ЛЕКЦІЯ 7

ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Національний стандарт шифрування ДСТУ 7624:2014 («Калина»)

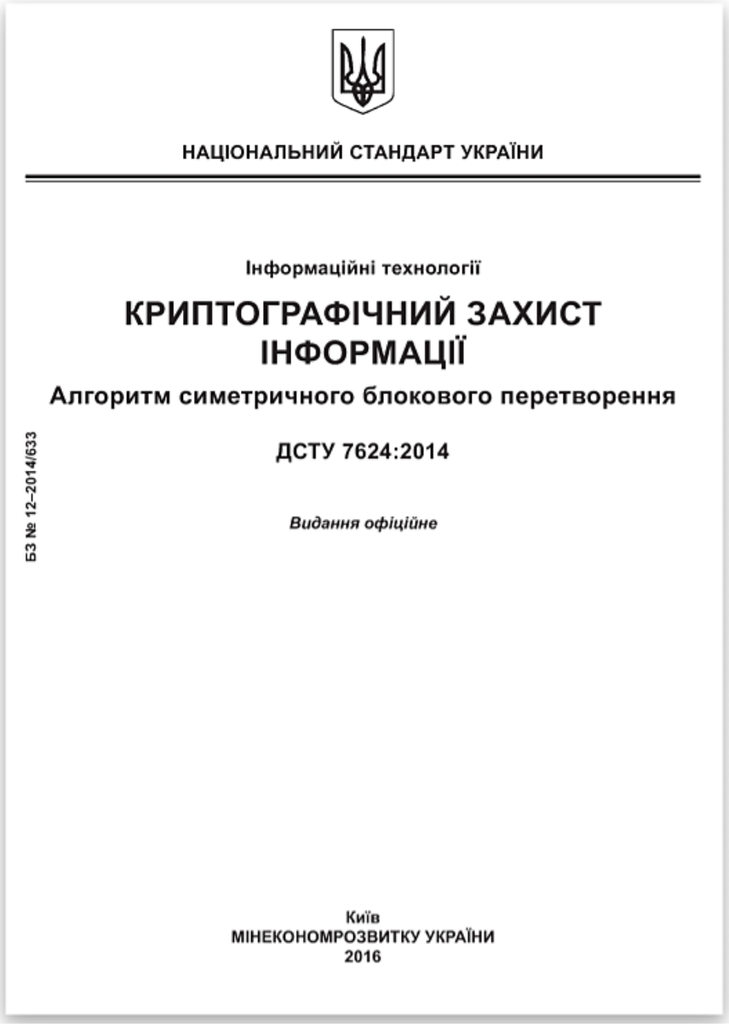
План

1. Алгоритм шифрування «Калина»
2. Режими роботи «Калина»
3. «Калина» vs AES

1. Алгоритм шифрування «Калина»

«**Калина**» – блоковий симетричний шифр, описаний у національному стандарті України ***ДСТУ 7624:2014*** (введений в дію з 1 липня 2015 р.).

Стандарт розроблено у співпраці Держспецзв'язку, ПАТ «Інститут інформаційних технологій» та провідних українських науковців на чолі із Горбенком І. Д.



НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ УКРАЇНИ

Інформаційні технології

КРИПТОГРАФІЧНИЙ ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

Алгоритм симетричного блокового перетворення

ДСТУ 7624:2014

Видання офіційне

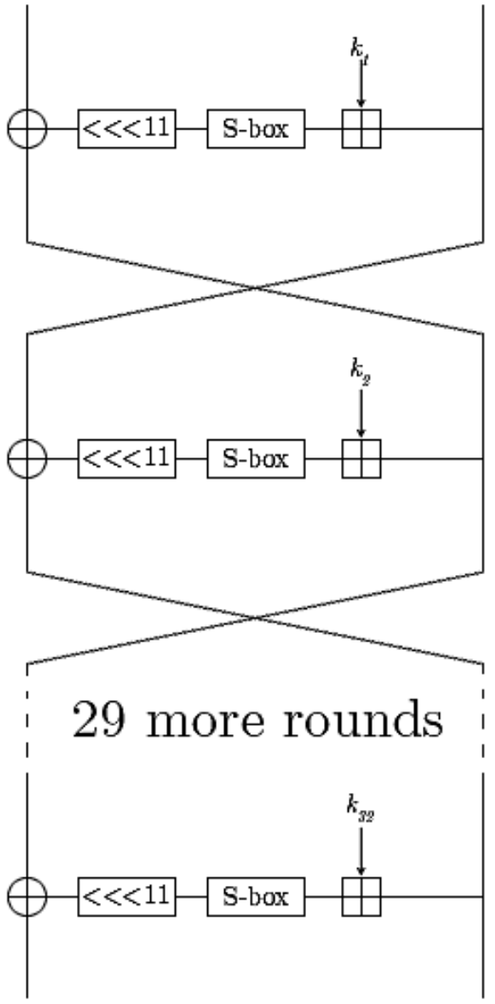
БЗ № 12–2014/633

Київ
МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ
2016

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Раніше в Україні діяв ДСТУ ГОСТ 28147:2009 (перевиданий ГОСТ 28147-89 – радянський і російський стандарт шифрування).

Цей стандарт вже також виведений із дії в Білорусі та видозмінений у РФ.



1. Алгоритм шифрування «Калина»

Загальна характеристика ДСТУ ГОСТ 28147:2009

Розмір **блоку -** 64 біт, довжина **ключа** – 256 біт

Має структуру мережі Фейстеля з 32 раундів.

Передбачає 4 режими роботи:

- Шифрування в режимі простої заміни
- Шифрування в режимі гамування
- Шифрування в режимі гамування зі зворотним зв’язком
- Вироблення імітовставки

Криптостійкість базується на великій кількості раундів і використанні таблиць підстановки S.

Основна слабкість – невеликий розмір блоку та невизначеність таблиць підстановки в стандарті (їх конкретні значення мають зберігатися в секреті)

1. Алгоритм шифрування «Калина»

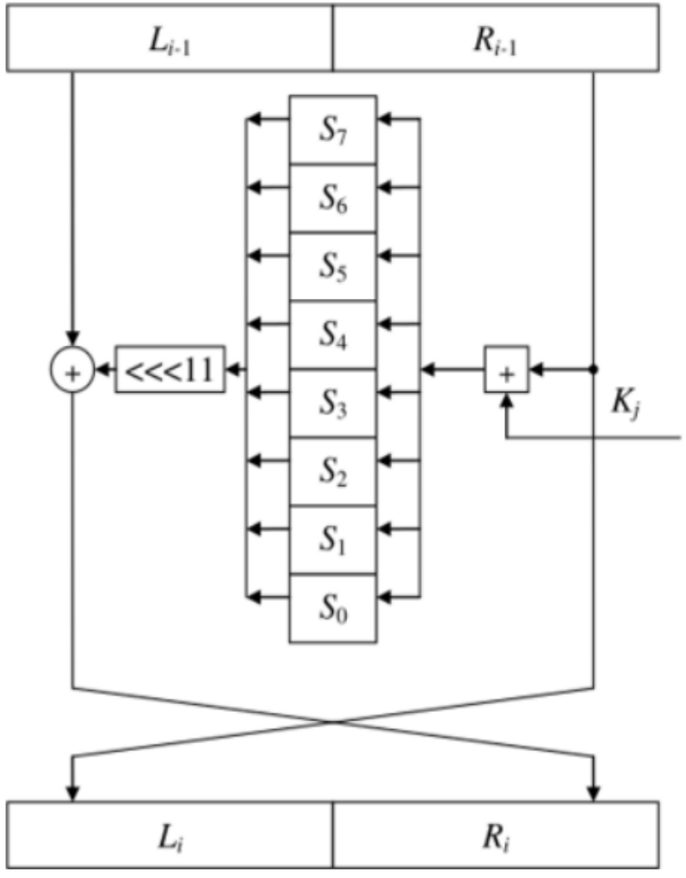
Зашифрування за алгоритмом ДСТУ ГОСТ 28147:2009

I. Поділ 64-бітного блоку відкритого тексту на дві половини: L_{i-1} та R_{i-1}

II. 32 раунди, кожен з яких складається з чотирьох етапів:

1. Додавання по модулю 2^{32}
2. Нелінійна заміна S
3. Циклічний зсув
4. Додавання по модулю 2

Результат записується в R_i, значення регістру R_{i-1} переписується в L_i (в останньому раунді обмін не здійснюється).



1. Алгоритм шифрування «Калина»

Раундові ключі ДСТУ ГОСТ 28147

В ГОСТ 28147 не використовується процедура розширення ключа. Ключ К довжиною 256 біт розглядається як 8 32-бітних підключів:

$$К = К_1 || К_2 || К_3 || К_4 || К_5 || К_6 || К_7 || К_8$$

Ключі $К_9 \ldots К_{24}$ є циклічним повторенням ключів $К_1 \ldots К_8$. Ключі $К_{25} \ldots К_{32}$ є ключами $К_1 \ldots К_8$, що йдуть в зворотному порядку.

Під час розшифрування порядок підключів зворотній.

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Основні характеристики

1) Спроектований на основі SP-мережі (AES);

2) Забезпечує захист від відомих методів криптоаналізу;

3) Має високу швидкодію на сучасних і перспективних програмних та програмно-апаратних платформах;

4) Визначає 10 режимів роботи.

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Розмір **блоку** 128, 256 або 512 бітів

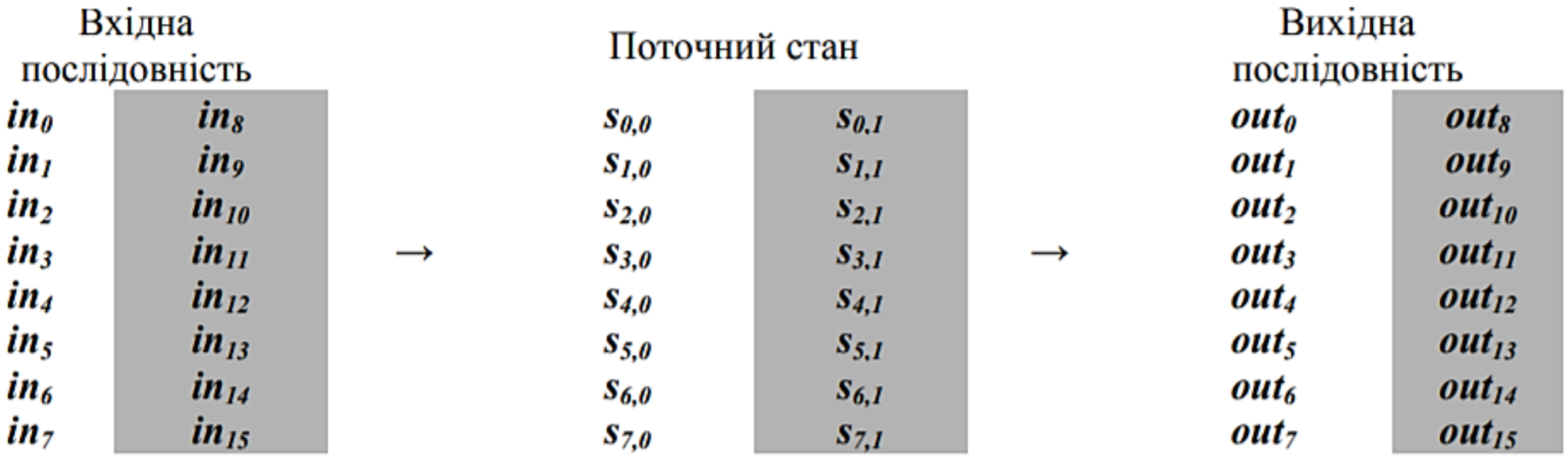
Матриця стану має 8 рядків та *Nb* стовпців байтів (64 × *Nb* біт), що являють собою елементи поля $GF(2^8)$

Матриця стану при *Nb* = 2:

$$\begin{pmatrix} s_{0,0} & s_{0,1} \\ s_{1,0} & s_{1,1} \\ s_{2,0} & s_{2,1} \\ s_{3,0} & s_{3,1} \\ s_{4,0} & s_{4,1} \\ s_{5,0} & s_{5,1} \\ s_{6,0} & s_{6,1} \\ s_{7,0} & s_{7,1} \end{pmatrix}$$

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Заповнення матриці стану (128 біт)



1. Алгоритм шифрування «Калина»

Довжина **ключа** може бути 128, 256 або 512 бітів

Ключ: матриця байтів, яка має 8 рядків *Nk* стовпців

Розмір блока і довжина ключа використовуються у позначенні шифру як параметр. Наприклад, Калина-128/256

Матриця ключа при *Nk* = 4:

$$\begin{pmatrix} k_{0,0} & k_{0,1} & k_{0,2} & k_{0,3} \\ k_{1,0} & k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} \\ k_{2,0} & k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} \\ k_{3,0} & k_{3,1} & k_{3,2} & k_{3,3} \\ k_{4,0} & k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} \\ k_{5,0} & k_{5,1} & k_{5,2} & k_{5,3} \\ k_{6,0} & k_{6,1} & k_{6,2} & k_{6,3} \\ k_{7,0} & k_{7,1} & k_{7,2} & k_{7,3} \end{pmatrix}$$

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Кількість раундів шифрування алгоритму «Калина»

Розмір блоку	***Кількість раундів шифрування для різних довжин ключа***		
	Довжина ключа ***128*** *бітів (Nk = 2)*	*Довжина ключа* ***256*** *бітів (Nk = 4)*	*Довжина ключа* ***512*** *бітів (Nk = 8)*
128 *(Nb = 2)*	10	14	–
256 *(Nb = 4)*	–	14	18
512 *(Nb = 8)*	–	–	18

Довжина ключа збігається з розміром блока або удвічі більша за нього

1. Алгоритм шифрування «Калина»

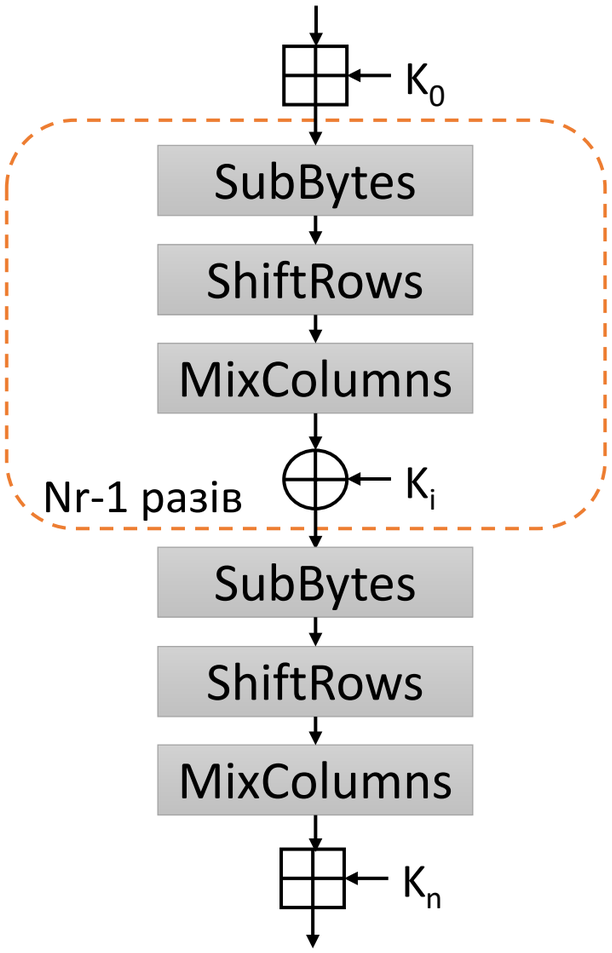
Зашифрування за алгоритмом «Калина»

I. Додавання з нульовим ключем по модулю 2^{64}

II. *Nr-1* раундів, кожен з яких складається з чотирьох етапів:

1. Підстановка байтів;
2. Зсув рядків;
3. Перемішування стовпців;
4. Додавання раундового ключа по модулю 2

III. Завершальний раунд *Nr*, в якому замість $\oplus$ виконується додавання по модулю 2^{64}



1. Алгоритм шифрування «Калина»

Додавання з нульовим підключем по модулю 2^{64}

Операція $\boxplus$ забезпечує побітове додавання стовпців раундового ключа до відповідних стовпців матриці стану за модулем 2^{64}. При виконанні додавання менші значущі байти мають менші індекси, тобто використовується формат little endian.

$$\begin{pmatrix} s_{0,0} & s_{0,1} & s_{0,2} & s_{0,3} \\ s_{1,0} & s_{1,1} & s_{1,2} & s_{1,3} \\ s_{2,0} & s_{2,1} & s_{2,2} & s_{2,3} \\ s_{3,0} & s_{3,1} & s_{3,2} & s_{3,3} \\ s_{4,0} & s_{4,1} & s_{4,2} & s_{4,3} \\ s_{5,0} & s_{5,1} & s_{5,2} & s_{5,3} \\ s_{6,0} & s_{6,1} & s_{6,2} & s_{6,3} \\ s_{7,0} & s_{7,1} & s_{7,2} & s_{7,3} \end{pmatrix} \boxplus \begin{pmatrix} k_{0,0} & k_{0,1} & k_{0,2} & k_{0,3} \\ k_{1,0} & k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} \\ k_{2,0} & k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} \\ k_{3,0} & k_{3,1} & k_{3,2} & k_{3,3} \\ k_{4,0} & k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} \\ k_{5,0} & k_{5,1} & k_{5,2} & k_{5,3} \\ k_{6,0} & k_{6,1} & k_{6,2} & k_{6,3} \\ k_{7,0} & k_{7,1} & k_{7,2} & k_{7,3} \end{pmatrix}$$

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Приклад 1.1:

$$\begin{pmatrix} C3 & 5A \\ 1E & 21 \\ E8 & A4 \\ A8 & 35 \\ 7E & FD \\ 2C & B2 \\ ED & 5B \\ 24 & 92 \end{pmatrix} \boxplus \begin{pmatrix} 95 & B7 \\ CD & 26 \\ 56 & 53 \\ 60 & E1 \\ 91 & 71 \\ D3 & 80 \\ 27 & F3 \\ 65 & 81 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 58 & 11 \\ EC & 48 \\ 3E & F7 \\ 09 & 16 \\ 10 & 6F \\ 00 & 33 \\ 15 & 4F \\ 8A & 14 \end{pmatrix}$$

C31EE8A87E2CED245A21A435FDB25B92 (big endian)

925BB2FD35A4215A24ED2C7EA8E81EC3 (little endian)

95CD566091D32765B72653E17180F381 (big endian)

\+ \+

81F38071E15326B76527D3916056CD95 (little endian)

(925BB2FD35A4215A + 81F38071E15326B7) mod 2^{64} = 144F336F16F74811

(24ED2C7EA8E81EC3 + 6527D3916056CD95) mod 2^{64} = 8A150010093EEC58

144F336F16F748118A150010093EEC58 (little endian)

58EC3E091000158A1148F7166F334F14 (big endian)

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Приклад 1.1:

$(925BB2FD35A4215A + 81F38071E15326B7) \bmod 2^{64} = 144F336F16F74811$

$(24ED2C7EA8E81EC3 + 6527D3916056CD95) \bmod 2^{64} = 8A150010093EEC58$

```
  1001 0010 0101 1011 1011 0010 1111 1101 0011 0101 1010 0100 0010 0001 0101 1010
+ 1000 0001 1111 0011 1000 0000 0111 0001 1110 0001 0101 0011 0010 0110 1011 0111
-----------------------------------------------------------------------------------
  1 0001 0100 0100 1111 0011 0011 0110 1111 0001 0110 1111 0111 0100 1000 0001 0001
  1    4    4    F    3    3    6    F    1    6    F    7    4    8    1    1
```

65-й біт → 1

```
  0010 0100 1110 1101 0010 1100 0111 1110 1010 1000 1110 1000 0001 1110 1100 0011
+ 0110 0101 0010 0111 1101 0011 1001 0001 0110 0000 0101 0110 1100 1101 1001 0101
-----------------------------------------------------------------------------------
  1000 1010 0001 0101 0000 0000 0001 0000 0000 1001 0011 1110 1110 1100 0101 1000
  8    A    1    5    0    0    1    0    0    9    3    E    E    C    5    8
```

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Підстановка байтів

Кожен байт матриці стану замінюється відповідно до заданої таблиці підстановки (загалом є 4 таблиці)

Підстановка π_0:

A8	43	5F	06	6B	75	6C	59	71	DF	87	95	17	F0	D8	09
6D	F3	1D	CB	C9	4D	2C	AF	79	E0	97	FD	6F	4B	45	39
3E	DD	A3	4F	B4	B6	9A	0E	1F	BF	15	E1	49	D2	93	C6
92	72	9E	61	D1	63	FA	EE	F4	19	D5	AD	58	A4	BB	A1
DC	F2	83	37	42	E4	7A	32	9C	CC	AB	4A	8F	6E	04	27
2E	E7	E2	5A	96	16	23	2B	C2	65	66	0F	BC	A9	47	41
34	48	FC	B7	6A	88	A5	53	86	F9	5B	DB	38	7B	C3	1E
22	33	24	28	36	C7	B2	3B	8E	77	BA	F5	14	9F	08	55
9B	4C	FE	60	5C	DA	18	46	CD	7D	21	B0	3F	1B	89	FF
EB	84	69	3A	9D	D7	D3	70	67	40	B5	DE	5D	30	91	B1
78	11	01	E5	00	68	98	A0	C5	02	A6	74	2D	0B	A2	76
B3	BE	CE	BD	AE	E9	8A	31	1C	EC	F1	99	94	AA	F6	26
2F	EF	E8	8C	35	03	D4	7F	FB	05	C1	5E	90	20	3D	82
F7	EA	0A	0D	7E	F8	50	1A	C4	07	57	B8	3C	62	E3	C8
AC	52	64	10	D0	D9	13	0C	12	29	51	B9	CF	D6	73	8D
81	54	C0	ED	4E	44	A7	2A	85	25	E6	CA	7C	8B	56	80

Підстановка π_1:

CE	BB	EB	92	EA	CB	13	C1	E9	3A	D6	B2	D2	90	17	F8
42	15	56	B4	65	1C	88	43	C5	5C	36	BA	F5	57	67	8D
31	F6	64	58	9E	F4	22	AA	75	0F	02	B1	DF	6D	73	4D
7C	26	2E	F7	08	5D	44	3E	9F	14	C8	AE	54	10	D8	BC
1A	6B	69	F3	BD	33	AB	FA	D1	9B	68	4E	16	95	91	EE
4C	63	8E	5B	CC	3C	19	A1	81	49	7B	D9	6F	37	60	CA
E7	2B	48	FD	96	45	FC	41	12	0D	79	E5	89	8C	E3	20
30	DC	B7	6C	4A	B5	3F	97	D4	62	2D	06	A4	A5	83	5F
2A	DA	C9	00	7E	A2	55	BF	11	D5	9C	CF	0E	0A	3D	51
7D	93	1B	FE	C4	47	09	86	0B	8F	9D	6A	07	B9	B0	98
18	32	71	4B	EF	3B	70	A0	E4	40	FF	C3	A9	E6	78	F9
8B	46	80	1E	38	E1	B8	A8	E0	0C	23	76	1D	25	24	05
F1	6E	94	28	9A	84	E8	A3	4F	77	D3	85	E2	52	F2	82
50	7A	2F	74	53	B3	61	AF	39	35	DE	CD	1F	99	AC	AD
72	2C	DD	D0	87	BE	5E	A6	EC	04	C6	03	34	FB	DB	59
B6	C2	01	F0	5A	ED	A7	66	21	7F	8A	27	C7	C0	29	D7

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Підстановка π_2:

93	D9	9A	B5	98	22	45	FC	BA	6A	DF	02	9F	DC	51	59
4A	17	2B	C2	94	F4	BB	A3	62	E4	71	D4	CD	70	16	E1
49	3C	C0	D8	5C	9B	AD	85	53	A1	7A	C8	2D	E0	D1	72
A6	2C	C4	E3	76	78	B7	B4	09	3B	0E	41	4C	DE	B2	90
25	A5	D7	03	11	00	C3	2E	92	EF	4E	12	9D	7D	CB	35
10	D5	4F	9E	4D	A9	55	C6	D0	7B	18	97	D3	36	E6	48
56	81	8F	77	CC	9C	B9	E2	AC	B8	2F	15	A4	7C	DA	38
1E	0B	05	D6	14	6E	6C	7E	66	FD	B1	E5	60	AF	5E	33
87	C9	F0	5D	6D	3F	88	8D	C7	F7	1D	E9	EC	ED	80	29
27	CF	99	A8	50	0F	37	24	28	30	95	D2	3E	5B	40	83
B3	69	57	1F	07	1C	8A	BC	20	EB	CE	8E	AB	EE	31	A2
73	F9	CA	3A	1A	FB	0D	C1	FE	FA	F2	6F	BD	96	DD	43
52	B6	08	F3	AE	BE	19	89	32	26	B0	EA	4B	64	84	82
6B	F5	79	BF	01	5F	75	63	1B	23	3D	68	2A	65	E8	91
F6	FF	13	58	F1	47	0A	7F	C5	A7	E7	61	5A	06	46	44
42	04	A0	DB	39	86	54	AA	8C	34	21	8B	F8	0C	74	67

Підстановка π_3:

68	8D	CA	4D	73	4B	4E	2A	D4	52	26	B3	54	1E	19	1F
22	03	46	3D	2D	4A	53	83	13	8A	B7	D5	25	79	F5	BD
58	2F	0D	02	ED	51	9E	11	F2	3E	55	5E	D1	16	3C	66
70	5D	F3	45	40	CC	E8	94	56	08	CE	1A	3A	D2	E1	DF
B5	38	6E	0E	E5	F4	F9	86	E9	4F	D6	85	23	CF	32	99
31	14	AE	EE	C8	48	D3	30	A1	92	41	B1	18	C4	2C	71
72	44	15	FD	37	BE	5F	AA	9B	88	D8	AB	89	9C	FA	60
EA	BC	62	0C	24	A6	A8	EC	67	20	DB	7C	28	DD	AC	5B
34	7E	10	F1	7B	8F	63	A0	05	9A	43	77	21	BF	27	09
C3	9F	B6	D7	29	C2	EB	C0	A4	8B	8C	1D	FB	FF	C1	B2
97	2E	F8	65	F6	75	07	04	49	33	E4	D9	B9	D0	42	C7
6C	90	00	8E	6F	50	01	C5	DA	47	3F	CD	69	A2	E2	7A
A7	C6	93	0F	0A	06	E6	2B	96	A3	1C	AF	6A	12	84	39
E7	B0	82	F7	FE	9D	87	5C	81	35	DE	B4	A5	FC	80	EF
CB	BB	6B	76	BA	5A	7D	78	0B	95	E3	AD	74	98	3B	36
64	6D	DC	F0	59	A9	4C	17	7F	91	B8	C9	57	1B	E0	61

Для перетворення може використовуватися й інший набір підстановок

1. Алгоритм шифрування «Калина»

До байтів одного рядка поточного стану застосовується одна й та сама підстановка.

$s_{0,i}$	0-рядок	π_0
$s_{1,i}$	1-рядок	π_1
$s_{2,i}$	2-рядок	π_2
$s_{3,i}$	3-рядок	π_3
$s_{4,i}$	4-рядок	π_0
$s_{5,i}$	5-рядок	π_1
$s_{6,i}$	6-рядок	π_2
$s_{7,i}$	7-рядок	π_3

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	A8	43	5F	06	6B	75	6C	59	71	DF	87	95	17	F0	D8	09
1	6D	F3	1D	CB	C9	4D	2C	AF	79	E0	97	FD	6F	4B	45	39
2	3E	DD	A3	4F	B4	B6	9A	0E	1F	BF	15	E1	49	D2	93	C6
3	92	72	9E	61	D1	63	FA	EE	F4	19	D5	AD	58	A4	BB	A1
4	DC	F2	83	37	42	E4	7A	32	9C	CC	AB	4A	8F	6E	04	27
5	2E	E7	E2	5A	96	16	23	2B	C2	65	66	0F	BC	A9	47	41
6	34	48	FC	B7	6A	88	A5	53	86	F9	5B	DB	38	7B	C3	1E
7	22	33	24	28	36	C7	B2	3B	8E	77	BA	F5	14	9F	08	55
8	9B	4C	FE	60	5C	DA	18	46	CD	7D	21	B0	3F	1B	89	FF
9	EB	84	69	3A	9D	D7	D3	70	67	40	B5	DE	5D	30	91	B1
A	78	11	01	E5	00	68	98	A0	C5	02	A6	74	2D	0B	A2	76
B	B3	BE	CE	BD	AE	E9	8A	31	1C	EC	Fl	99	94	AA	F6	26
C	2F	EF	E8	8C	35	03	D4	7F	FB	05	Cl	5E	90	20	3D	82
D	F7	EA	OA	0D	7E	F8	50	1A	C4	07	57	B8	3C	62	E3	C8
E	AC	52	64	10	D0	D9	13	OC	12	29	51	B9	CF	D6	73	8D
F	81	54	C0	ED	4E	44	A7	2A	85	25	E6	CA	7C	8B	56	80

Результат підстановки для значення 5A – це число 66, що знаходиться в таблиці на перетині 6-го рядка та 11 стовпця.

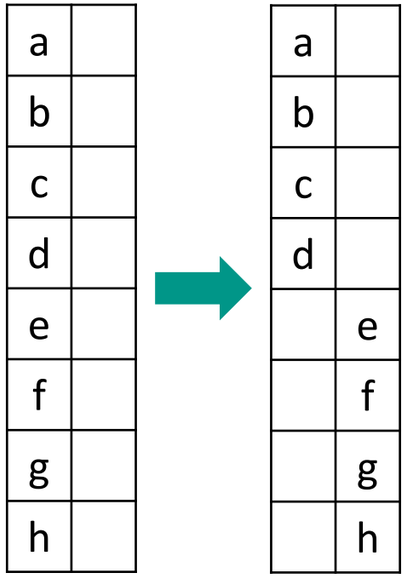
1. Алгоритм шифрування «Калина»

Зсув рядків

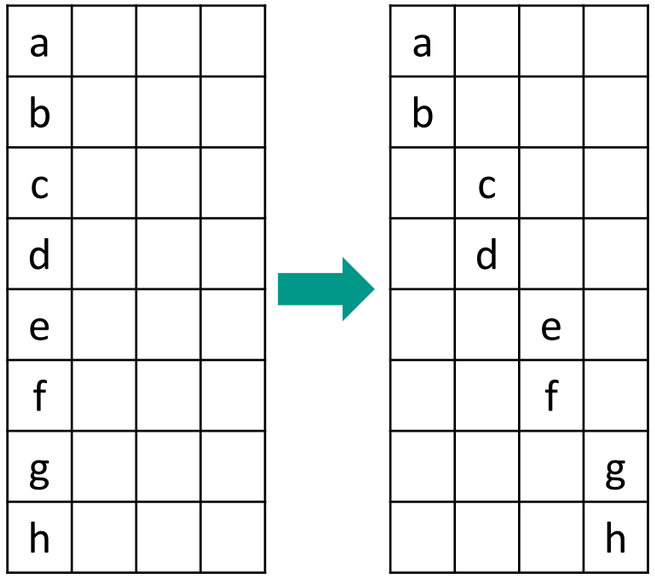
Рядки стану циклічно зсувають праворуч на різну кількість байтів, залежно від розміру блока

Номер рядка	Значення зсуву, байтів		
	Довжина блоку 128 бітів	*Довжина блоку 256 бітів*	*Довжина блоку 512 бітів*
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	2
3	0	1	3
4	1	2	4
5	1	2	5
6	1	3	6
7	1	3	7

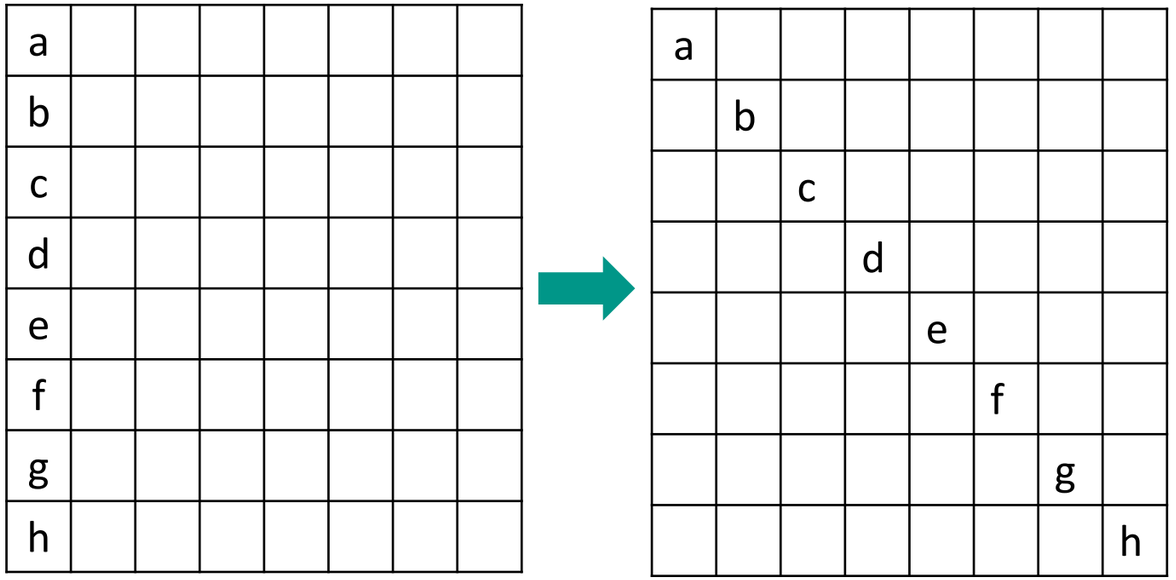
1. Алгоритм шифрування «Калина»



Зсув рядків 128-бітового блоку



Зсув рядків 256-бітового блоку



Зсув рядків 512-бітового блоку

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Перемішування стовпців

Стовпці стану розглядають як многочлен над полем $GF(2^8)$ та множать за модулем $x^8 + 1$ на фіксований многочлен $c(x)$:

$$c(x) = 01_{16} \cdot x^7 + 05_{16} \cdot x^6 + 01_{16} \cdot x^5 + 08_{16} \cdot x^4 + 06_{16} \cdot x^3 + 07_{16} \cdot x^2 + 04_{16} \cdot x + 01_{16}$$

Або у матричному вигляді:

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 01 & 01 & 05 & 01 & 08 & 06 & 07 & 04 \\ 04 & 01 & 01 & 05 & 01 & 08 & 06 & 07 \\ 07 & 04 & 01 & 01 & 05 & 01 & 08 & 06 \\ 06 & 07 & 04 & 01 & 01 & 05 & 01 & 08 \\ 08 & 06 & 07 & 04 & 01 & 01 & 05 & 01 \\ 01 & 08 & 06 & 07 & 04 & 01 & 01 & 05 \\ 05 & 01 & 08 & 06 & 07 & 04 & 01 & 01 \\ 01 & 05 & 01 & 08 & 06 & 07 & 04 & 01 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \end{pmatrix}$$

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Для множення у полі $GF(2^8)$ алгоритм «Калина» використовує нерозкладний многочлен

$$m(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

Наприклад, результат множення фіксованої матриці на один деякий стовпець матриці стану матиме вигляд:

$$\begin{pmatrix} 01 & 01 & 05 & 01 & 08 & 06 & 07 & 04 \\ 04 & 01 & 01 & 05 & 01 & 08 & 06 & 07 \\ 07 & 04 & 01 & 01 & 05 & 01 & 08 & 06 \\ 06 & 07 & 04 & 01 & 01 & 05 & 01 & 08 \\ 08 & 06 & 07 & 04 & 01 & 01 & 05 & 01 \\ 01 & 08 & 06 & 07 & 04 & 01 & 01 & 05 \\ 05 & 01 & 08 & 06 & 07 & 04 & 01 & 01 \\ 01 & 05 & 01 & 08 & 06 & 07 & 04 & 01 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A8 \\ 14 \\ C4 \\ 5E \\ B4 \\ 57 \\ BB \\ 1F \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4D \\ A7 \\ 4F \\ 33 \\ C3 \\ 48 \\ 5F \\ 0C \end{pmatrix}$$

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Додавання раундового ключа по модулю 2

Операція $\oplus$ забезпечує побітове додавання раундового ключа до матриці стану за модулем 2.

$$\begin{pmatrix} s_{0,0} & s_{0,1} & s_{0,2} & s_{0,3} \\ s_{1,0} & s_{1,1} & s_{1,2} & s_{1,3} \\ s_{2,0} & s_{2,1} & s_{2,2} & s_{2,3} \\ s_{3,0} & s_{3,1} & s_{3,2} & s_{3,3} \\ s_{4,0} & s_{4,1} & s_{4,2} & s_{4,3} \\ s_{5,0} & s_{5,1} & s_{5,2} & s_{5,3} \\ s_{6,0} & s_{6,1} & s_{6,2} & s_{6,3} \\ s_{7,0} & s_{7,1} & s_{7,2} & s_{7,3} \end{pmatrix} \oplus \begin{pmatrix} k_{0,0} & k_{0,1} & k_{0,2} & k_{0,3} \\ k_{1,0} & k_{1,1} & k_{1,2} & k_{1,3} \\ k_{2,0} & k_{2,1} & k_{2,2} & k_{2,3} \\ k_{3,0} & k_{3,1} & k_{3,2} & k_{3,3} \\ k_{4,0} & k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} \\ k_{5,0} & k_{5,1} & k_{5,2} & k_{5,3} \\ k_{6,0} & k_{6,1} & k_{6,2} & k_{6,3} \\ k_{7,0} & k_{7,1} & k_{7,2} & k_{7,3} \end{pmatrix}$$

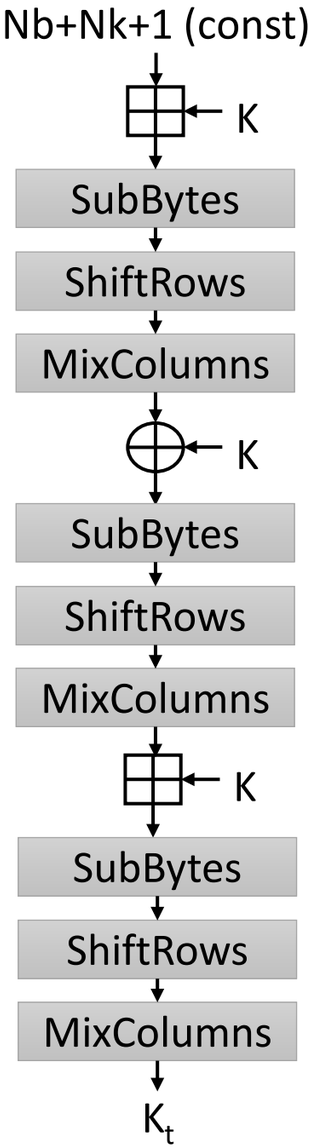
1. Алгоритм шифрування «Калина»

Розгортання ключів

1. З ключа шифрування K формується допоміжний ключ K_t з довжиною, що дорівнює розміру блока ($64 \times Nb$ біт) з використанням трьох раундів зашифрування.

Вхіднимим даними для перетворення є число Nb + Nk + 1 (у двійковому вигляді), інші байти заповнюються нулями.

У якості раундових ключів використовується ключ шифрування K (якщо ключ довше блоку, використовується його молодша і старша половини).

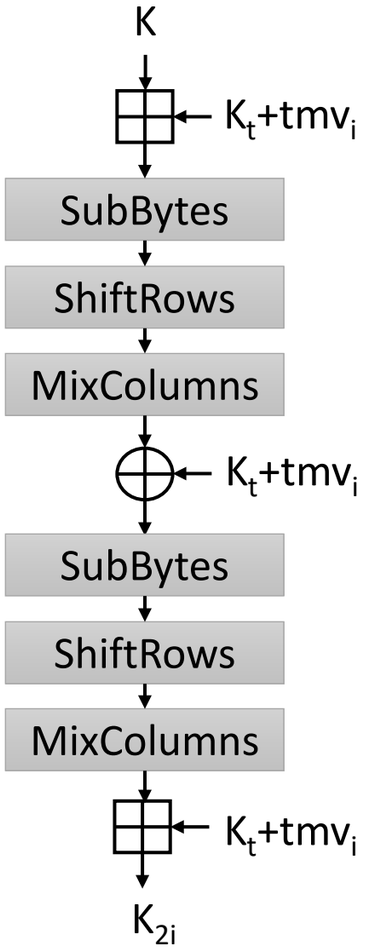


1. Алгоритм шифрування «Калина»

Розгортання ключів

2. На основі ключа K та допоміжного ключа K_t формуються раундові ключі K_{2i} (з парними індексами) довжиною, що дорівнює розміру блока ($64 \times Nb$ біт), з використанням двох раундів зашифрування для кожного раундового ключа.

У якості раундових ключів використовується результат додавання по модулю 2^{64} допоміжного ключа K_t та змінної tmv_i – двійкове значення, яке залежить від індексу раундового ключа, який формується.



tmv_0=0x01000100...0100

$tmv_{i+2} = tmv_i << 1$

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Розгортання ключів

3. З раундових ключів K_{2i} з парними індексами формуються раундові ключі K_{2i+1} (з непарними індексами) шляхом циклічного зсуву попереднього ключа з парним індексом вліво на $2 \times Nb + 3$ байт.

Розмір блоку, біт (байт)	*Зсув вліво (байт)*
128(16)	7
256(32)	11
512(64)	19

Загалом використовується *Nr+1* раундових ключів K_i (i = 0,1 .., Nr), кожен довжиною 64×*Nb* біт.

1. Алгоритм шифрування «Калина»

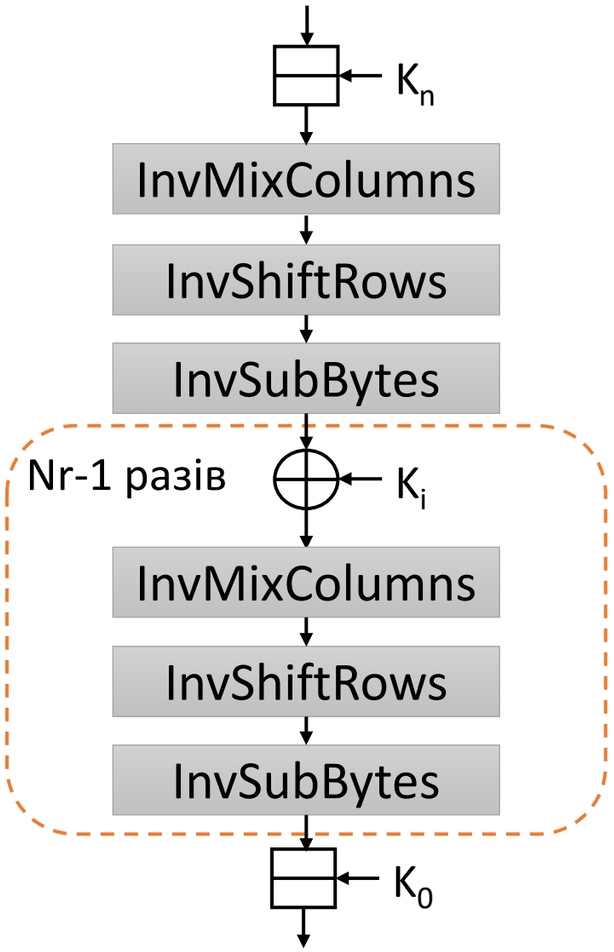
Дешифрування за алгоритмом «Калина»

I. Виконуються операції з п. II, але на початку замість ⊕ виконується віднімання по модулю 2^{64} з ключем останнього раунду

II. *Nr-1* раундів, кожен з яких складається з чотирьох етапів:

1. Додавання раундового ключа за модулем 2;
2. Зворотна операція до перемішування стовпців;
3. Зсув рядків в зворотному порядку;
4. Обернена операція до підстановки байтів.

III. Віднімання з ключем нульового раунду по модулю 2^{64}



1. Алгоритм шифрування «Калина»

Операція, зворотна операції перемішування стовпців

Стовпці стану множать на фіксований многочлен $c^{-1}(x)$ оберений до $c(x)$:

$$c^{-1}(x) = 95_{16} \cdot x^7 + 76_{16} \cdot x^6 + A8_{16} \cdot x^5 + 2F_{16} \cdot x^4 + 49_{16} \cdot x^3 + D7_{16} \cdot x^2 + CA_{16} \cdot x + AD_{16}$$

Або у матричному вигляді:

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \\ b_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AD & 95 & 76 & A8 & 2F & 49 & D7 & CA \\ CA & AD & 95 & 76 & A8 & 2F & 49 & D7 \\ D7 & CA & AD & 95 & 76 & A8 & 2F & 49 \\ 49 & D7 & CA & AD & 95 & 76 & A8 & 2F \\ 2F & 49 & D7 & CA & AD & 95 & 76 & A8 \\ A8 & 2F & 49 & D7 & CA & AD & 95 & 76 \\ 76 & A8 & 2F & 49 & D7 & CA & AD & 95 \\ 95 & 76 & A8 & 2F & 49 & D7 & CA & AD \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \end{pmatrix}$$

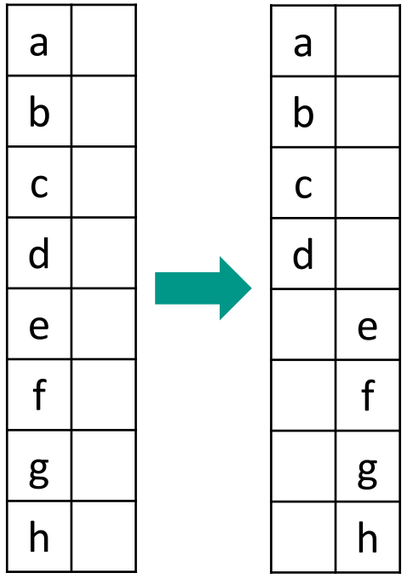
1. Алгоритм шифрування «Калина»

Зсув рядків в зворотному порядку

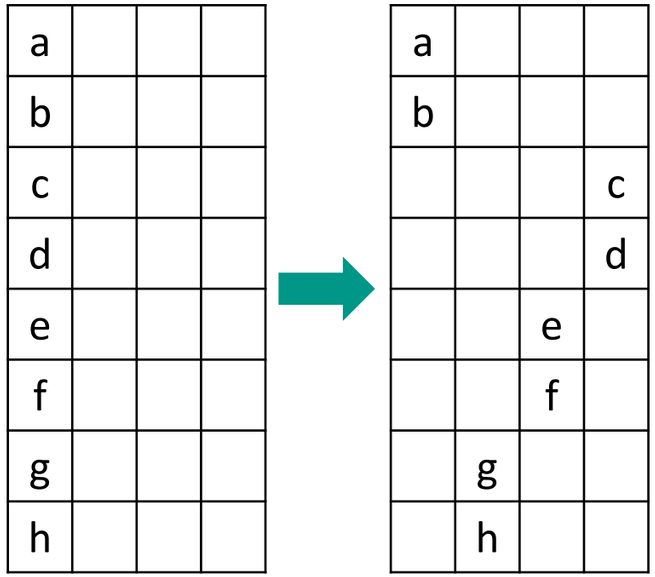
Рядки стану циклічно зсувають ліворуч на різну кількість байтів, залежно від розміру блока

Номер рядка	Значення зсуву, байтів		
	Довжина блоку 128 бітів	*Довжина блоку 256 бітів*	*Довжина блоку 512 бітів*
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	2
3	0	1	3
4	1	2	4
5	1	2	5
6	1	3	6
7	1	3	7

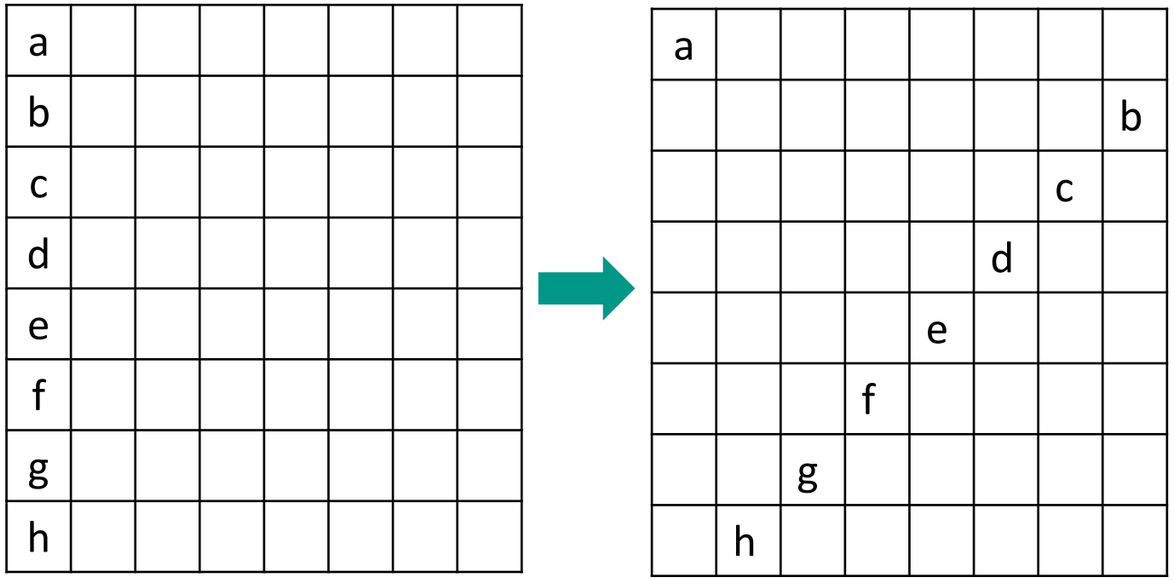
1. Алгоритм шифрування «Калина»



Зворотний зсув рядків 128-бітового блоку



Зворотний зсув рядків 256-бітового блоку



Зворотний зсув рядків 512-бітового блоку

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Обернена операція до операції підстановки байтів

Кожен байт матриці стану замінюється відповідно до заданої таблиці зворотної заміни

Підстановка $_{-1}\pi_0$:

A4	A2	A9	C5	4E	C9	03	D9	7E	0F	D2	AD	E7	D3	27	5B
E3	A1	E8	E6	7C	2A	55	0C	86	39	D7	8D	B8	12	6F	28
CD	8A	70	56	72	F9	BF	4F	73	E9	F7	57	16	AC	50	C0
9D	B7	47	71	60	C4	74	43	6C	1F	93	77	DC	CE	20	8C
99	5F	44	01	F5	1E	87	5E	61	2C	4B	1D	81	15	F4	23
D6	EA	E1	67	F1	7F	FE	DA	3C	07	53	6A	84	9C	CB	02
83	33	DD	35	E2	59	5A	98	A5	92	64	04	06	10	4D	1C
97	08	31	EE	AB	05	AF	79	A0	18	46	6D	FC	89	D4	C7
FF	F0	CF	42	91	F8	68	0A	65	8E	B6	FD	C3	EF	78	4C
CC	9E	30	2E	BC	0B	54	1A	A6	BB	26	80	48	94	32	7D
A7	3F	AE	22	3D	66	AA	F6	00	5D	BD	4A	E0	3B	B4	17
8B	9F	76	B0	24	9A	25	63	DB	EB	7A	3E	5C	B3	B1	29
F2	CA	58	6E	D8	A8	2F	75	DF	14	FB	13	49	88	B2	EC
E4	34	2D	96	C6	3A	ED	95	0E	E5	85	6B	40	21	9B	09
19	2B	52	DE	45	A3	FA	51	C2	B5	D1	90	B9	F3	37	C1
0D	BA	41	11	38	7B	BE	D0	D5	69	36	C8	62	1B	82	8F

Підстановка $_{-1}\pi_1$:

83	F2	2A	EB	E9	BF	7B	9C	34	96	8D	98	B9	69	8C	29
3D	88	68	06	39	11	4C	0E	A0	56	40	92	15	BC	B3	DC
6F	F8	26	BA	BE	BD	31	FB	C3	FE	80	61	E1	7A	32	D2
70	20	A1	45	EC	D9	1A	5D	B4	D8	09	A5	55	8E	37	76
A9	67	10	17	36	65	B1	95	62	59	74	A3	50	2F	4B	C8
D0	8F	CD	D4	3C	86	12	1D	23	EF	F4	53	19	35	E6	7F
5E	D6	79	51	22	14	F7	1E	4A	42	9B	41	73	2D	C1	5C
A6	A2	E0	2E	D3	28	BB	C9	AE	6A	D1	5A	30	90	84	F9
B2	58	CF	7E	C5	CB	97	E4	16	6C	FA	B0	6D	1F	52	99
0D	4E	03	91	C2	4D	64	77	9F	DD	C4	49	8A	9A	24	38
A7	57	85	C7	7C	7D	E7	F6	B7	AC	27	46	DE	DF	3B	D7
9E	2B	0B	D5	13	75	F0	72	B6	9D	1B	01	3F	44	E5	87
FD	07	F1	AB	94	18	EA	FC	3A	82	5F	05	54	DB	00	8B
E3	48	0C	CA	78	89	0A	FF	3E	5B	81	EE	71	E2	DA	2C
B8	B5	CC	6E	A8	6B	AD	60	C6	08	04	02	E8	F5	4F	A4
F3	C0	CE	43	25	1C	21	33	0F	AF	47	ED	66	63	93	AA

1. Алгоритм шифрування «Калина»

Підстановка $_{-1}\pi_2$:

45	D4	0B	43	F1	72	ED	A4	C2	38	E6	71	FD	B6	3A	95
50	44	4B	E2	74	6B	1E	11	5A	C6	B4	D8	A5	8A	70	A3
A8	FA	05	D9	97	40	C9	90	98	8F	DC	12	31	2C	47	6A
99	AE	C8	7F	F9	4F	5D	96	6F	F4	B3	39	21	DA	9C	85
9E	3B	F0	BF	EF	06	EE	E5	5F	20	10	CC	3C	54	4A	52
94	0E	C0	28	F6	56	60	A2	E3	0F	EC	9D	24	83	7E	D5
7C	EB	18	D7	CD	DD	78	FF	DB	A1	09	D0	76	84	75	BB
1D	1A	2F	B0	FE	D6	34	63	35	D2	2A	59	6D	4D	77	E7
8E	61	CF	9F	CE	27	F5	80	86	C7	A6	FB	F8	87	AB	62
3F	DF	48	00	14	9A	BD	5B	04	92	02	25	65	4C	53	0C
F2	29	AF	17	6C	41	30	E9	93	55	F7	AC	68	26	C4	7D
CA	7A	3E	A0	37	03	C1	36	69	66	08	16	A7	BC	C5	D3
22	B7	13	46	32	E8	57	88	2B	81	B2	4E	64	1C	AA	91
58	2E	9B	5C	1B	51	73	42	23	01	6E	F3	0D	BE	3D	0A
2D	1F	67	33	19	7B	5E	EA	DE	8B	CB	A9	8C	8D	AD	49
82	E4	BA	C3	15	D1	E0	89	FC	B1	B9	B5	07	79	B8	E1

Підстановка $_{-1}\pi_3$:

B2	B6	23	11	A7	88	C5	A6	39	8F	C4	E8	73	22	43	C3
82	27	CD	18	51	62	2D	F7	5C	0E	3B	FD	CA	9B	0D	0F
79	8C	10	4C	74	1C	0A	8E	7C	94	07	C7	5E	14	A1	21
57	50	4E	A9	80	D9	EF	64	41	CF	3C	EE	2E	13	29	BA
34	5A	AE	8A	61	33	12	B9	55	A8	15	05	F6	03	06	49
B5	25	09	16	0C	2A	38	FC	20	F4	E5	7F	D7	31	2B	66
6F	FF	72	86	F0	A3	2F	78	00	BC	CC	E2	B0	F1	42	B4
30	5F	60	04	EC	A5	E3	8B	E7	1D	BF	84	7B	E6	81	F8
DE	D8	D2	17	CE	4B	47	D6	69	6C	19	99	9A	01	B3	85
B1	F9	59	C2	37	E9	C8	A0	ED	4F	89	68	6D	D5	26	91
87	58	BD	C9	98	DC	75	C0	76	F5	67	6B	7E	EB	52	CB
D1	5B	9F	0B	DB	40	92	1A	FA	AC	E4	E1	71	1F	65	8D
97	9E	95	90	5D	B7	C1	AF	54	FB	02	E0	35	BB	3A	4D
AD	2C	3D	56	08	1B	4A	93	6A	AB	B8	7A	F2	7D	DA	3F
FE	3E	BE	EA	AA	44	C6	D0	36	48	70	96	77	24	53	DF
F3	83	28	32	45	1E	A4	D3	A2	46	6E	9C	DD	63	D4	9D

2. Режими роботи «Калина»

Стандарт ДСТУ 7624:2014 (Калина) визначає алгоритм симетричного блокового перетворення для забезпечення *конфіденційності* і (або) *цілісності* даних

№ режиму	***Назва режиму***	***Позначення***	***Послуга безпеки***
1	*Проста заміна (базове перетворення)*	ECB	Конфіденційність
2	*Гамування*	CTR	Конфіденційність
3	*Гамування зі зворотнім зв'язком за шифротекстом*	CFB	Конфіденційність
4	*Вироблення імітовставки*	CMAC	Цілісність
5	*Зчеплення шифроблоків*	CBC	Конфіденційність

2. Режими роботи «Калина»

№ режиму	*Назва режиму*	*Позначення*	*Послуга безпеки*
б	*Гамування зі зворотнім зв’язком за шифрогамою*	OFB	Конфіденційність
7	*Вибіркове гамування із прискореним виробленням імітовставки*	GCM, GMAC	Конфіденційність і цілісність (GCM), тільки цілісність (GMAC)
8	*Вироблення імітовставки і гамування*	CCM	Цілісність і конфіденційність
9	*Індексованої заміни*	XTS	Конфіденційність
10	*Захисту ключових даних*	KW	Конфіденційність і цілісність

3. «Калина» vs AES (заповнити самостійно)

	AES	«Калина»
Розмір ключа		
Розмір блока		
Кількість раундів		
Математичні операції		
Кількість таблиць підстановки		
Нерозкладний многочлен		
Генерація ключів (основні операції)		