1} та
48-бітовий раундовий ключ K_i

Для обчислення функції *f* використовуються:

- функція розширення *E;*
- перетворення *S*, яке складається з 8 перетворень *S*-блоків;
- перестановка *P*



3. Алгоритм DES

Функція *E* розширює 32-бітовий вектор R_{i-1} до 48-бітового вектора $E(R_{i-1})$ шляхом дублювання деяких бітів 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

Отриманий після розширення блок $E(R_{i-1})$ додається за модулем 2 із раундовими ключами K_i. Потім представляється у вигляді восьми послідовних блоків $E(R_{i-1}) = B_1B_2...B_8$

3. Алгоритм DES

Кожний B_j являється 6-бітовим блоком, що перетворюється у 4-бітовий блок B'_j за допомогою S-перетворень, що визначаються таблицями

	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	S1
1	0	15	7	4	14	2	13	1	10	6	12	11	9	5	3	8	
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	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0	15	1	8	14	6	11	3	4	9	7	2	13	12	0	5	10	S2
1	3	13	4	7	15	2	8	14	12	0	1	10	6	9	11	5	
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	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0	10	0	9	14	6	3	15	5	1	13	12	7	11	4	2	8	S3
1	13	7	0	9	3	4	6	10	2	8	5	14	12	11	15	1	
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	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	S4
1	13	8	11	5	6	15	0	3	4	7	2	12	1	10	14	9	
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	2	12	4	1	7	10	11	6	8	5	3	15	13	0	14	9	S5
1	14	11	2	12	4	7	13	1	5	0	15	10	3	9	8	6	
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	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0	12	1	10	15	9	2	6	8	0	13	3	4	14	7	5	11	S6
1	10	15	4	2	7	12	9	5	6	1	13	14	0	11	3	8	
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	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0	4	11	2	14	15	0	8	13	3	12	9	7	5	10	6	1	S7
1	13	0	11	7	4	9	1	10	14	3	5	12	2	15	8	6	
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	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0	13	2	8	4	6	15	11	1	10	9	3	14	5	0	12	7	S8
1	1	15	13	8	10	3	7	4	12	5	6	11	0	14	9	2	
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	

3. Алгоритм DES

Приклад 3.1:

B_3 = 101111. Знайти B'_3 - ?

Перший і останній розряди B_3 – двійковий запис числа a, $0 \le a \le 3$.

$a = 11_2 = 3_{10}$

Середні чотири розряди B_3 – двійковий запис числа b, $0 \le b \le 15$.

$b = 0111_2 = 7_{10}$

Пара чисел (a,b) визначає число, що знаходиться на перетині рядка a та стовпця b в таблиці S-перетворень.

У таблиці S3, число обумовлене парою (3,7)=7. Звідси B'_3 = 0111.

3. Алгоритм DES

Отриманий 32-бітовий блок $B'_1B'_2...B'_8$ перетворюється за допомогою перестановки P, що задана таблицею

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

3. Алгоритм DES

Генерація ключів

З ключа розміром 56 біт генерується 16 штук 48-бітних раундових ключів

Видаляються 8 контрольних бітів та виконується перестановка початкового 56-бітного ключа

57	49	41	33	25	17	9	C_0
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	D_0
7	62	54	46	38	30	22	
14	6	61	53	45	37	29	
21	13	5	28	20	12	4	

3. Алгоритм DES

56-бітовий ключ ділиться на дві половини по 28 біт C_0 та D_0, які потім циклічно зсуваються на один чи два біти ліворуч в залежності від раунду

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

3. Алгоритм DES

Приклад 2.2:

Побудуємо C_1, D_1 з C_0, D_0.

Для цього виконаємо циклічний зсув ліворуч на один біт кожної половини

57	49	41	33	25	17	9	
1	58	50	42	34	26	18	C_0
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	D_0
14	6	61	53	45	37	29	
21	13	5	28	20	12	4	

49	41	33	25	17	9	1	
58	50	42	34	26	18	10	C_1
2	59	51	43	35	27	19	
11	3	60	52	44	36	57	
55	47	39	31	23	15	7	
62	54	46	38	30	22	14	D_1
6	61	53	45	37	29	21	
13	5	28	20	12	4	63	

3. Алгоритм DES

Після зсуву C_i, D_i вибирається 48 бітів з 56 бітів та міняється їх порядок за таблицею

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
44	49	39	56	34	53
46	42	50	36	29	32

3. Алгоритм DES

Кінцева перестановка

Кінцева перестановка IP^{-1} є оберненою до перестановки IP та використовується для відновлення позицій. Кінцева перестановка визначається таблицею

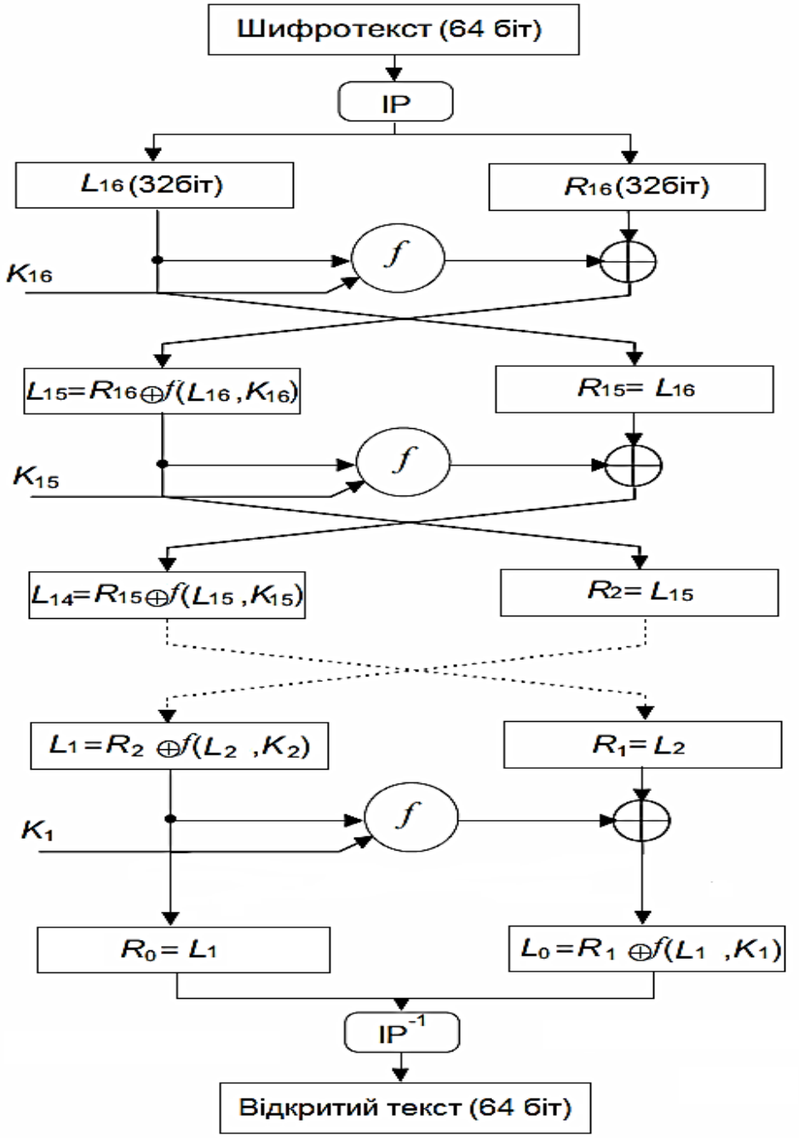
40	8	48	16	56	24	64	32
39	7	47	15	55	23	63	31
38	6	46	14	54	22	62	30
37	5	45	13	53	21	61	29
36	4	44	12	52	20	60	28
35	3	43	11	51	19	59	27
34	2	42	10	50	18	58	26
33	1	41	9	49	17	57	25

3. Алгоритм DES

Дешифрування

При дешифруванні даних всі дії відбуваються в зворотному порядку. Ключі також застосовуються в зворотному порядку

Функція *f*, перестановки *IP* і IP^{-1} такі самі як і в процесі зашифрування



3. Алгоритм DES

DES Visualization

3. Алгоритм DES

Лавинний ефект

Лавинний ефект означає, що невеликі зміни в початкових даних (чи в ключі) можуть викликати значні зміни в зашифрованих даних (в DES проявляється вже на 4-5 раунді).

Приклад 3.1:

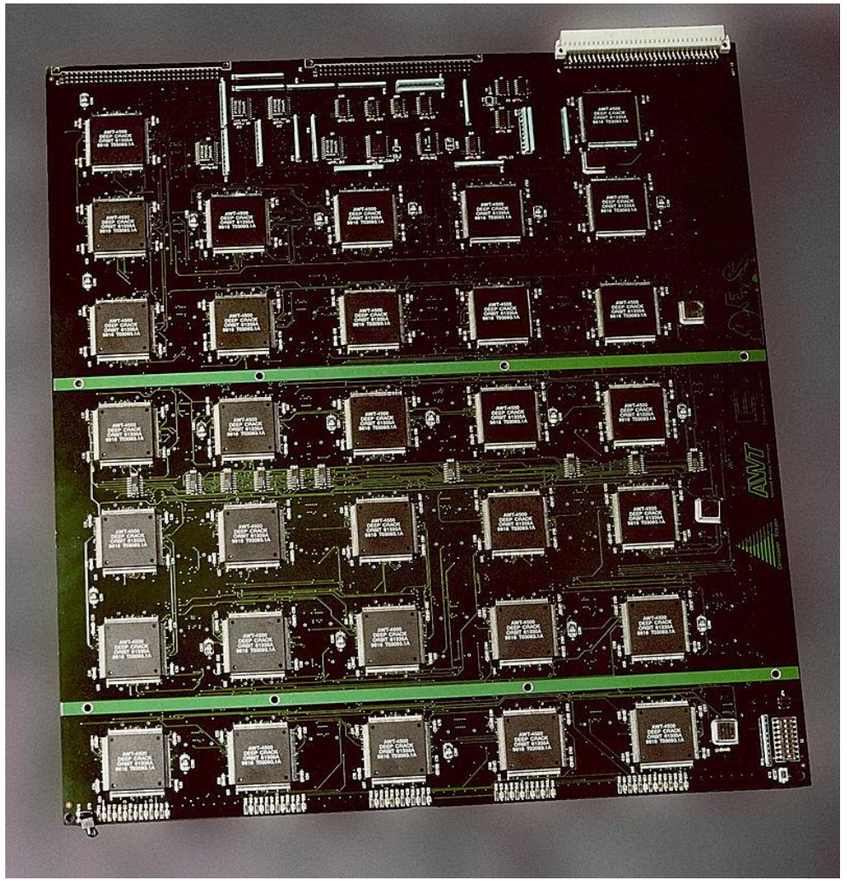
	Перший випадок	*Другий випадок*
Відкритий текст	0000000000000000_{16}	0000000000000001_{16}
Ключ	$23234513987aba23_{16}$	$23234513987aba23_{16}$
Шифротекст	$4789fd476e82a5f1_{16}$	$0a4ed5c15a63fea3_{16}$

3. Алгоритм DES

Довжина ключа

Для здійснення атаки «грубою силою» потрібно перевірити 2^{56} ключів.

Спеціальний комп'ютер Deep Crack був створений 1998 р., завдяки йому ключ було знайдено за 56 год.



3. Алгоритм DES

Диференційний криптоаналіз DES

Запропонований у 1990 р. ізраїльськими математиками Елі Біхамом та Аді Шаміром.

Ідея: із множини відкритих текстів (шифротекстів) обирати пари із заданою різницею та на підставі аналізу кожної пари знаходити можливі варіанти ключа.

3. Алгоритм DES

Лінійний криптоаналіз DES

Метод винайдений у 1993 р. Японцем Міцуру Мацуі.

Ідея: будуються співвідношення між відкритим текстом, шифротекстом та ключем (лінійна апроксимація) та застосовуються із відомими парами відкритий текст – шифротекст.

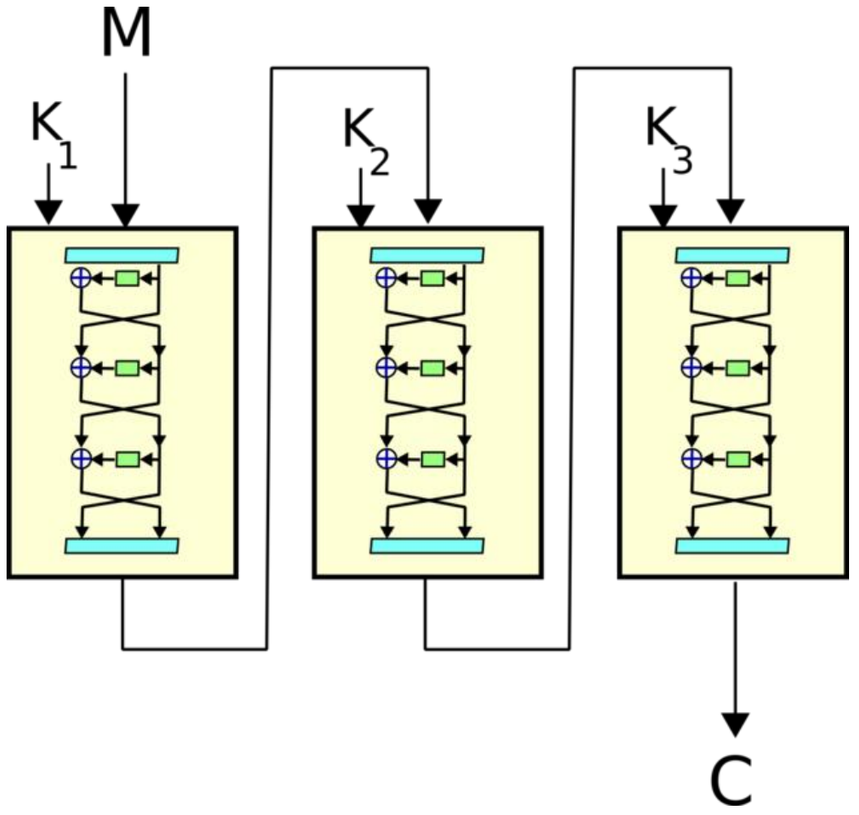
4. Модифікації DES

Модифікації DES	Опис
Подвійний DES (2DES) **Потрійний DES** (3DES)	збільшено довжину ключів
DES з незалежними підключами	використання різних підключів на кожному раунді, не створюючи їх з одного 56-бітового ключа
DES зі зміненими S-блоками	використовується змінний порядок S-блоків або міняється вміст самих S-блоків
DESX	використовується метод відбілювання ключа – операція накладання фрагмента ключа на вхід і (або) вихід алгоритму

4. Модифікації DES

3DES

З метою ефективного збільшення довжини ключа, в 1978 році був запропонований алгоритм 3DES або потрійний DES (TripleDES).

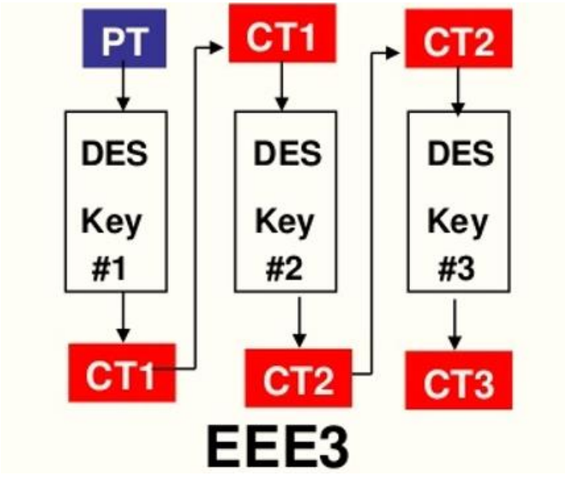


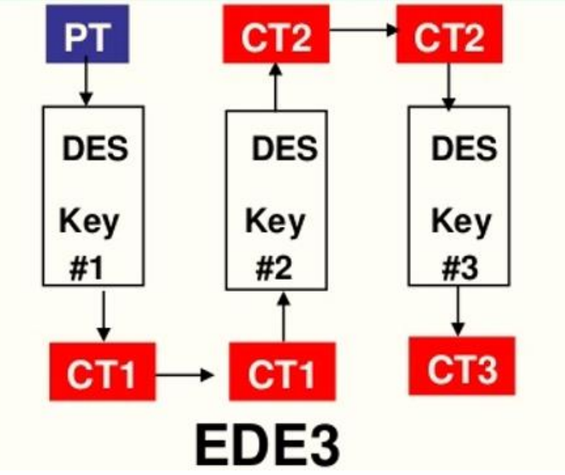
4. Модифікації DES

Варіанти 3DES

DES-EEE3 – шифрування виконується три рази з трьома різними ключами

DES-EDE3 – виконуються операції шифрування, дешифрування та знову шифрування з трьома різними ключами





4. Модифікації DES

Варіанти 3DES

DES-EEE2 – як DES-EEE3, але на першому і третьому кроці використовується однаковий ключ

DES-EDE2 – як DES-EDE3, але на першому і третьому кроці використовується однаковий ключ