ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСНОВНИХ ОПЕРАЦІЙ ШИФРУ «КАЛИНА» У ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ ДОПОМІЖНОГО КЛЮЧА

Мета роботи: дослідити процес формування допоміжного ключа у шифрі «Калина», порівняти алгоритми шифрування AES та «Калина».

Матеріально-технічне забезпечення: ПК з доступом до мережі Інтернет.

Теоретичні відомості

НАЦІОНАЛЬНИЙ СТАНДАРТ ШИФРУВАННЯ ДСТУ 7624:2014 («КАЛИНА»)

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

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.

Розміри блока даних можуть бути такими: 128, 256 або 512 бітів. **Матриця стану** має 8 рядків та *Nb* стовпців, що являють собою елементи поля $GF(2^8)$.

Матриця стану при *Nb*=2:

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

Довжина ключа може також бути 128, 256 або 512 бітів. **Ключ** шифру розглядають як матрицю байтів, яка має матриця байтів, яка має 8 рядків та *Nk* стовпців.

Матриця ключа шифру при *Nk*=4:

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

Кількість раундів шифрування алгоритму «Калина» (*Nr*) залежить від значень *Nb* і *Nk*:

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

Шифрування за алгоритмом «Калина» складається з:

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}.

Розглянемо кожен з чотирьох етапів детальніше.

Додавання з нульовим ключем по модулю 2^{64}

Операція $\boxplus$ забезпечує побітове додавання стовпців раундового ключа до відповідних стовпців матриці стану за модулем 2^{64}, при цьому результат є матрицею з такою ж самою кількістю стовпців. При виконанні додавання менші значущі байти мають менші індекси, тобто використовується формат little endian.

Підстановка байтів

Кожен байт матриці стану замінюється відповідно до заданої таблиці підстановки (табл. 5.1). Задано (рекомендовано) чотири таблиці підстановок

«байт-у-байт». Причому для байтів одного рядка поточного стану шифру застосовано одну й ту саму підстановку.

Заміна одного байту полягає у виборі з таблиці підстановки нового значення за адресою, яку задає поточне значення байту. Нове вибране значення і є результатом підстановки для поточного байту.

Таблиця 5.1. Підстановки алгоритму «Калина»

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

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

Зсув рядків

Рядки стану циклічно зсувають праворуч на різну кількість байтів, залежно від розміру блока (рис. 5.1):

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

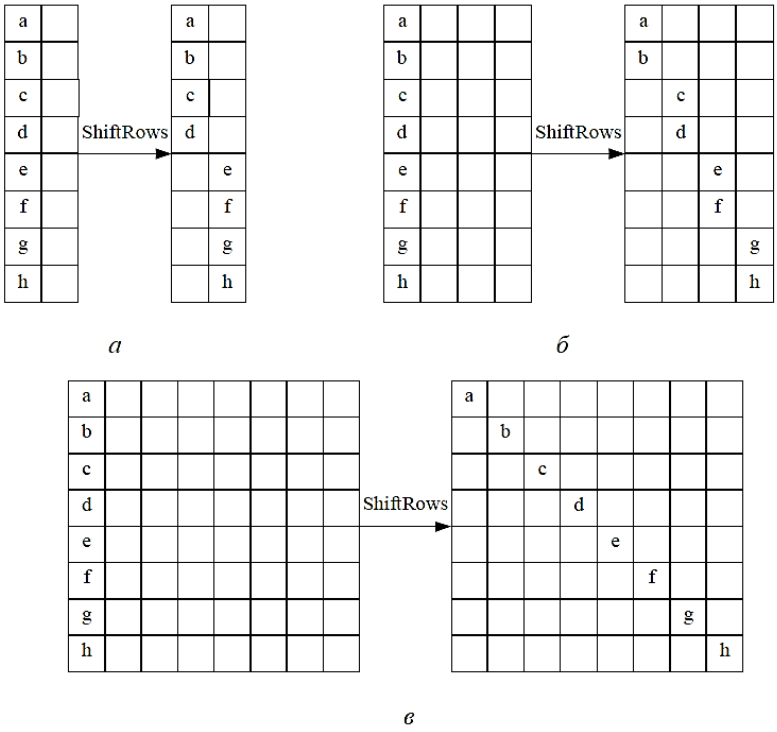


Рис 5.1. Зсув рядків: а – 128-бітовий блок; б – 256-бітовий блок; в – 512-бітовий блок

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:

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

Для множення у полі $GF(2^8)$ алгоритм «Калина» використовує нерозкладний многочлен $m(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1$.

Додавання раундового ключа

Побітове додавання за модулем 2 раундового ключа до відповідних бітів, отриманих у попередньому раунді.

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).

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.

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.

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

Дешифрування:

I. Виконуються операції з п. II, але на початку замість $\oplus$ 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}.

Розглянемо кожен з чотирьох етапів детальніше.

Операція, зворотна операції перемішування стовпців

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

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

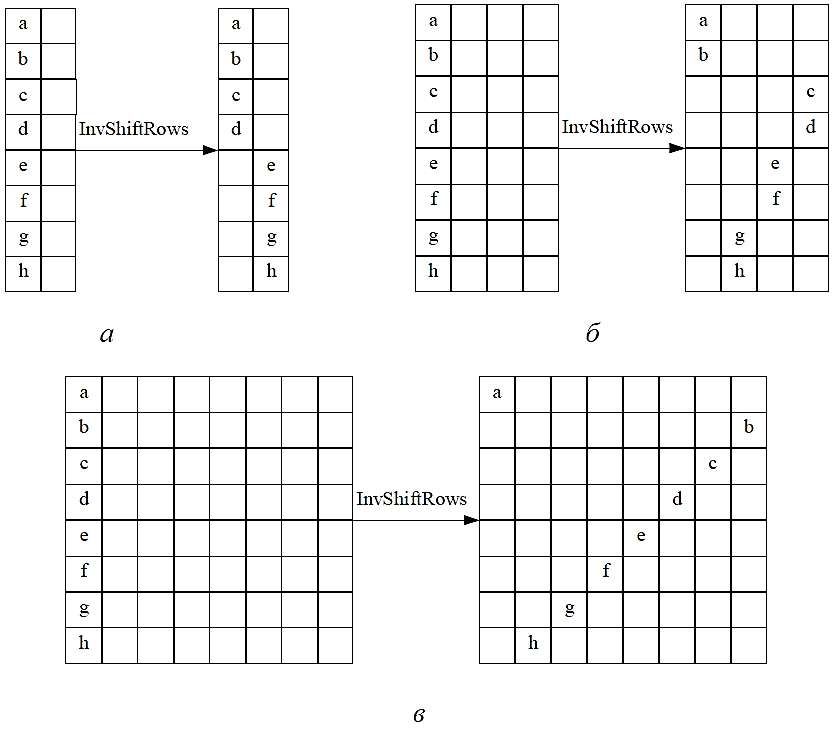
Або у матричному вигляді:

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

Зсув рядків в зворотному порядку

Рядки стану циклічно зсувають ліворуч на різну кількість байтів, залежно від розміру блока (рис. 5.2):

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



а *б* *в*

Рис 5.2. Зсув рядків в обереному порядку: а – 128-бітовий блок; б – 256-бітовий блок; в – 512-бітовий блок

Обернена операція до операції підстановки байтів

Кожен байт матриці стану замінюється відповідно до заданої таблиці зворотної заміни (табл. 5.2).

Таблиця 5.2. Обернені підстановки алгоритму «Калина»

Підстановка $_{-1}\pi_0$:

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

Підстановка $_{-1}\pi_1$:

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

Підстановка $_{-1}\pi_2$:

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

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

Завдання до лабораторної роботи

Завдання 1

Дослідити процес формування допоміжного ключа $\boldsymbol{K_t}$ *на основі ключа* $\boldsymbol{K}$ *довжиною 128 бітів згідно варіанту:*

Варіант №	Ключ
1.	20406000A0C0E10121416181A1C1E000
2.	4080C1014181C2024282C3034383C000
3.	810182028303840485058606870780000
4.	02030405060708090A0B0C0D0E0F0001
5.	0406080A0C0E10121416181A1C1E0002
6.	080C1004181C2024282C3034383C0004
7.	1018200830384048505860687078000 8
8.	2030400060708090A0B0C0D0E0F00010
9.	406080A0C0E10121416181A1C1E00020
10.	80C1010181C2024282C3034383C00040
11.	018202030384048505860687078000 81
12.	030405060708090A0B0C0D0E0F000102

Варіант №	Ключ
13.	06080A0C0E10121416181A1C1E000204
14.	0C1014081C2024282C3034383C000408
15.	18202800384048505860687078000810

У схемі формування допоміжного ключа використовується **три раунди** зашифрування.

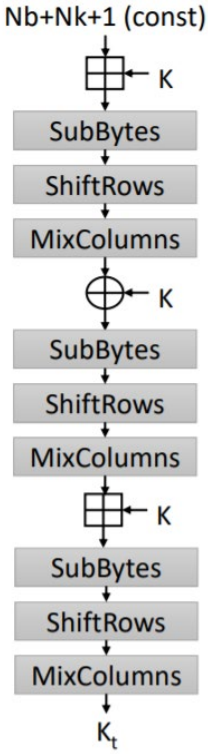


Рис 5.3. Формування допоміжного ключа у шифрі «Калина»

Вхідні дані: Початкова матриця стану ***Nb+Nk+1=2+2+1=5*** (128 бітів) у 16-ій системі числення:

05	00
00	00
00	00
00	00
00	00
00	00
00	00
00	00

Ключ шифрування: початковий ключ ***K*** (128 бітів) у 16-ій системі числення:

00	08
01	09
02	0A
03	0B
04	0C
05	0D
06	0E
07	0F

Додавання матриці стану з ключем ***K*** за модулем 2^{64}:

05	00	⊞	00	08	=	05	08
00	00		01	09		01	09
00	00		02	0A		02	0A
00	00		03	0B		03	0B
00	00		04	0C		04	0C
00	00		05	0D		05	0D
00	00		06	0E		06	0E
00	00		07	0F		07	0F

Раунд 1

Підстановка байтів:

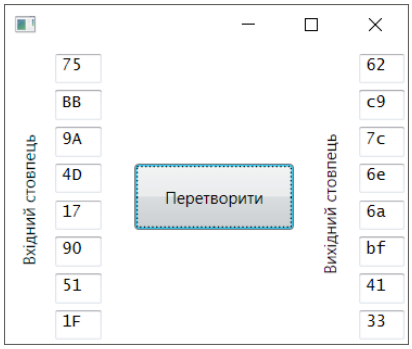
05	08	→	75	71
01	09		BB	3A
02	0A		9A	DF
03	0B		4D	B3
04	0C		6B	17
05	0D		CB	90
06	0E		45	51
07	0F		2A	1F

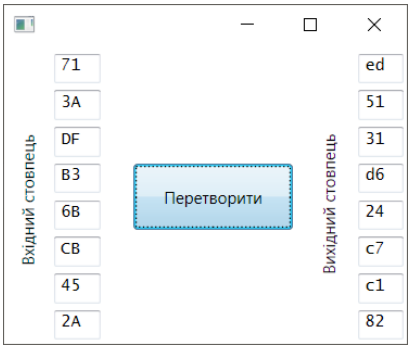
Зсув рядків:

75	71
BB	3A
9A	DF
4D	B3
17	6B
90	CB
51	45
1F	2A

Перемішування стовпців:

01	01	05	01	08	06	07	04	·	75	71	=	62	ED
04	01	01	05	01	08	06	07		BB	3A		C9	51
07	04	01	01	05	01	08	06		9A	DF		7C	31
06	07	04	01	01	05	01	08		4D	B3		6E	D6
08	06	07	04	01	01	05	01		17	6B		6A	24
01	08	06	07	04	01	01	05		90	CB		BF	C7
05	01	08	06	07	04	01	01		51	45		41	C1
01	05	01	08	06	07	04	01		1F	2A		33	82





Додавання ключа ***K*** по модулю 2:

62	ED		00	08		62	E5
C9	51		01	09		C8	58
7C	31		02	0A		7E	3B
6E	D6	$\oplus$	03	0B	=	6D	DD
6A	24		04	0C		6E	28
BF	C7		05	0D		BA	CA
41	C1		06	0E		47	CF
33	82		07	0F		34	8D

Раунд 2

Підстановка байтів:

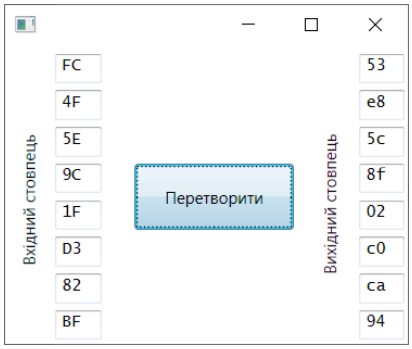
62	E5		FC	D9
C8	58		4F	81
7E	3B		5E	41
6D	DD		9C	FC
6E	28	$\rightarrow$	C3	1F
BA	CA		23	D3
47	CF		2E	82
34	8D		40	BF

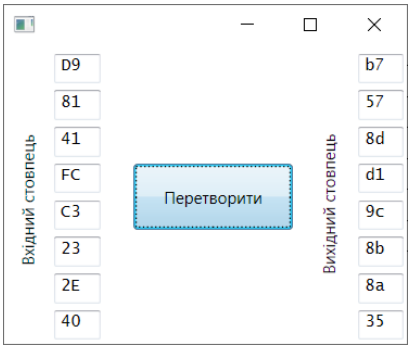
Зсув рядків:

FC	D9
4F	81
5E	41
9C	FC
1F	C3
D3	23
82	2E
BF	40

Перемішування стовпців:

01	01	05	01	08	06	07	04		FC	D9		53	B7
04	01	01	05	01	08	06	07		4F	81		E8	57
07	04	01	01	05	01	08	06		5E	41		5C	8D
06	07	04	01	01	05	01	08		9C	FC		8F	D1
08	06	07	04	01	01	05	01	·	1F	C3	=	02	9C
01	08	06	07	04	01	01	05		D3	23		C0	8B
05	01	08	06	07	04	01	01		82	2E		CA	8A
01	05	01	08	06	07	04	01		BF	40		94	35





Додавання матриці стану з ключем ***K*** за модулем 2^{64}:

53	B7		00	08		53	BF
E8	57		01	09		E9	60
5C	8D		02	0A		5E	97
8F	D1	⊞	03	0B	=	92	DC
02	9C		04	0C		06	A8
C0	8B		05	0D		C5	98
CA	8A		06	0E		D0	98
94	35		07	0F		9B	44

Раунд 3

Підстановка байтів:

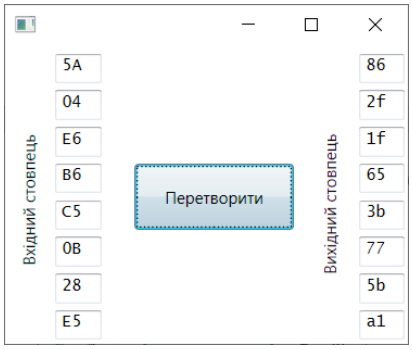
53	BF		5A	26
E9	60		04	E7
5E	97		E6	24
92	DC	→	B6	A5
06	A8		6C	C5
C5	98		84	0B
D0	98		6B	28
9B	44		1D	E5

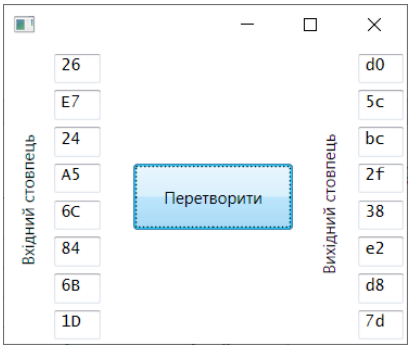
Зсув рядків:

5A	26
04	E7
E6	24
B6	A5
C5	6C
0B	84
28	6B
E5	1D

Перемішування стовпців:

01	01	05	01	08	06	07	04		5A	26		86	D0
04	01	01	05	01	08	06	07		04	E7		2F	5C
07	04	01	01	05	01	08	06		E6	24		1F	BC
06	07	04	01	01	05	01	08	·	B6	A5	=	65	2F
08	06	07	04	01	01	05	01		C5	6C		3B	38
01	08	06	07	04	01	01	05		0B	84		77	E2
05	01	08	06	07	04	01	01		28	6B		5B	D8
01	05	01	08	06	07	04	01		E5	1D		A1	7D





Допоміжний ключ K_t (128 бітів) у 16-ій системі числення:

86	D0
2F	5C
1F	BC
65	2F
3B	38
77	E2
5B	D8
A1	7D

Завдання 2

Провести порівняльну характеристику алгоритмів AES та «Калина». Додати до звіту таблицю та заповнити її:

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

Контрольні запитання:

1. Опишіть основні кроки зашифрування за алгоритмом «Калина».
2. Яка довжина блоку в алгоритмі «Калина»?
3. Яка довжина ключа в алгоритмі «Калина»?
4. Від чого залежить кількість раундів шифрування за алгоритмом «Калина»?
5. Яким чином генеруються ключі в «Калина»?
6. Які особливості дешифрування за алгоритмом «Калина»?
7. Назвіть основні режими роботи алгоритму шифрування «Калина».