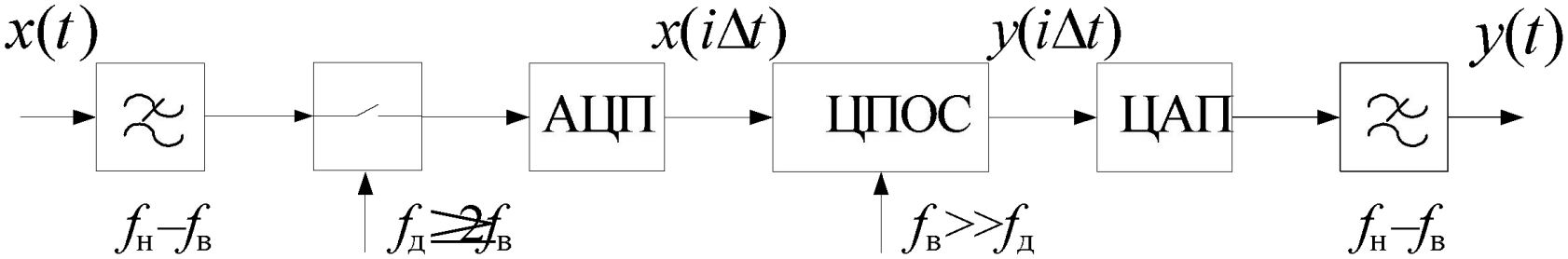
Основные определения

- ***Микропроцессор*** —устройство, отвечающее за выполнение арифметических, логических операций и операций управления, записанных в машинном коде, реализованный в виде одной микросхемы или комплекта из нескольких специализированных микросхем.
- ***Процессор цифровой обработки сигналов*** *– это микропроцессор, особенностью работы* которого является поточный характер обработки больших объемов данных в реальном масштабе времени и, как правило, с интенсивным обменом данных с внешними устройствами.
- ***Реальный масштаб времени****– это такой режим работы устройства, при котором регистрация и* арифметическая обработка (а при необходимости и анализ, визуализация, сохранение, систематизация, синтез и передача по каналам связи) данных производится без потерь информации, поступающей от ее источника.

Типовые задачи, решаемые ПЦОС

- фильтрация сигналов;
- свертка двух сигналов (смешение сигналов);
- вычисление значений авто и кросс-корреляционной функции двух сигналов;
- усиление, нормализация или преобразование сигналов;
- прямое и обратное Фурье-преобразование;

Структурная схема цифровой обработки сигналов



АЦП- аналого-цифровой преобразователь

ЦПОС- цифровой процессор обработки сигналов

ЦАП- цифро-аналоговый преобразователь

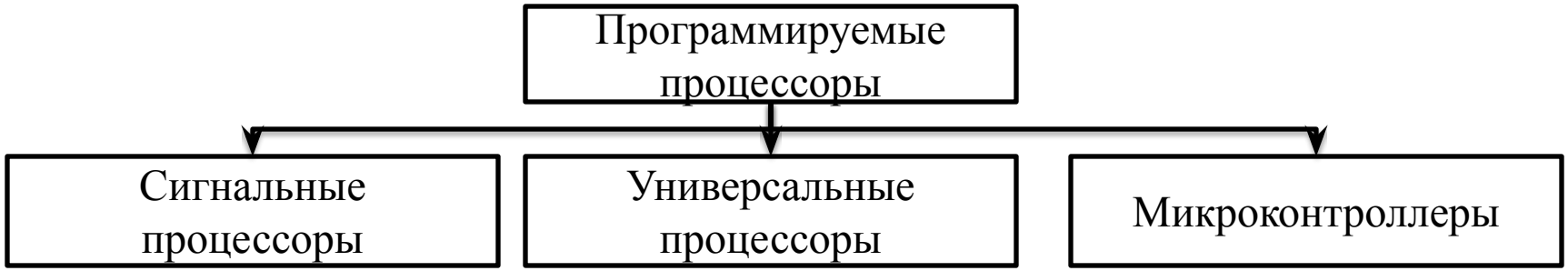
$$f_{в} = 4\ кГц \Rightarrow f_{д} = 8\ кГц\ (T_{д} = 125\ \text{мкс})$$

Интервал времени $\Delta t = 4T_{д} = 500$ мкс

Количество операций, выполняемых ЦПОС за $\Delta t : N = 2500$

$$T_{т} = \frac{\Delta t}{N} = \frac{500 \cdot 10^{-6}}{2500} = 200\ \text{нс} \Rightarrow f_{т} = T_{т}^{-1} = 5\ МГц$$

Классификация процессоров



Если основная задача устройства связана с обработкой данных– то это процессор, если же с управлением– то это контроллер.

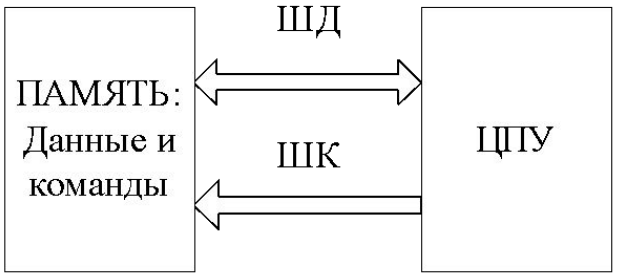
Универсальные процессоры используют все передовые технологии, не взирая на стоимость, габариты и расходуемую энергию. В технике связи применяются для управления дорогостоящими системами связи.

Микроконтроллеры используются для управления дешевыми малогабаритными устройствами связи. При их изготовлении учитывают стоимость, габариты и потребляемую энергию.

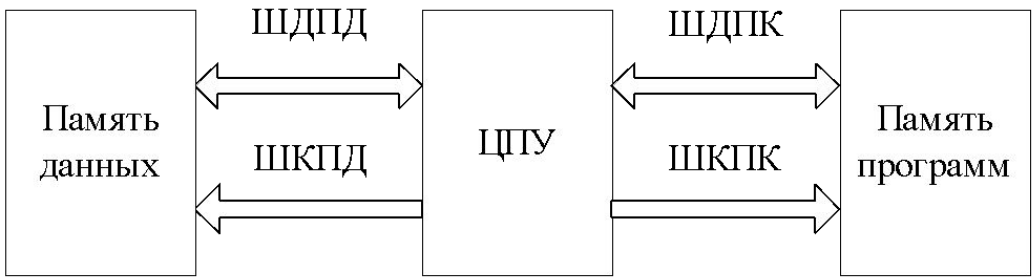
Сигнальные процессоры характеризуются упрощенным набором команд, наличием встроенного умножителя. На основе ПЦОС создаются устройства в которых требуется реальный масштаб времени выполнения практически любых арифметических задач.

Архитектура процессоров

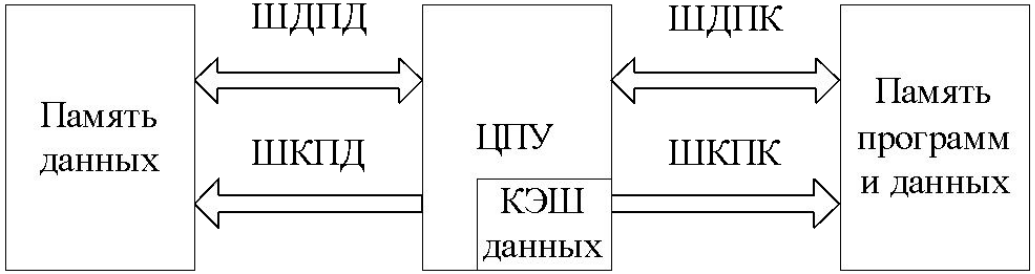
Фон Неймана



Гарвардская архитектура



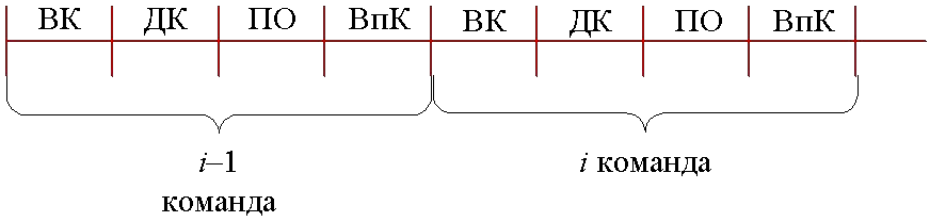
Модифицированная гарвардская архитектура



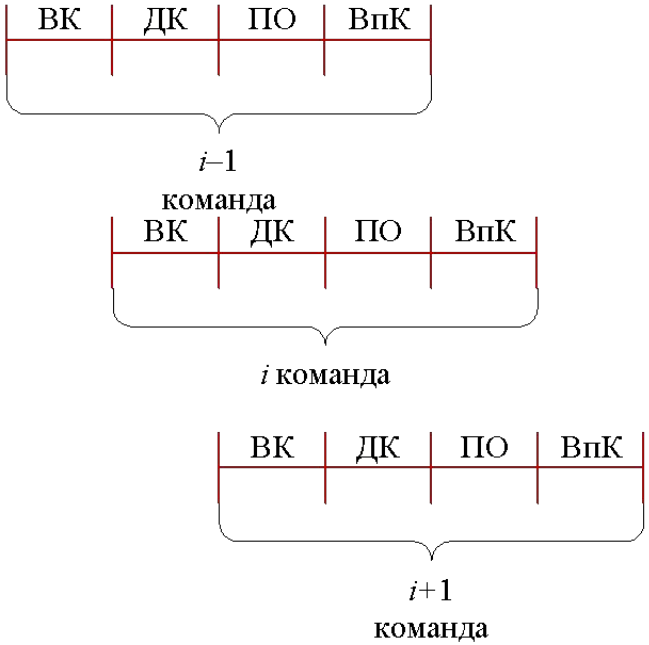
Структура команды

Выборка команды (ВК)	Декодирование команды (ДК)	Подготовка операндов (ПО)	Выполнение команды (ВпК)

Неконвейерное выполнение команд



Конвейерное выполнение команд



Системы счисления

$$R_n = a_{L-1} \cdot n^{L-1} + a_{L-2} \cdot n^{L-2} + \ldots + a_1 \cdot n^1 + a_0 \cdot n^0$$

$a_l \in [0 \ldots n]$ – цифры

n – основание системы счисления

двоичная – $a = 0, 1$

восьмиричная – $a = 0, 1 \ldots 7$

десятичная – $a = 0, 1 \ldots 9$

шестнадцатиричная – $a = 0, 1 \ldots 9 A, B, C, D, E, F$

Дополнительный код

Кодирование положительных чисел

+25 0 11001 прямой код

0 11001 дополнительный код

Кодирование отрицательных чисел $-B = \overline{B} + 1$

– 25 1 11001 – прямой код

а) 1 00110 – обратный код

б) 1 00110

+ 0 00001

1 00111 – дополнительный код

Кодирование отрицательных чисел

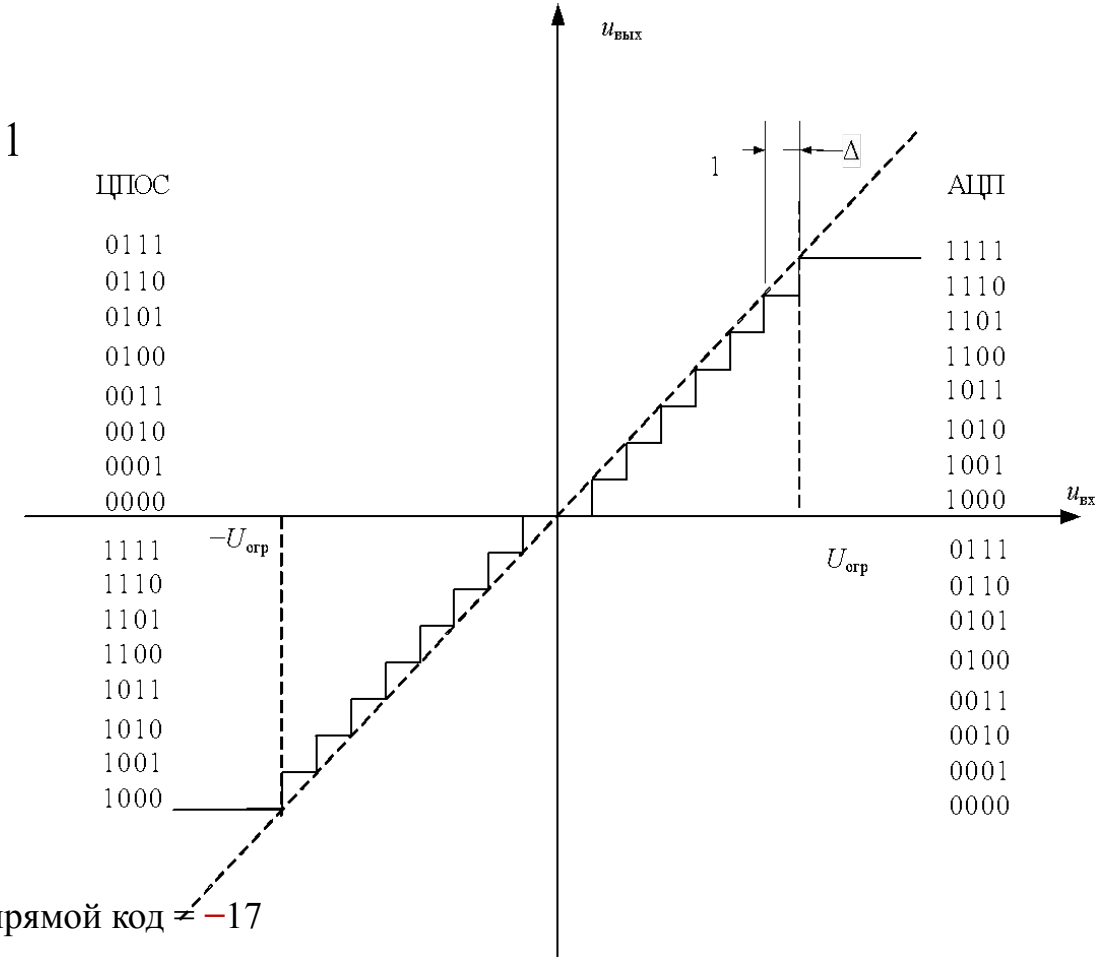
а) 1 00111 – дополнительный код

б) 1 11000

в) 1 11000

+ 0 00001

1 11001 – прямой код



8 –25= –17

0 01000

+ 1 00111

1 01111 – дополнительный код

1 10000

+ 0 00001

1 10001 – прямой код = –17

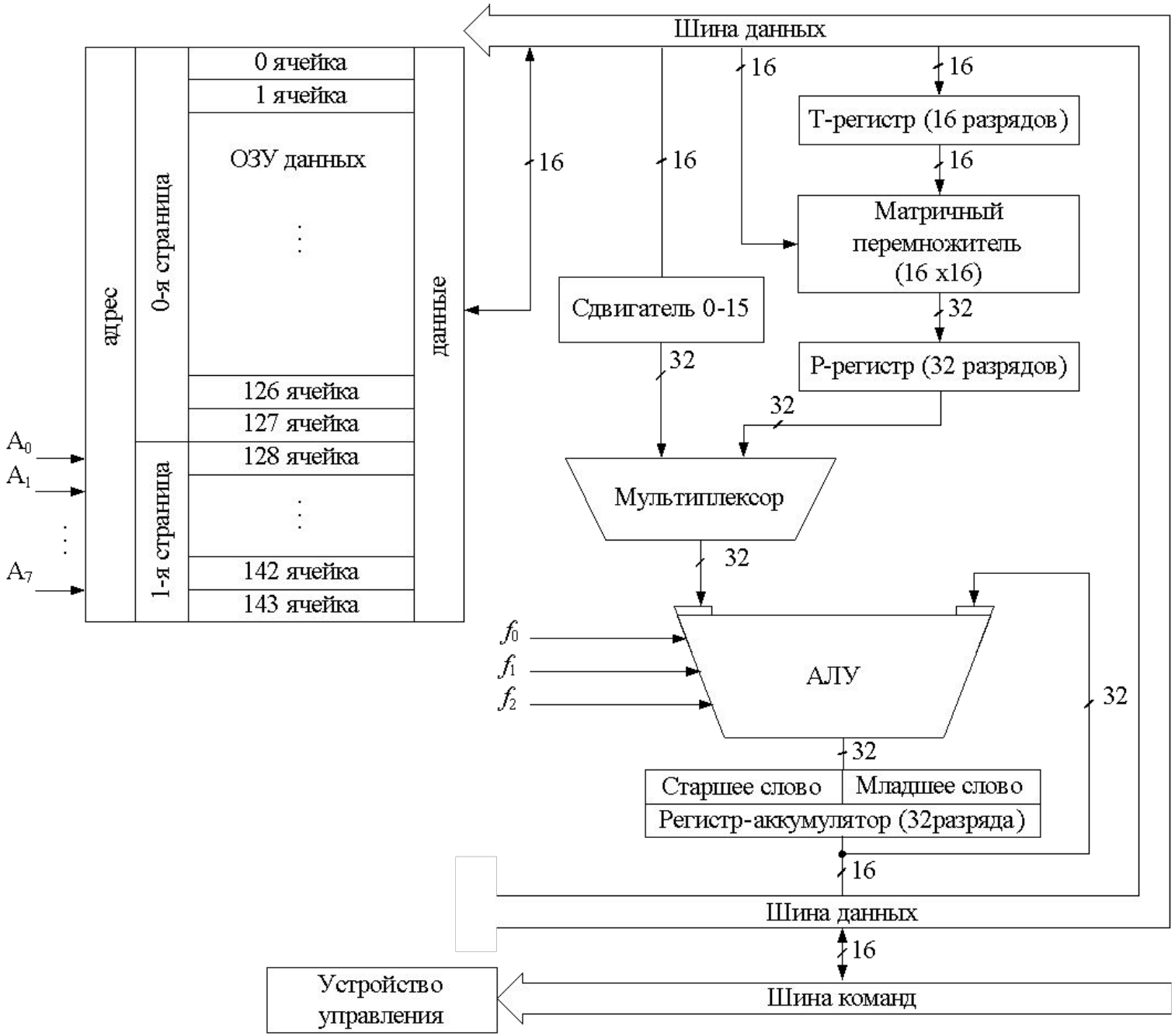
31 –25= +6

0 11111

+ 1 00111

1| 0 00110 – дополнительный/прямой код

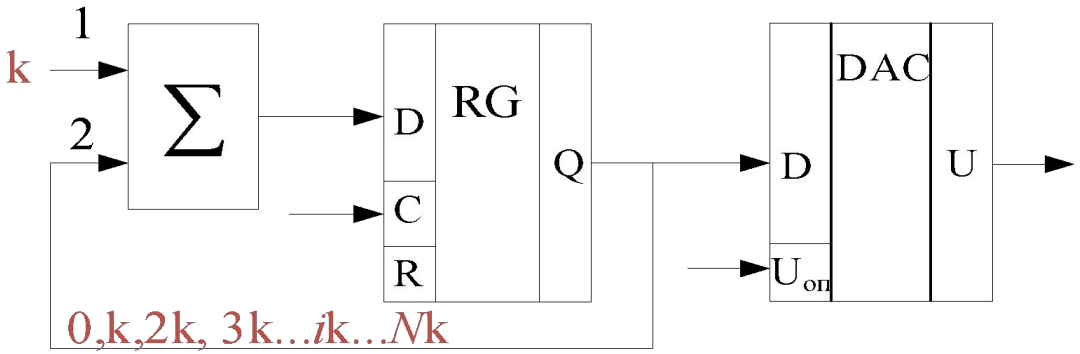
Сигнальный процессор TMS 32010

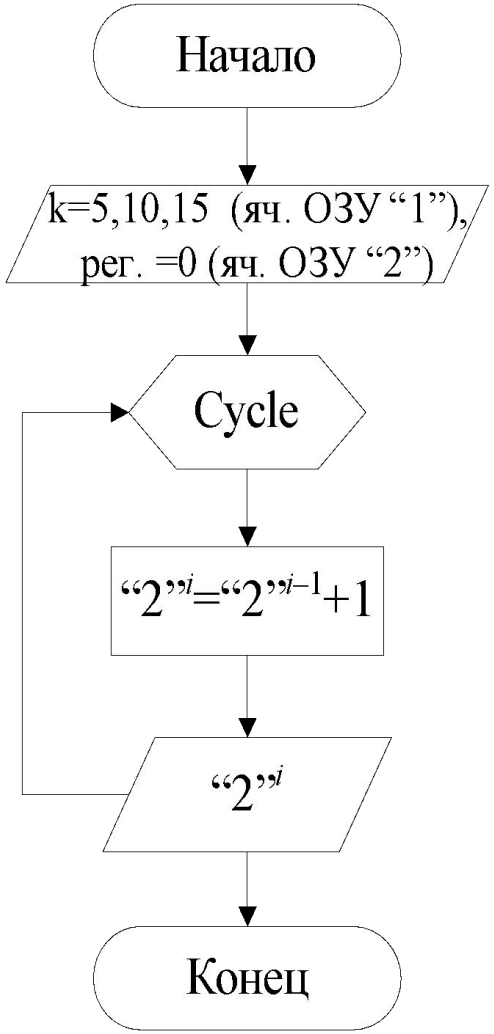


Команды сигнального процессоров

ADD Прибавить к содержимому аккумулятора со сдвигом
AND Логическое умножение с содержимым аккумулятора
APAC Прибавить содержимое регистра P к содержимому аккумулятора
B Безусловный переход
BNZ Переход при значении содержимого аккумулятора ≠0
BZ Переход при значении содержимого аккумулятора = 0
IN Считать данные из порта
LAC Загрузить в аккумулятор со сдвигом
LACK Загрузить в аккумулятор константой
LDPK Загрузить в указатель на страницу памяти (константа)
LT Загрузить в T-регистр
MAC Выполнить умножение и сохранить результат операции в аккумуляторе
MPY Выполнить умножение
MPYK Выполнить умножение с константой
OR Логическое «ИЛИ» с содержимым аккумулятора
OUT Вывести данные в порт
PAC Загрузить в аккумулятор содержимое P-регистра
SACH Сохранить старшее слово аккумулятора со сдвигом
SACL Сохранить младшее слово аккумулятора со сдвигом
SPAC Вычесть содержимое P-регистра из аккумулятора
SUB Вычесть из содержимого аккумулятора со сдвигом
SUBK Вычесть константу из содержимого аккумулятора
TBLR Чтение таблицы
TBLW Запись таблицы
XOR Выполнить исключительное «ИЛИ» с содержимым аккумулятора
ZAC Обнулить аккумулятор

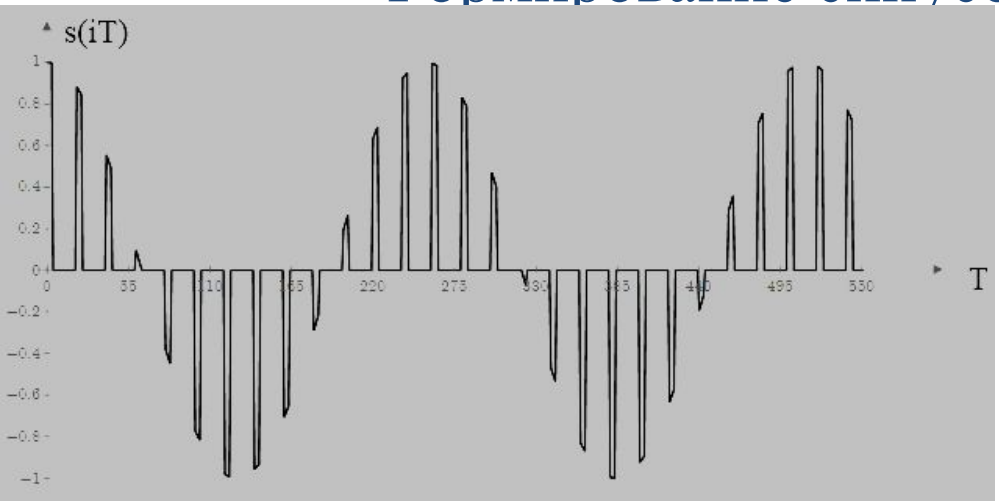
Формирование пилообразного напряжения методом работы накапливающего сумматора





```
        .text
        ldpk 0
        lack 5  (10,15)
        sacl 1
        zac
Cycle  lac 2
        add 1
        sacl 2
        out 2,pa0
        b Cycle
        .end
```

Формирование синусоидального сигнала



- One .set 1
- DelFi .set 2
- Fi .set 3
- SinFi .set 4
- .text
- LDPK 0
- LACK 1
- SACL One
- LACK 30
- SACL DelFi
- ZAC
- SACL Fi

```
Cycle     LAC Fi
          ADD DelFi
          SACL Fi
          LACK 0FFh
          ADD One,8
          AND Fi
          SACL Fi
          LAC One,7
          ADD Fi
          TBLR SinFi
          LAC One,15
          XOR SinFi
          SACL SinFi
          OUT SinFi, PA0
          B Cycle
          .end
```

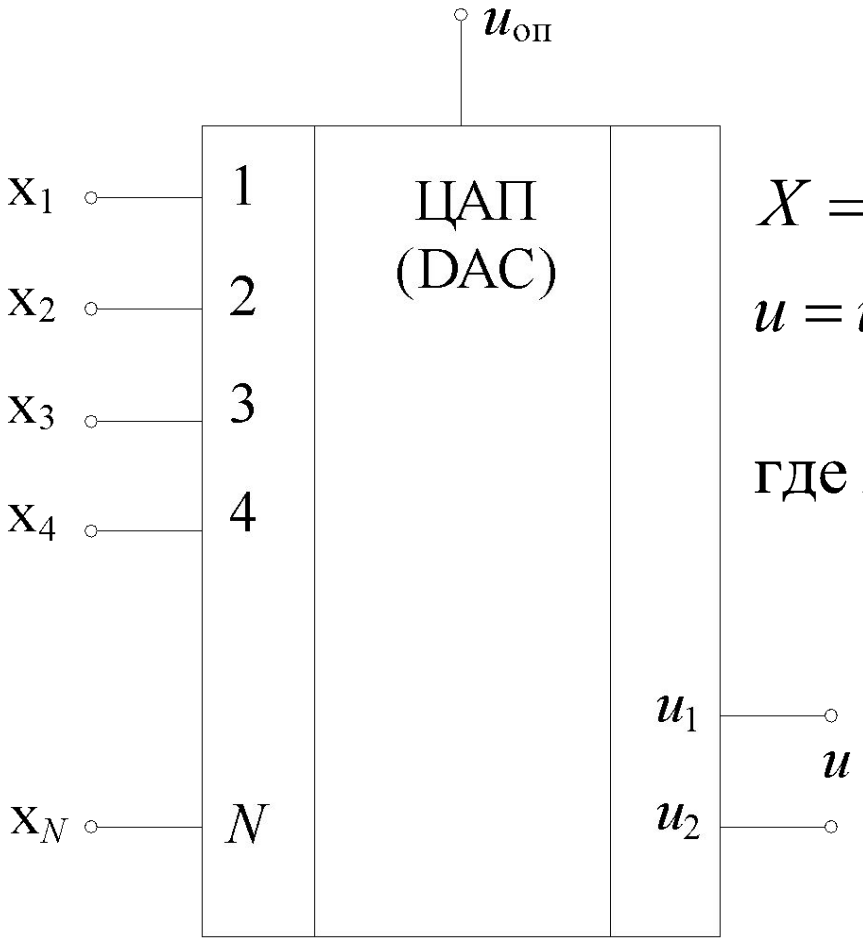
Формирование сигнала с частотной модуляцией

```
*fm.asm
One .set 1
DelFi .set 2
Fi .set 3
SinFi .set 4
Inf .set 5
Count .set 6
  .text
  LDPK 0
  LACK 1
  SACL One
A       LAC One,7
  SACL Count
  LAC Inf
  AND One
  XOR One
  SACL Inf
  BNZ F
  LACK 8
  SACL DelFi
  B LC
FLACK 16
SACL DelFi
LC    LAC Fi
      ADD DelFi
      SACL Fi
      LACK 11111111B
      ADD One,8
      AND Fi
      ADD One,7
      TBLR SinFi
      LAC One,15
      XOR SinFi
      SACL SinFi
      OUT SinFi,PA0
      LAC Count
      SUB One
      SACL Count
      BNZ LC
      B A
.end
```

Формирование сигнала с частотной модуляцией

```
*phm.asm
One .set 1
DelFi .set 2
Fi .set 3
SinFi .set 4
Inf .set 5
Inf0 .set 6
Count .set 7
.text
  LDPK 0
  LACK 1
  SACL One
        LACK 8
  SACL DelFi
A       LAC One,7
  SACL Count
  LAC Inf
  AND One
  XOR One
  SACL Inf
  BZ F
      LAC Fi
      ADD One,8
      SACL Fi
      B LC
F     LAC Fi
      SUB One,8
      SACL Fi
LC    LAC Fi
      ADD DelFi
      SACL Fi
      LACK 11111111B
      ADD One,8
      AND Fi
      ADD One,7
      TBLR SinFi
      LAC One,15
      XOR SinFi
      SACL SinFi
      OUT SinFi,PA0
      LAC Count
      SUB One
      SACL Count
      BNZ LC
      B A
.end
```

Цифро-аналоговый преобразователь

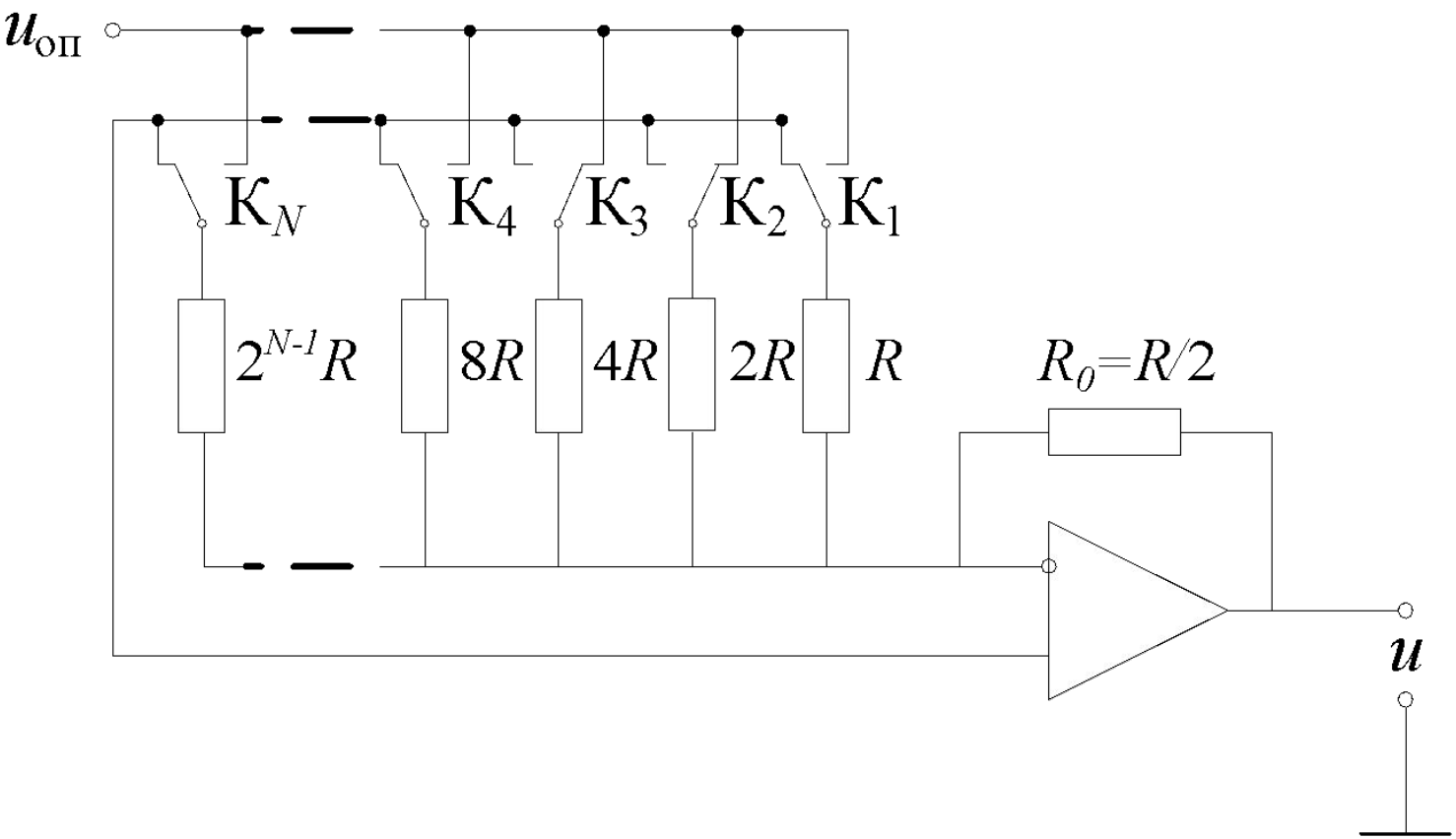


$$X = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_N\},$$

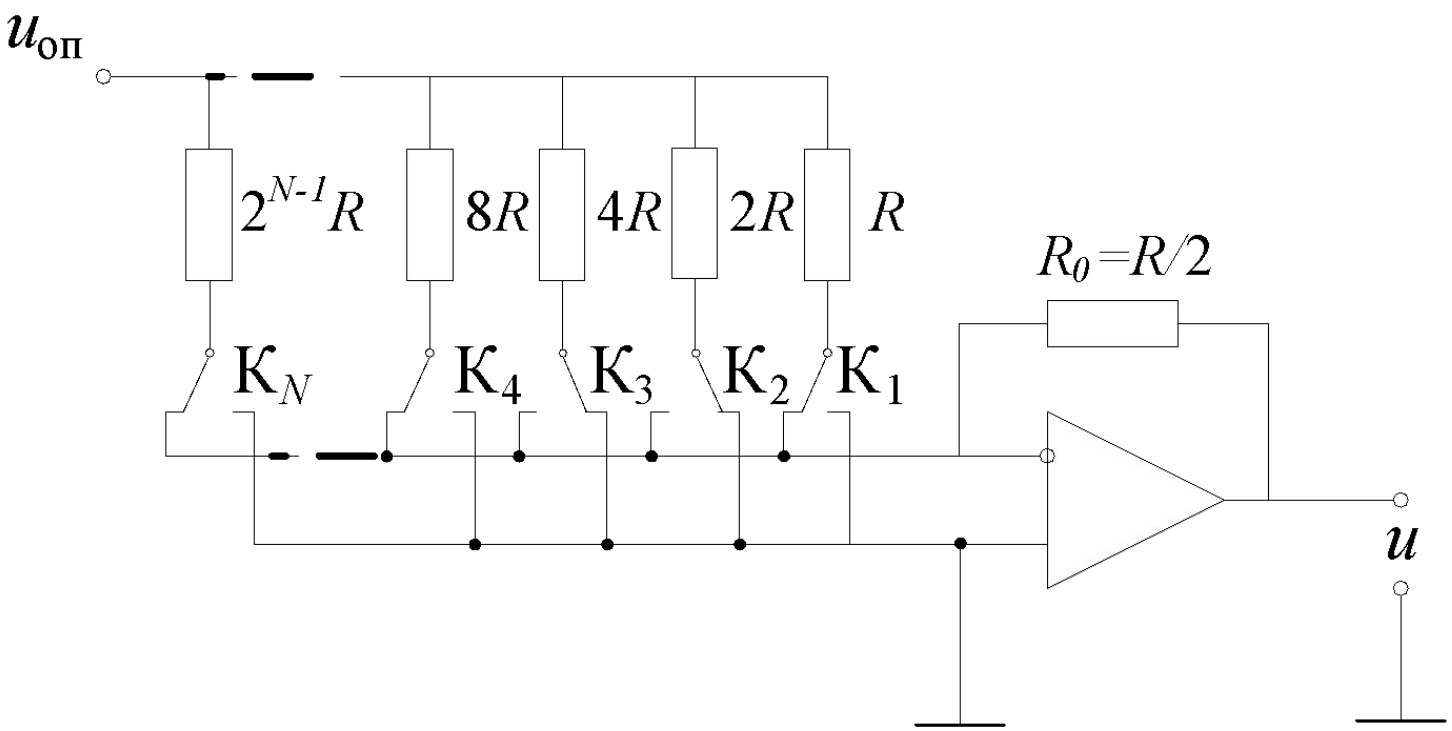
$$u = u_{оп} D,$$

где $D = \frac{x_1}{2} + \frac{x_2}{2^2} + \frac{x_3}{2^3} + \ldots + \frac{x_N}{2^N}$, $x_n = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$

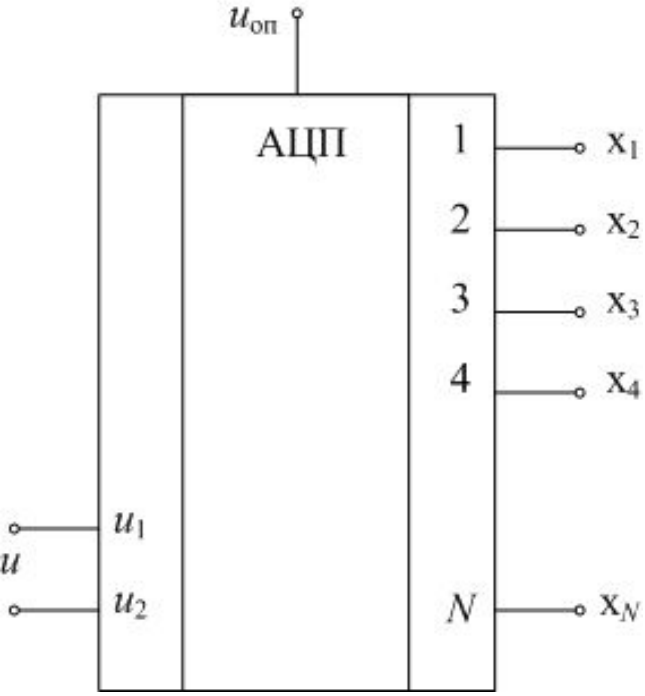
Цифро-аналоговый преобразователь с коммутацией напряжений

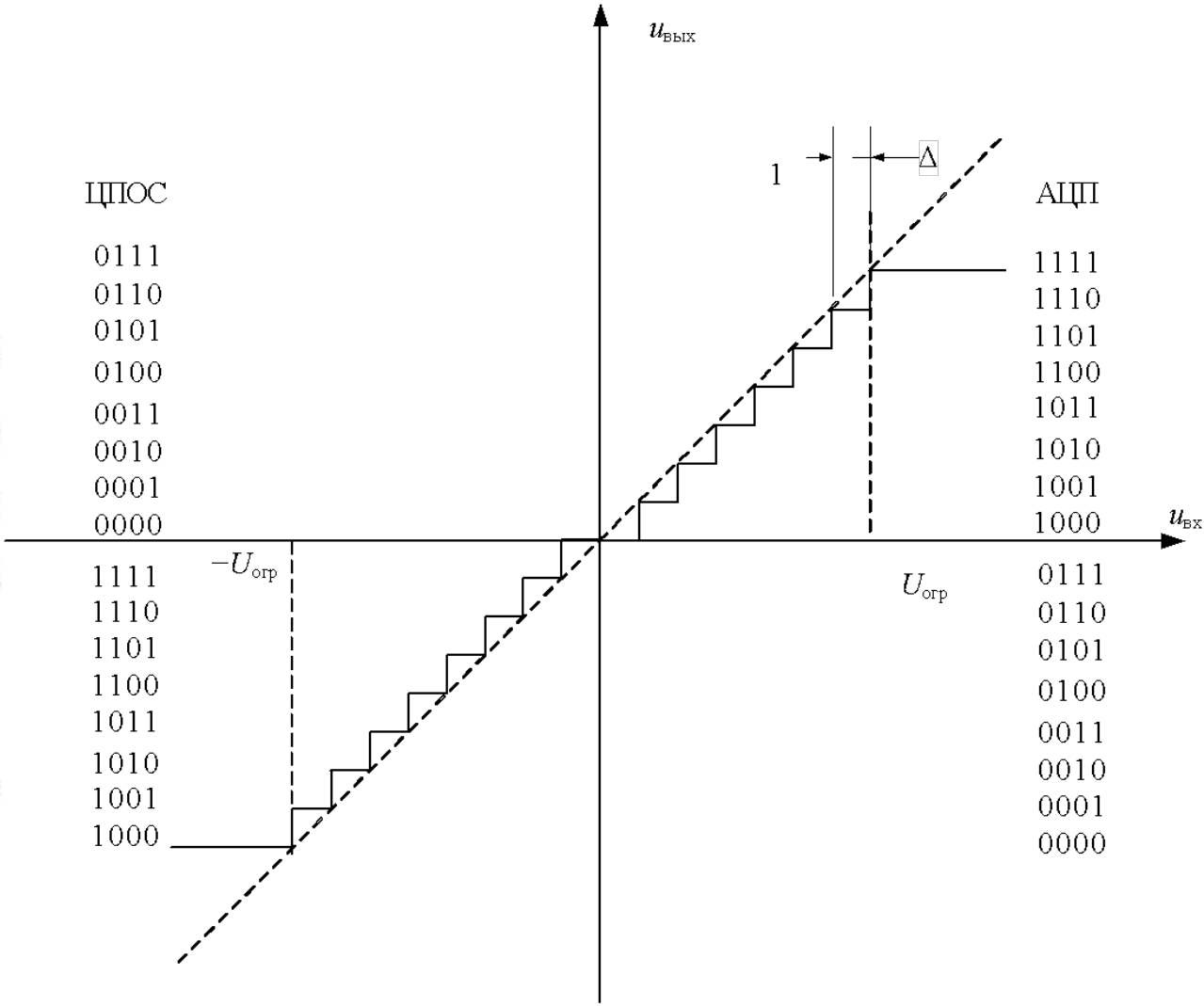


Цифро-аналоговый преобразователь с коммутацией токов

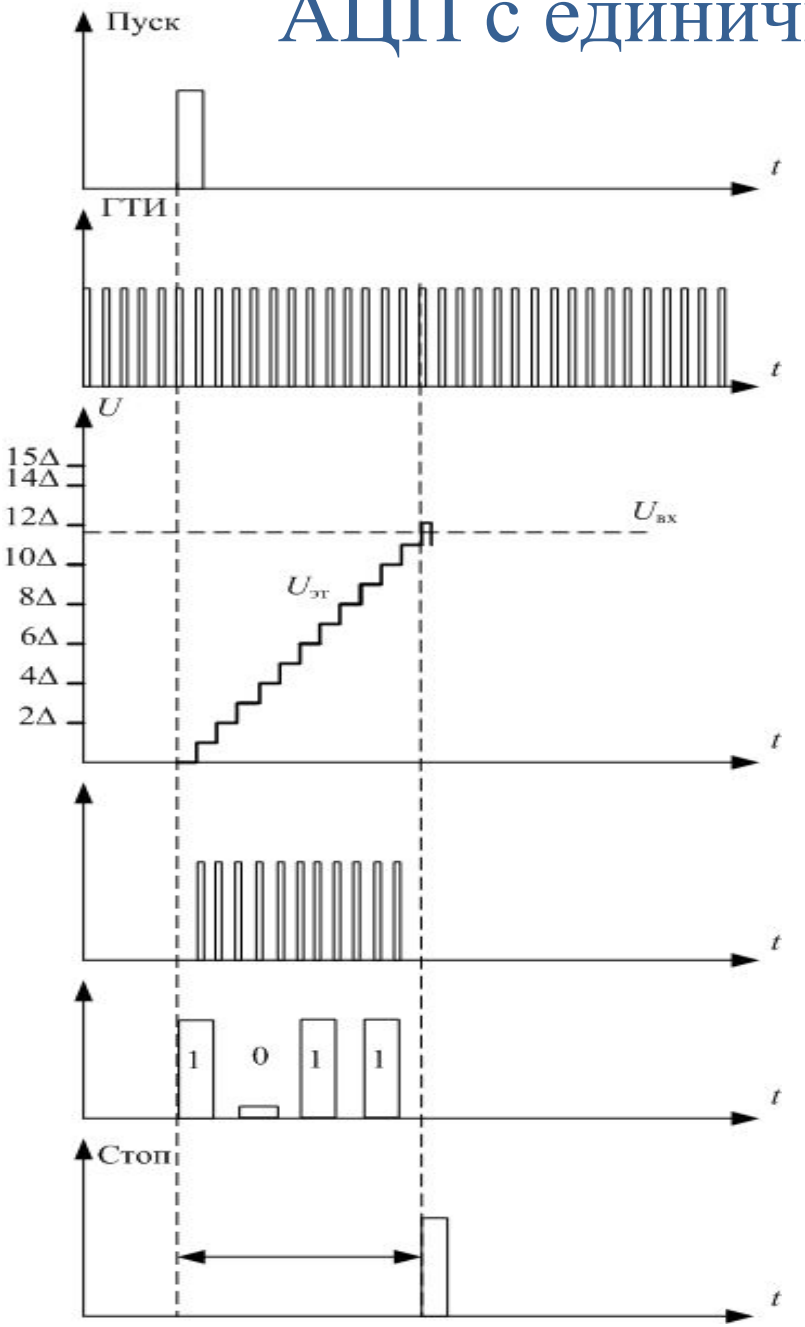


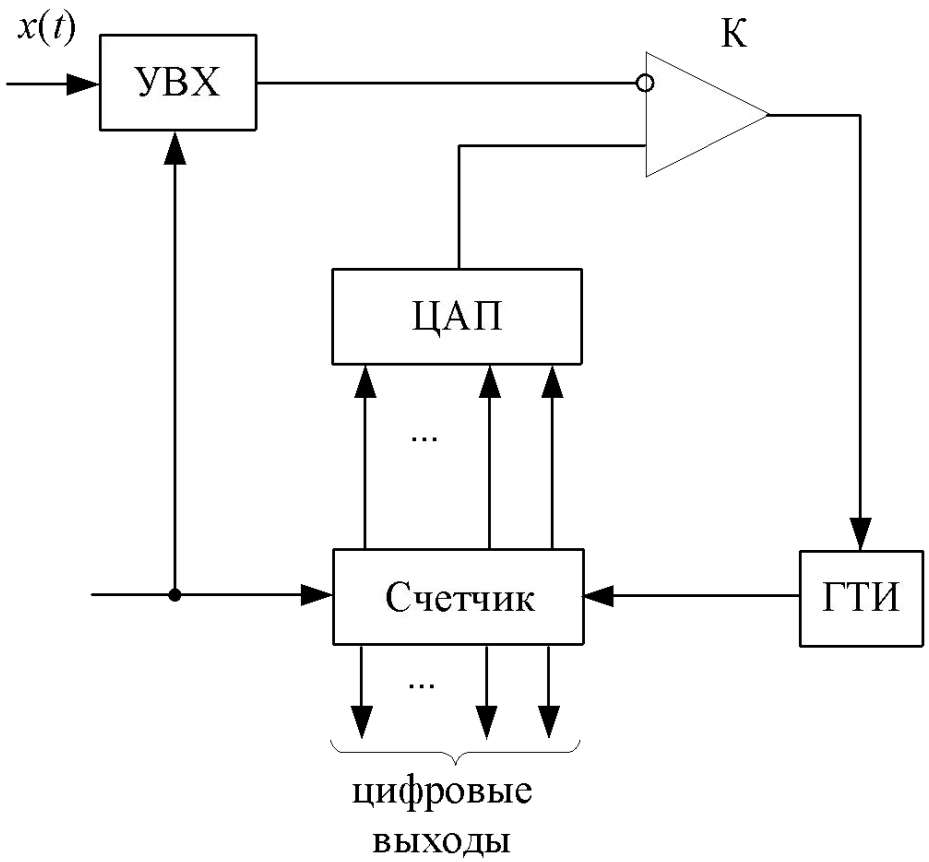
Аналого-цифровой преобразователь



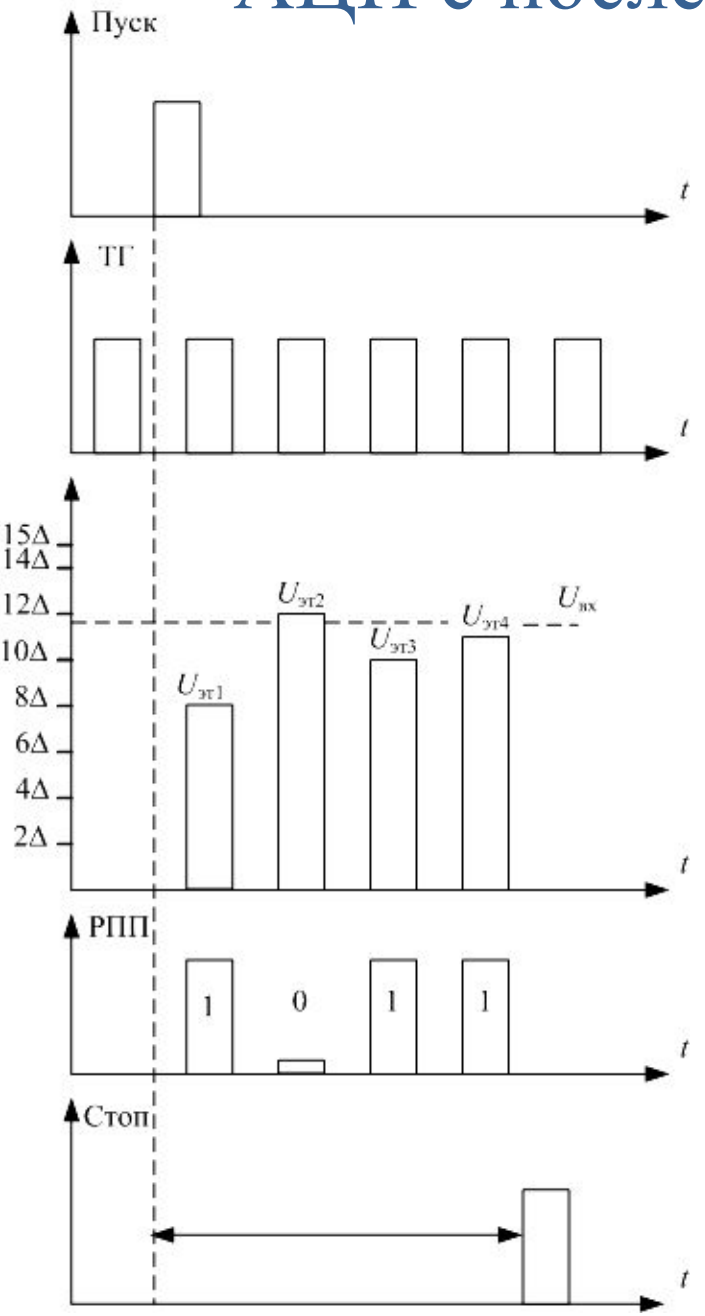


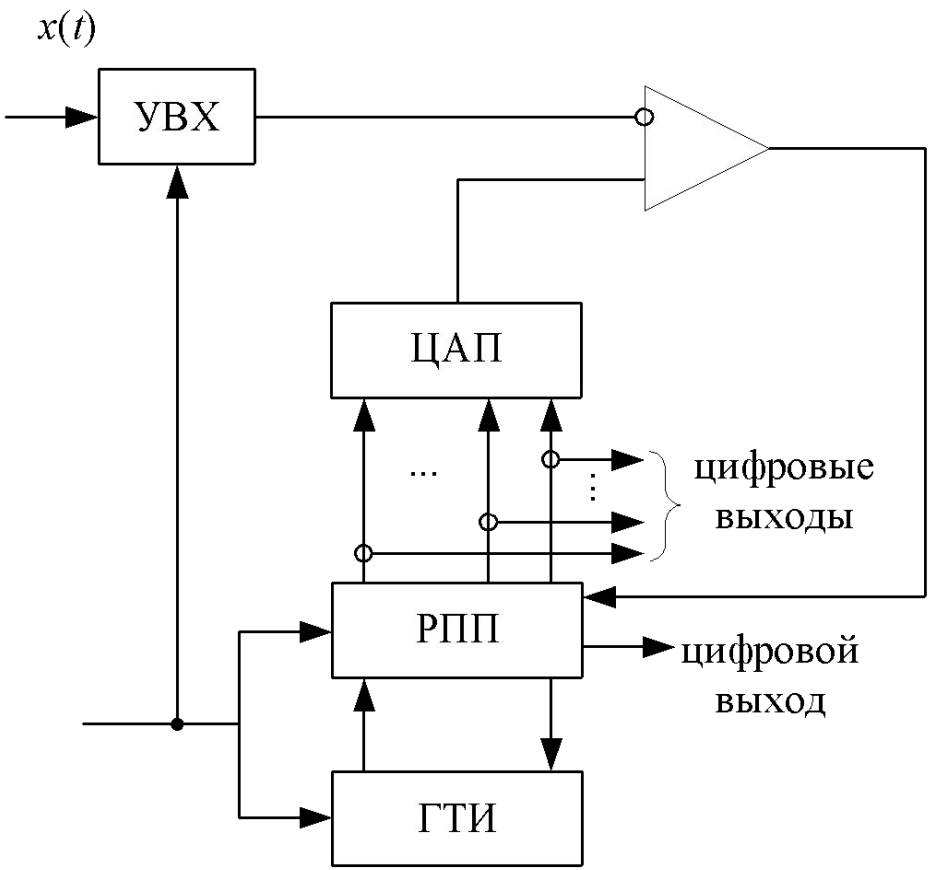
АЦП с единичными приближениями



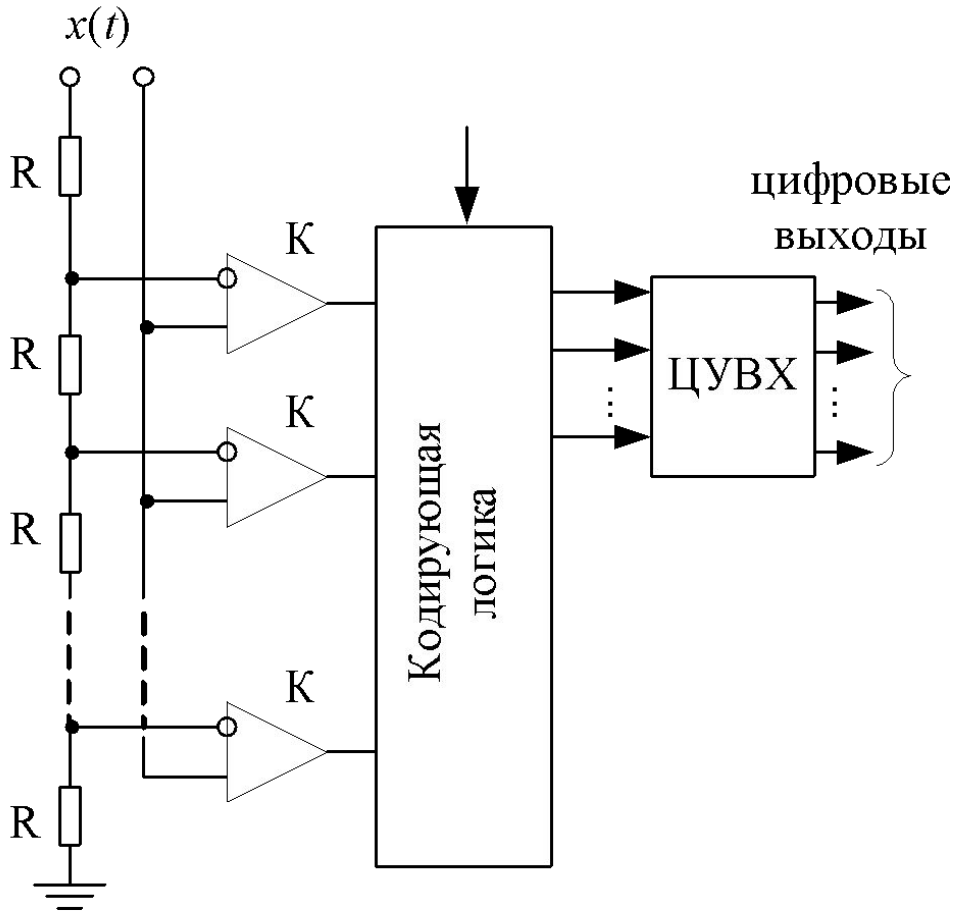


АЦП с последовательных приближений

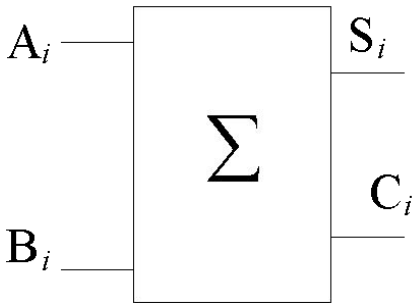


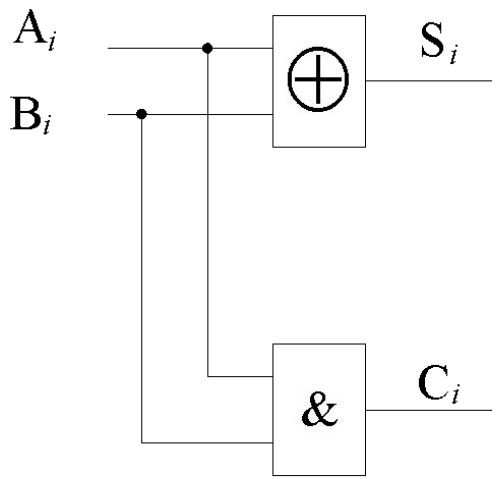


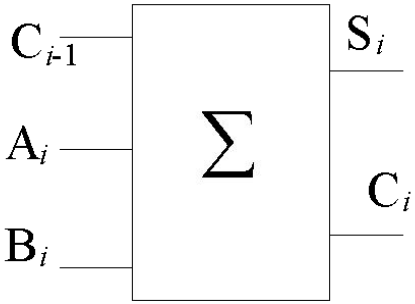
Аналого-цифровой преобразователь непосредственного сравнения

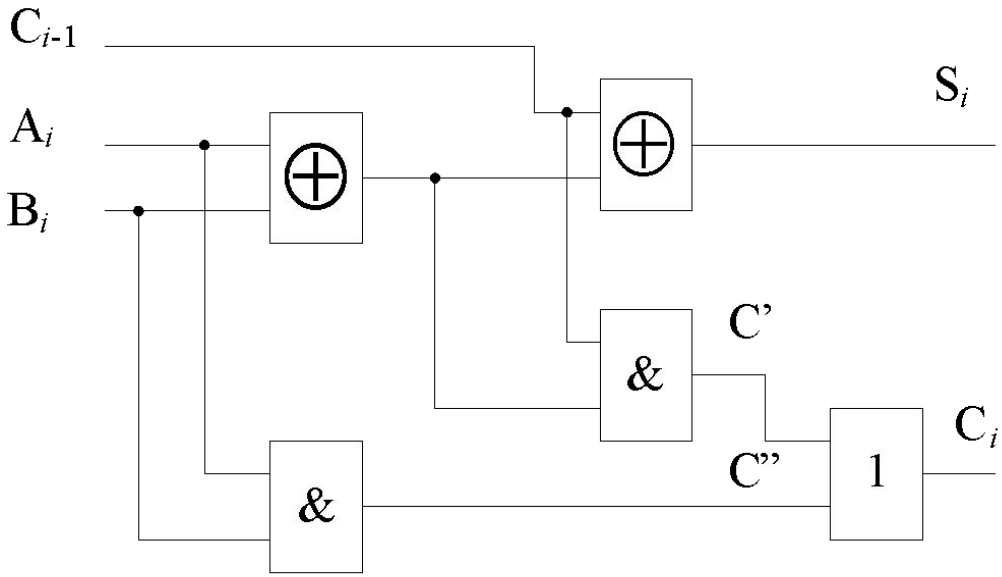


Устройства арифметического сложения

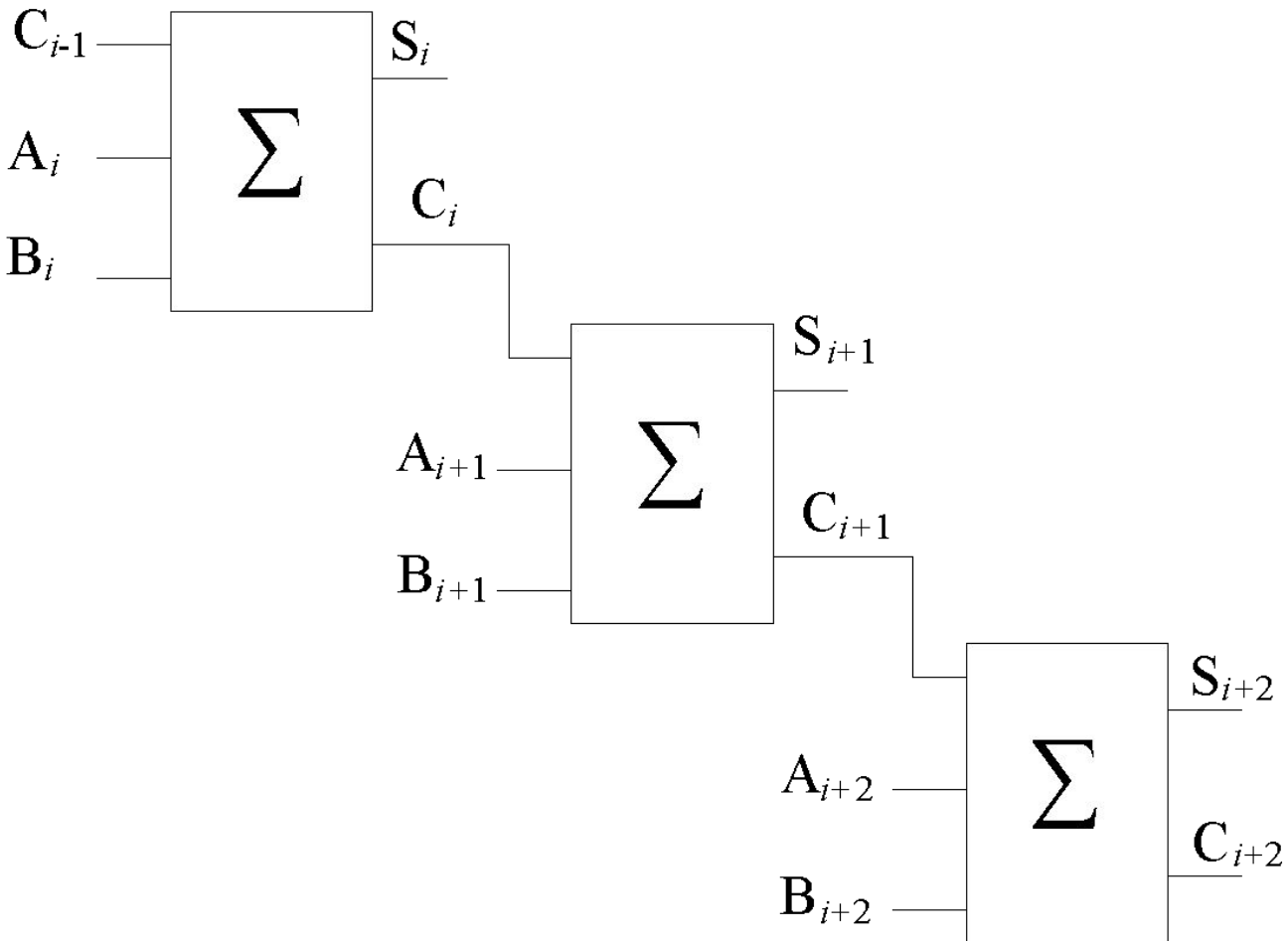






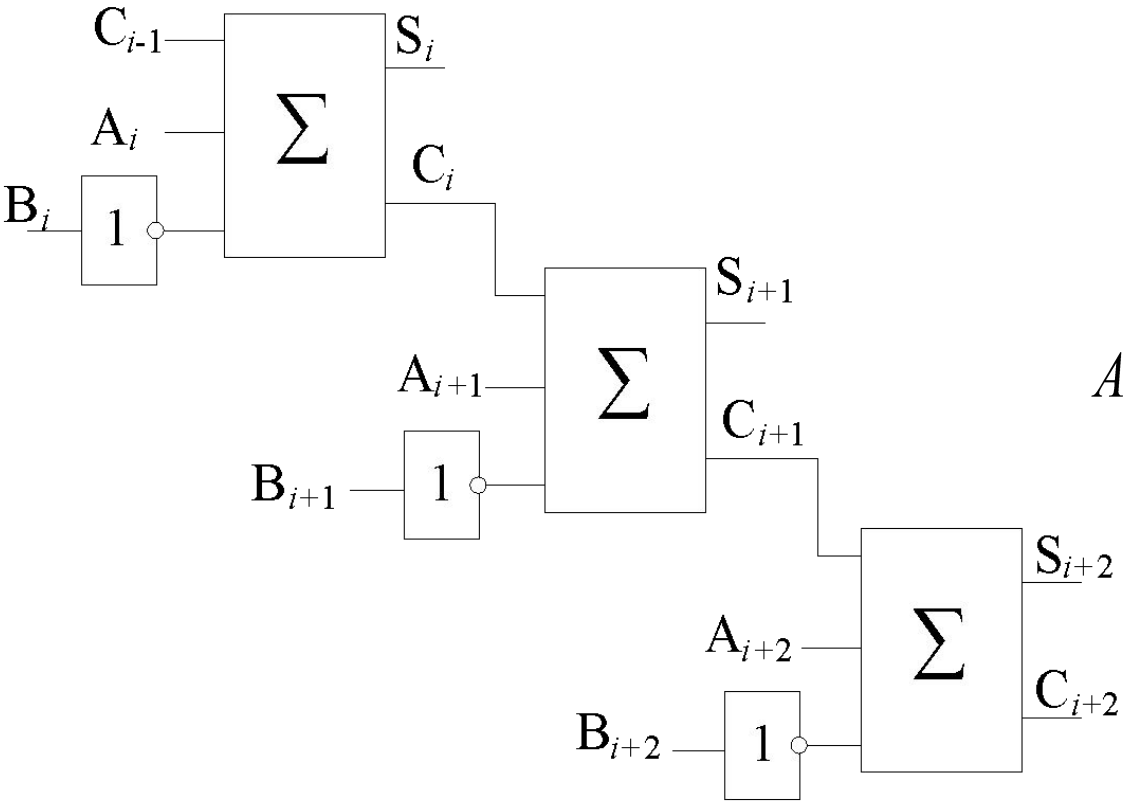


A*i*	0	0	1	0	0	1	1	1
B*i*	0	0	0	1	1	0	1	1
C*i*-1	0	1	0	0	1	1	0	1
S*i*	0	1	1	0	0	0	0	1
C*i*	0	0	0	1	1	1	1	1



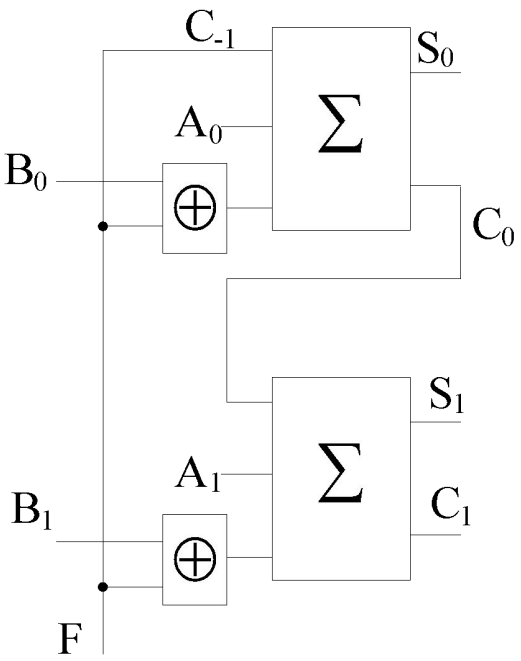
Устройство вычитания

A*i*	0	0	1	0	0	1	1	1
B*i*	0	0	0	1	1	0	1	1
C*i*-1	0	1	0	0	1	1	0	1
S*i*	1	0	0	0	1	1	1	0
C*i*	0	1	1	0	0	1	0	1

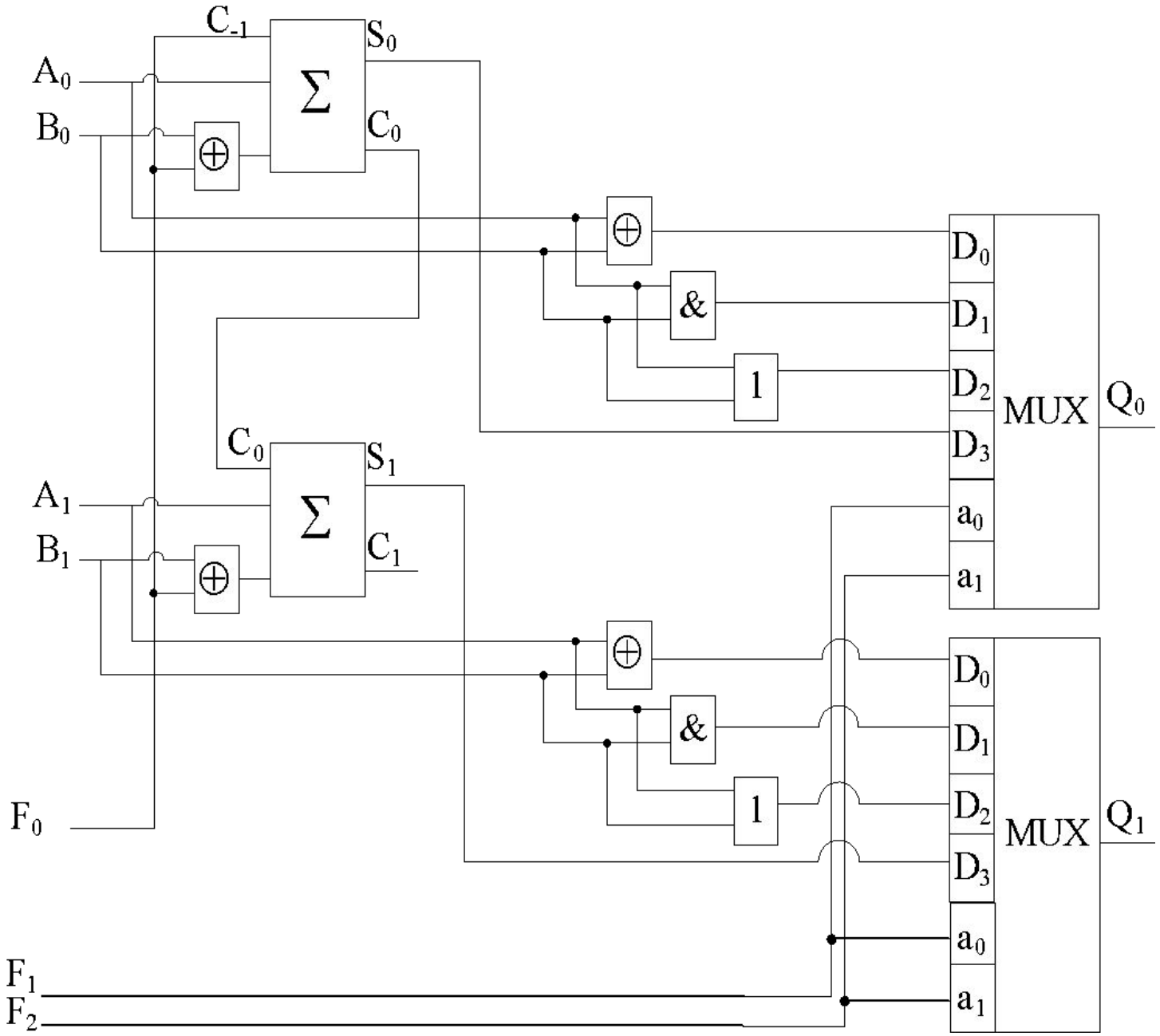


$$A - B = A + (-B) = A + \overline{B} + 1$$

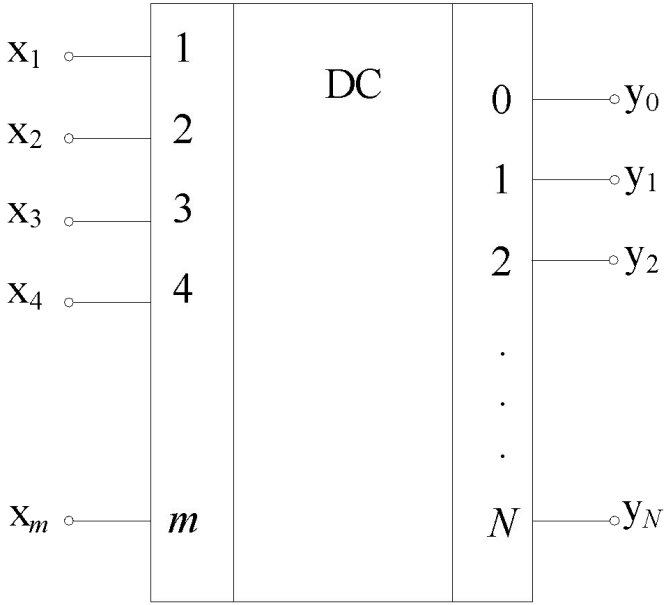
Универсальное арифметическое устройство

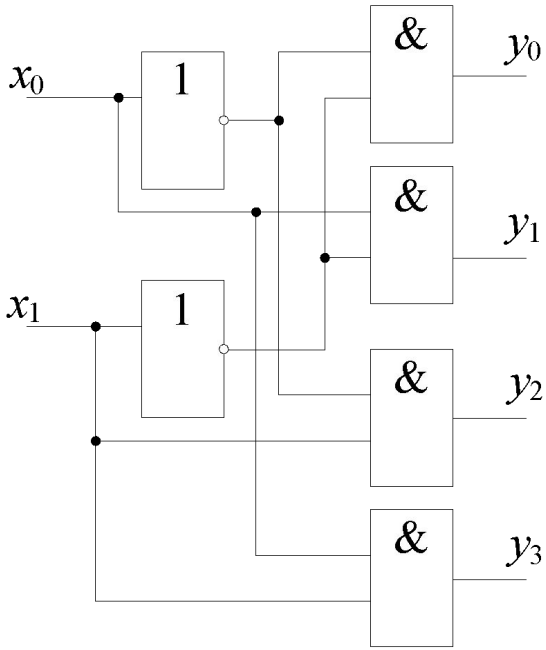


Арифметико-логическое устройство



Дешифратор





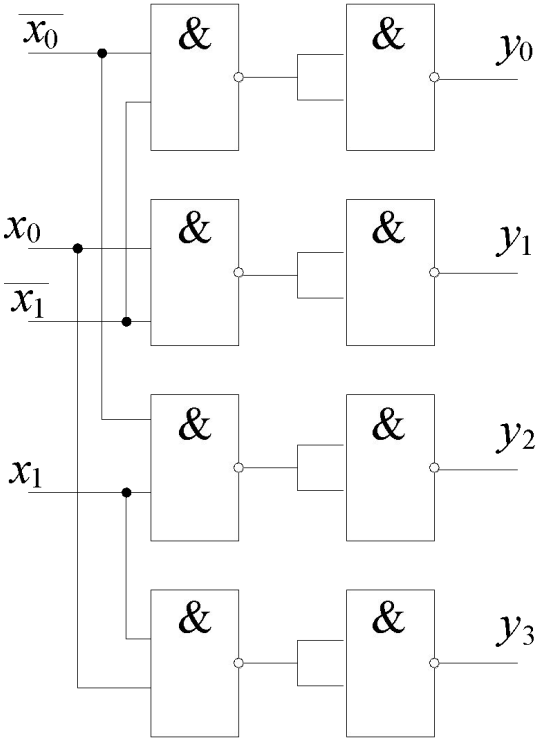
$$N+1=2^m$$

$$y_0=\bar{x}_1\bar{x}_2=\overline{\overline{\bar{x}_1\bar{x}_2}}$$

$$y_1=x_1\bar{x}_2=\overline{\overline{x_1\bar{x}_2}}$$

$$y_2=\bar{x}_1x_2=\overline{\overline{\bar{x}_1x_2}}$$

$$y_0=x_1x_2=\overline{\overline{x_1x_2}}$$



$$y_0' = \bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3 = \overline{\overline{\bar{x}_1\bar{x}_2\bar{x}_3}}$$

$$y_1' = x_1\bar{x}_2\bar{x}_3 = \overline{\overline{x_1\bar{x}_2\bar{x}_3}}$$

$$y_2' = \bar{x}_1x_2\bar{x}_3 = \overline{\overline{\bar{x}_1x_2\bar{x}_3}}$$

$$\boxtimes$$

$$y_7' = x_1x_2x_3 = \overline{\overline{x_1x_2x_3}}$$

$$y_0'' = \bar{x}_4\bar{x}_5\bar{x}_6 = \overline{\overline{\bar{x}_4\bar{x}_5\bar{x}_6}}$$

$$y_1'' = x_4\bar{x}_5\bar{x}_6 = \overline{\overline{x_4\bar{x}_5\bar{x}_6}}$$

$$y_2'' = \bar{x}_4x_5\bar{x}_6 = \overline{\overline{\bar{x}_4x_5\bar{x}_6}}$$

$$\boxtimes$$

$$y_7'' = x_4x_5x_6 = \overline{\overline{x_4x_5x_6}}$$

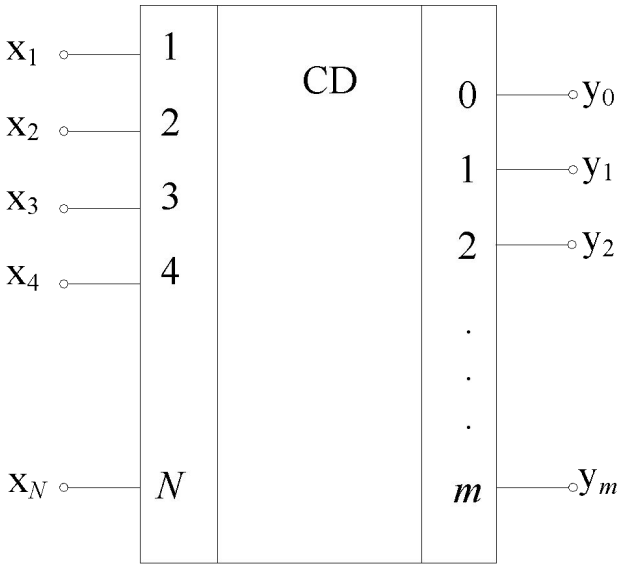
$$y_0 = y_0'y_0''$$

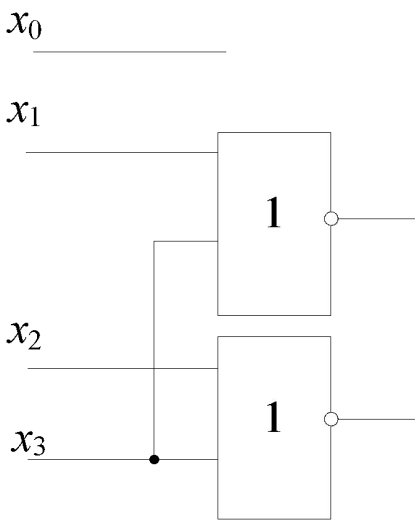
$$y_1 = y_1'y''$$

$$\boxtimes$$

$$y_{63} = y_7'y_7''$$

Шифратор

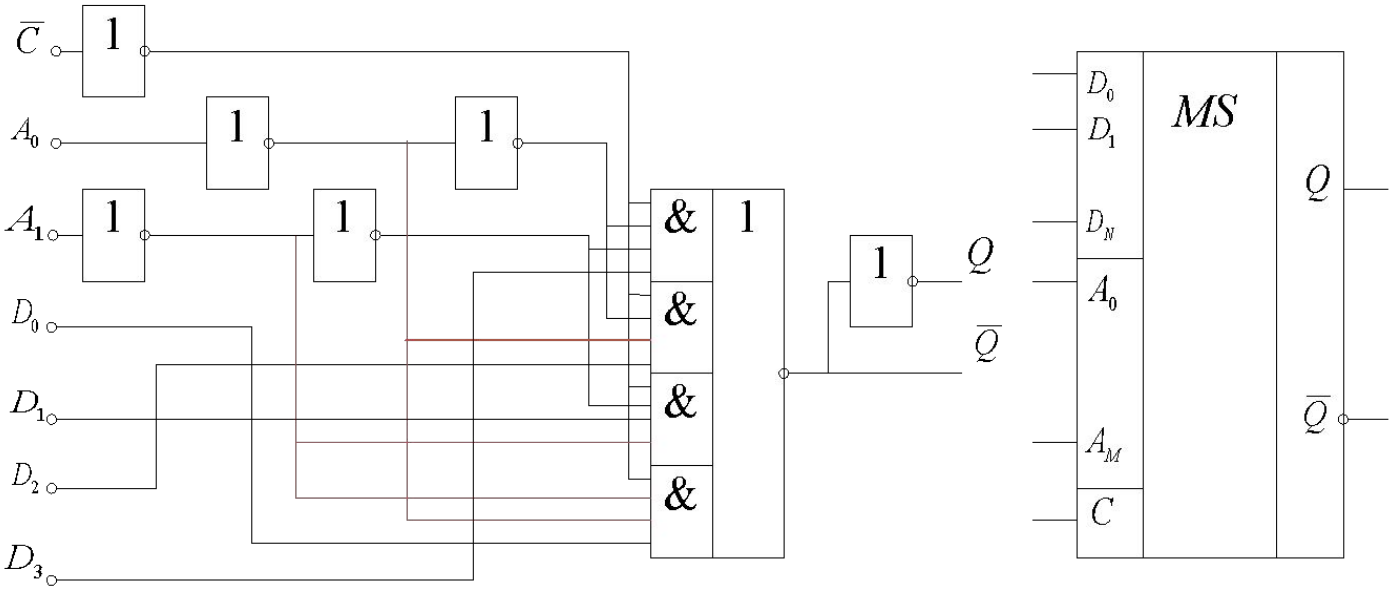




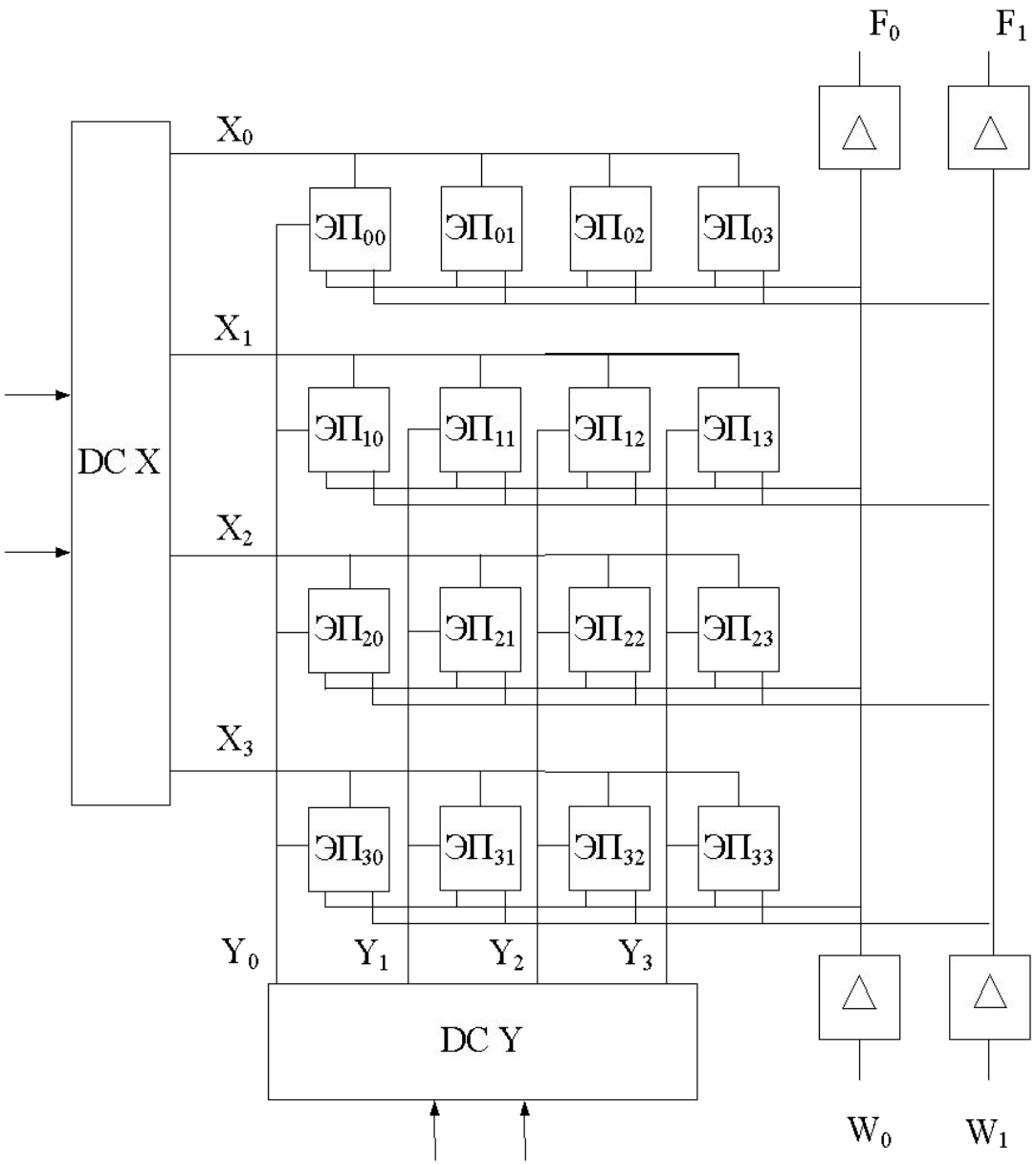
$$y_1 = x_1 + x_3$$

$$y_2 = x_2 + x_3$$

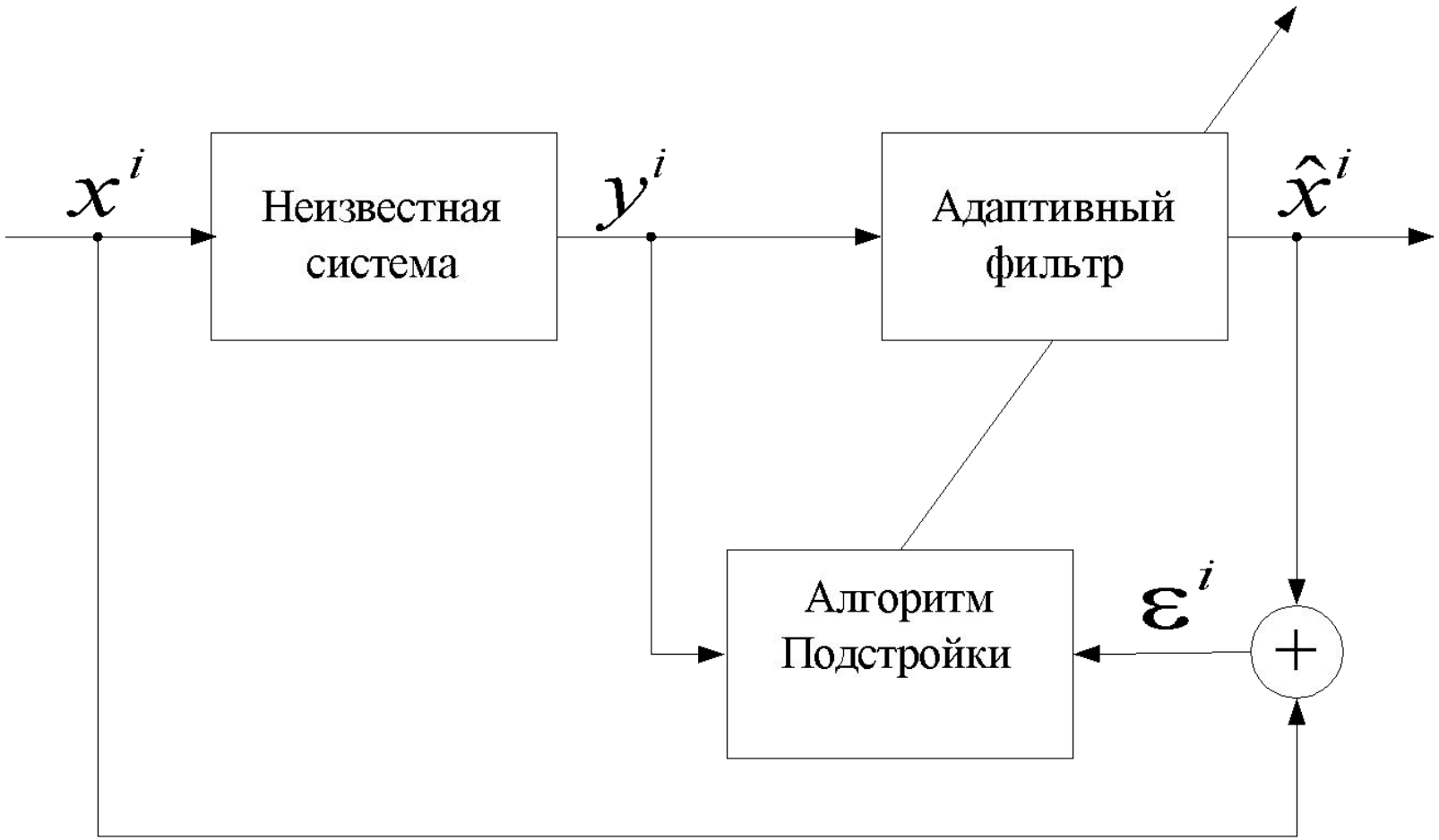
Мультиплексор



Запоминающие устройства



АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА

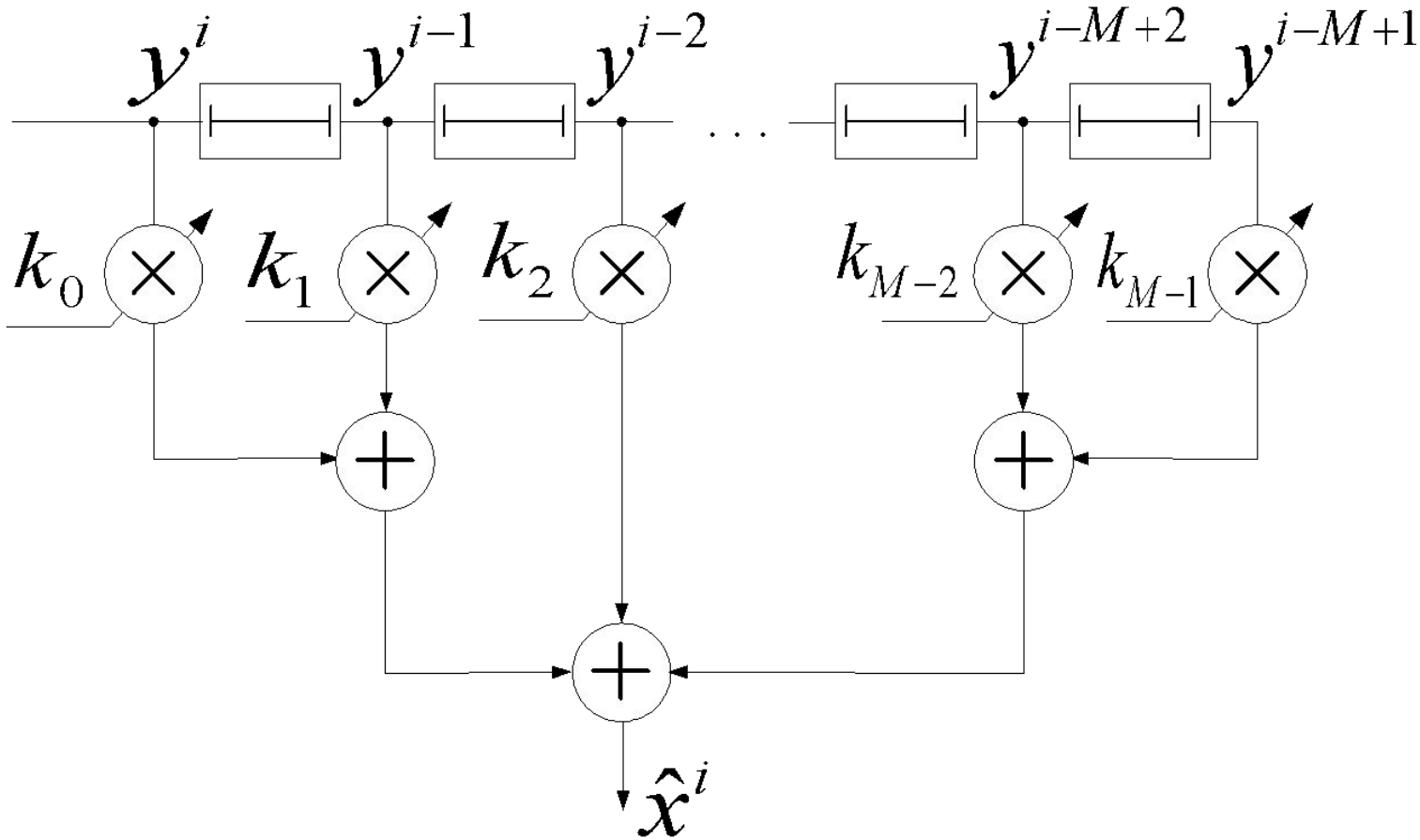


$$y^i = h^a \otimes x^i + n^i = \sum_{a=0}^{A-1} h^a x^{i-a} + n^i$$

$$\hat{x}^i = k^m_{\text{а.ф.}} \otimes y^i = \sum_{m=0}^{M-1} k^m y^{i-m}$$

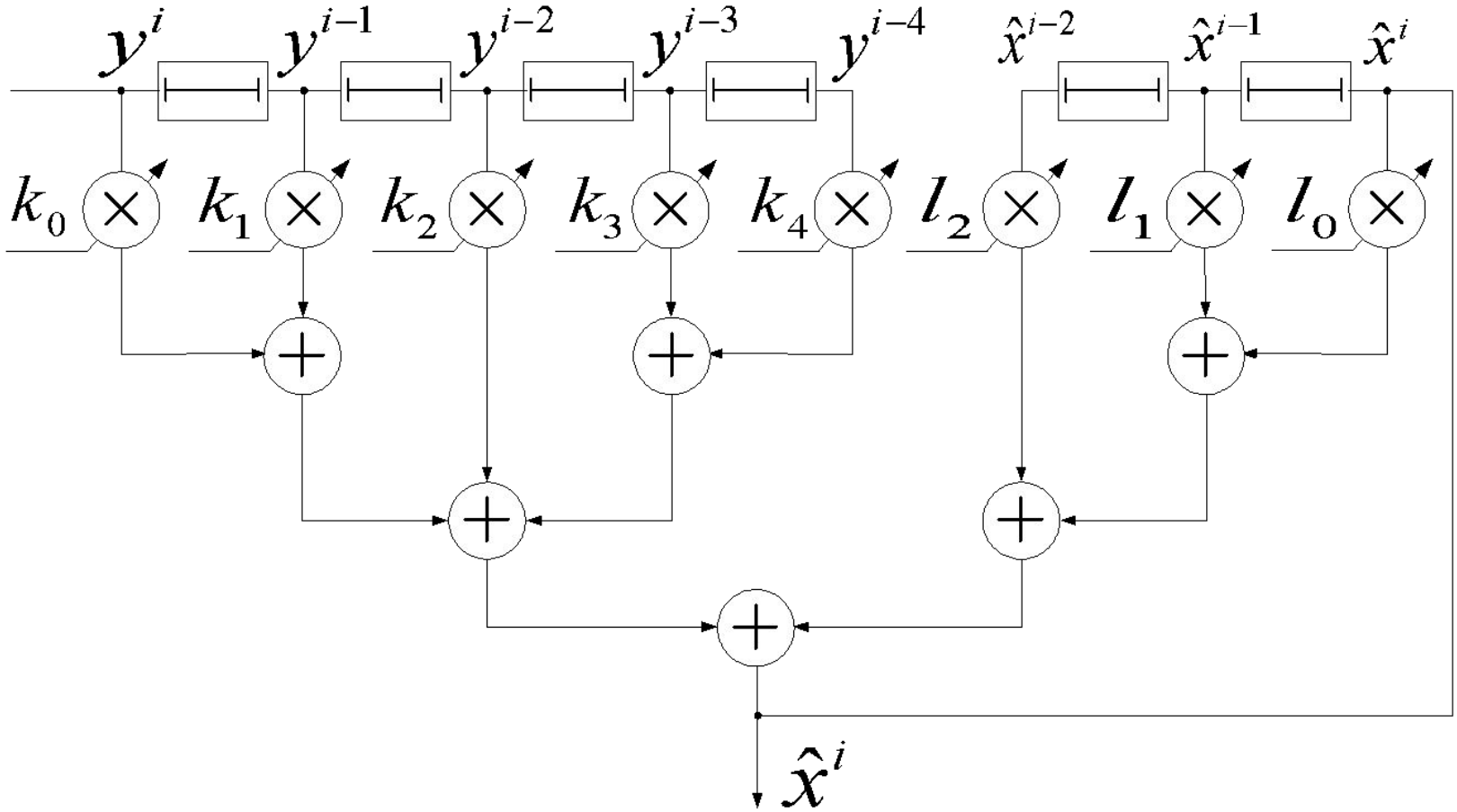
$$\varepsilon^i = x^i - \hat{x}^i$$

Адаптивный нерекурсивный фильтр



$$\hat{x}^i = \sum_{m=0}^{M-1} k^m y^{i-m} = \mathbf{k}\mathbf{y}^i$$

Адаптивный рекурсивный фильтр



$$\hat{x}^i = \sum_{m=0}^{M-1} k^m y^{i-m} - \sum_{n=0}^{N-1} l^n \hat{x}^{i-n} = \mathbf{k}\mathbf{y}^i - \mathbf{l}\hat{\mathbf{x}}^i$$

$$\varepsilon^i = x^i - \hat{x}^i = x^i - \sum_{m=0}^{M-1} k^m x^{i-m} = x^i - (\mathbf{k}^i)^T \mathbf{y}^i$$

$$\left(\varepsilon^i\right)^2 = \left(x^i\right)^2 + \left(\mathbf{k}^i\right)^T \mathbf{y}^i \left(\mathbf{y}^i\right)^T \mathbf{k}^i - 2x^i \left(\mathbf{y}^i\right)^T \mathbf{k}^i$$

$$E\left[\left(\varepsilon^i\right)^2\right] = E\left[\left(x^i\right)^2\right] + \left(\mathbf{k}^i\right)^T E\left[\mathbf{y}^i \left(\mathbf{y}^i\right)^T\right] \mathbf{k}^i - 2E\left[x^i \left(\mathbf{y}^i\right)^T\right] \mathbf{k}^i$$

$$\xi = E\left[\left(\varepsilon^i\right)^2\right] = E\left[\left(x^i\right)^2\right] + \left(\mathbf{k}^i\right)^T \mathbf{R}\mathbf{k}^i - 2\mathbf{P}^T \mathbf{k}^i$$

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{k}^i} = 2\mathbf{R}\left(\mathbf{k}^i\right) - 2\mathbf{P} \qquad \nabla = 0 = 2\mathbf{R}\mathbf{k}^* - 2\mathbf{P}$$

$$\mathbf{k}^* = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{P}$$

$$\xi_{\min} = E\left[\left(x^i\right)^2\right] - \mathbf{P}^T \mathbf{k}^*$$

Другое представление градиента

$$\xi = \xi_{\min} + (\mathbf{k}^i - \mathbf{k}^*)^T \mathbf{R} (\mathbf{k}^i - \mathbf{k}^*)$$

$$\xi = \xi_{\min} + (\mathbf{v}^i)^T \mathbf{R} \mathbf{v}^i$$

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{v}^i} = 2\mathbf{R}\mathbf{v}^i$$

Декорреляция сигнала ошибки и входного сигнала

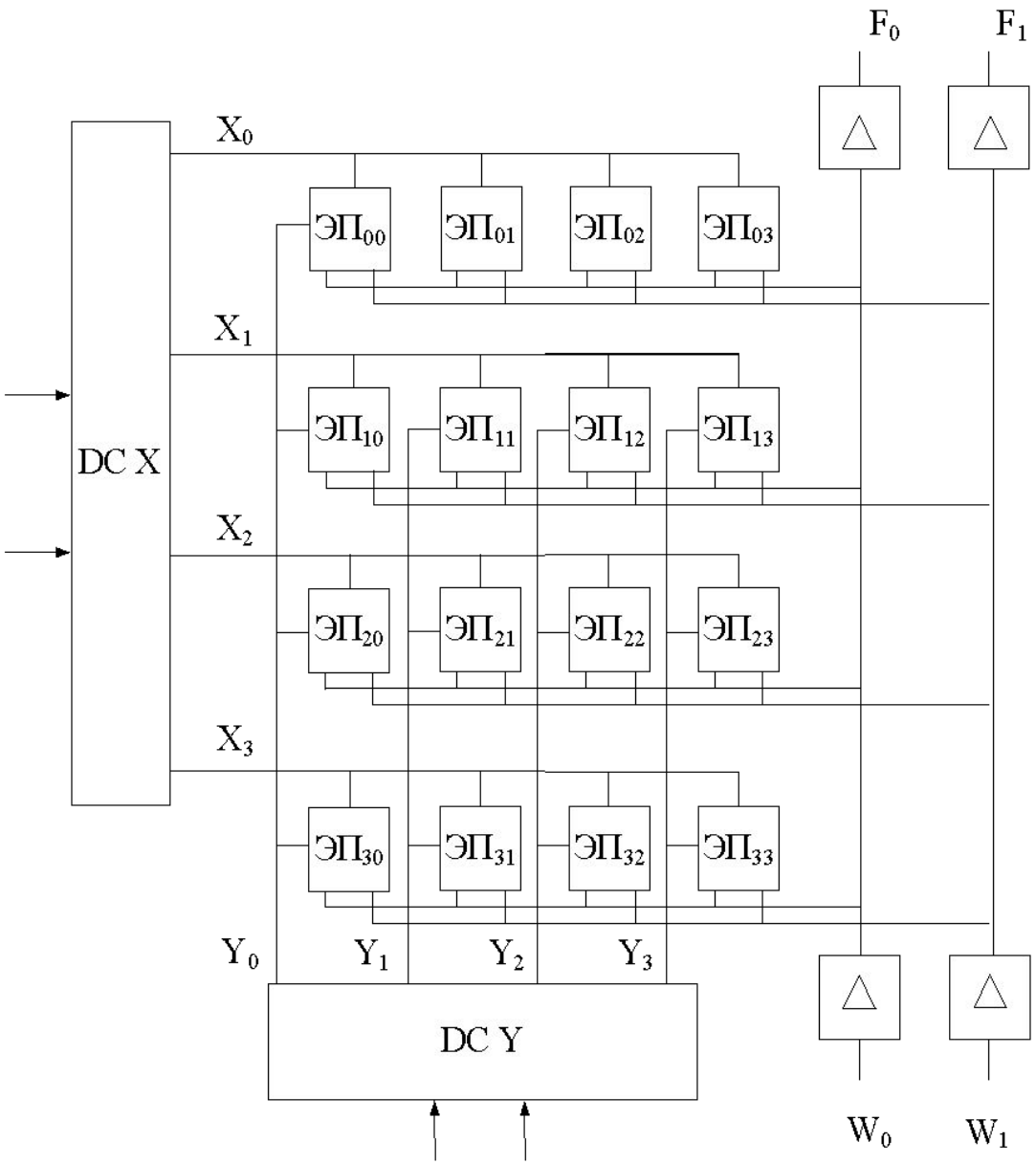
$$\mathbf{k}^i = \mathbf{k}^*$$

$$\varepsilon^i = x^i - (\mathbf{k}^i)^T \mathbf{y}^i$$

$$\varepsilon^i \mathbf{y}^i = x^i \mathbf{y}^i - \mathbf{y}^i (\mathbf{y}^i)^T \mathbf{k}^i$$

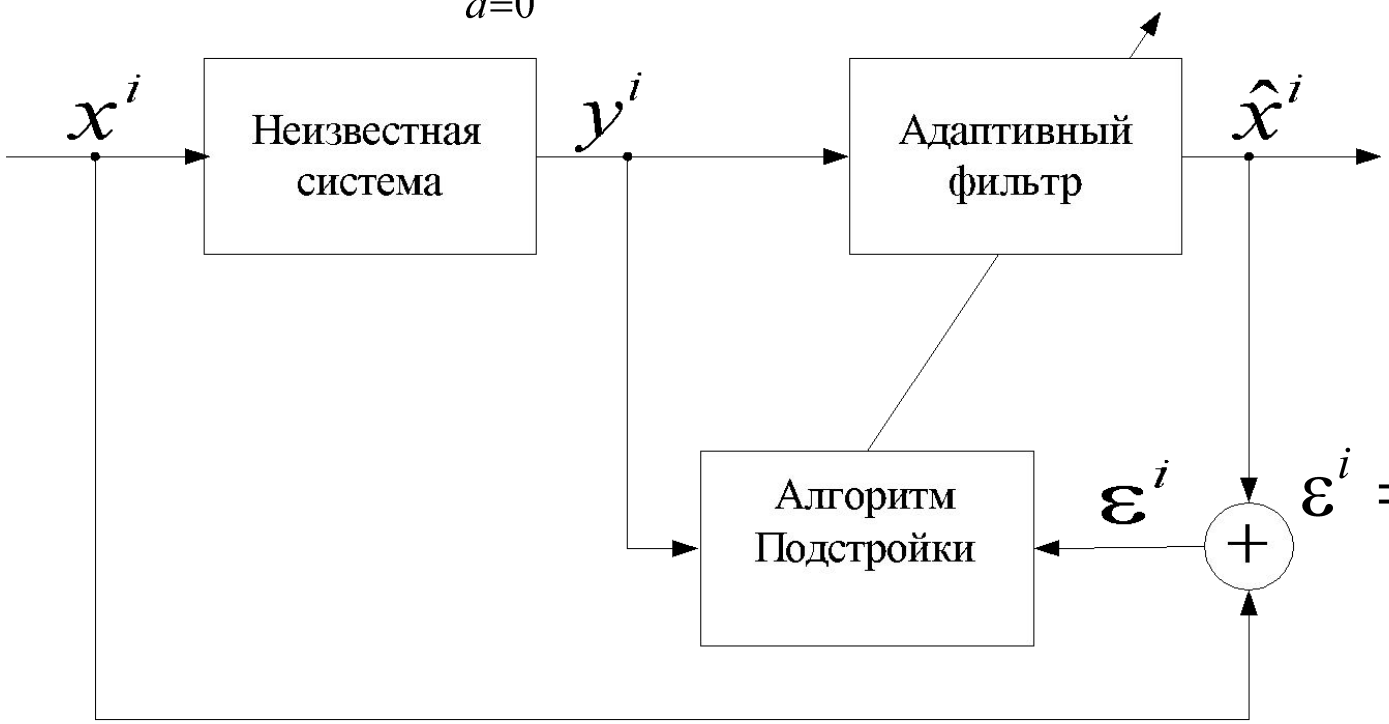
$$E\left[\varepsilon^i \mathbf{y}^i\right] = E\left[x^i \mathbf{y}^i\right] - E\left[\mathbf{y}^i (\mathbf{y}^i)^T\right] \mathbf{k}^i$$

Запоминающие устройства

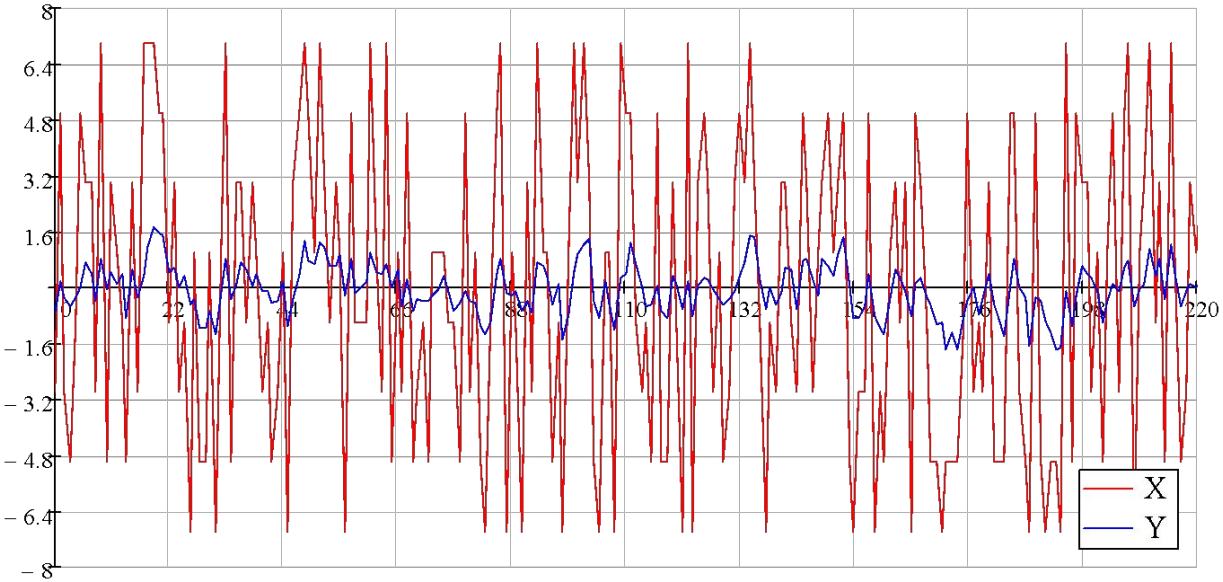


АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА

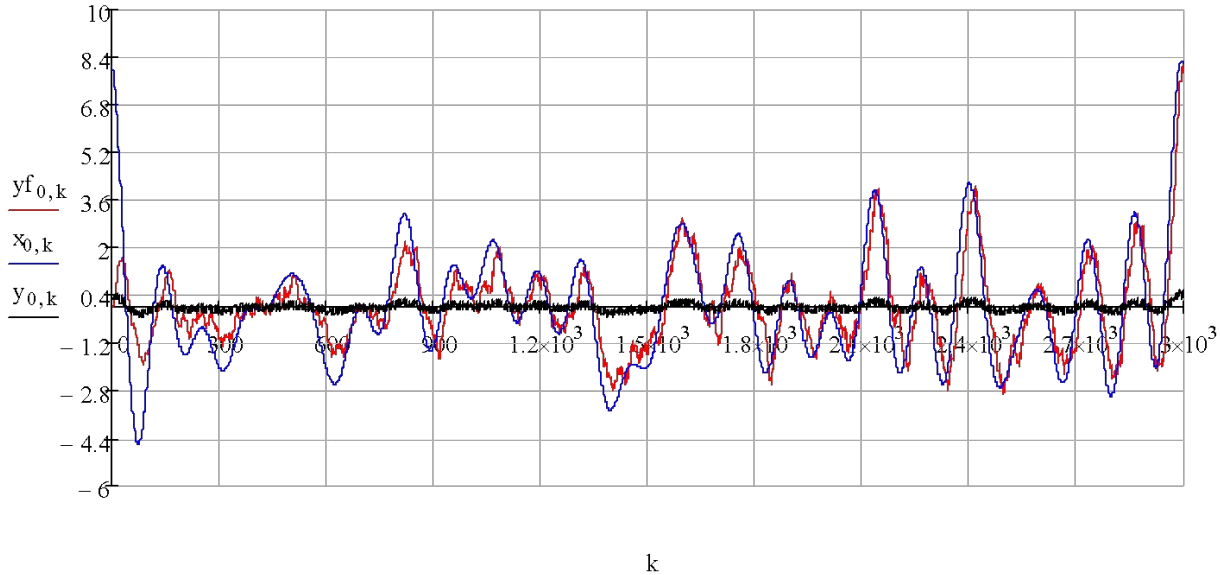
$$y^i = h^a \otimes x^i + n^i = \sum_{a=0}^{A-1} h^a x^{i-a} + n^i \qquad \hat{x}^i = k^m_{\text{а.ф.}} \otimes y^i = \sum_{m=0}^{M-1} k^m y^{i-m}$$



$$\varepsilon^i = x^i - \hat{x}^i$$

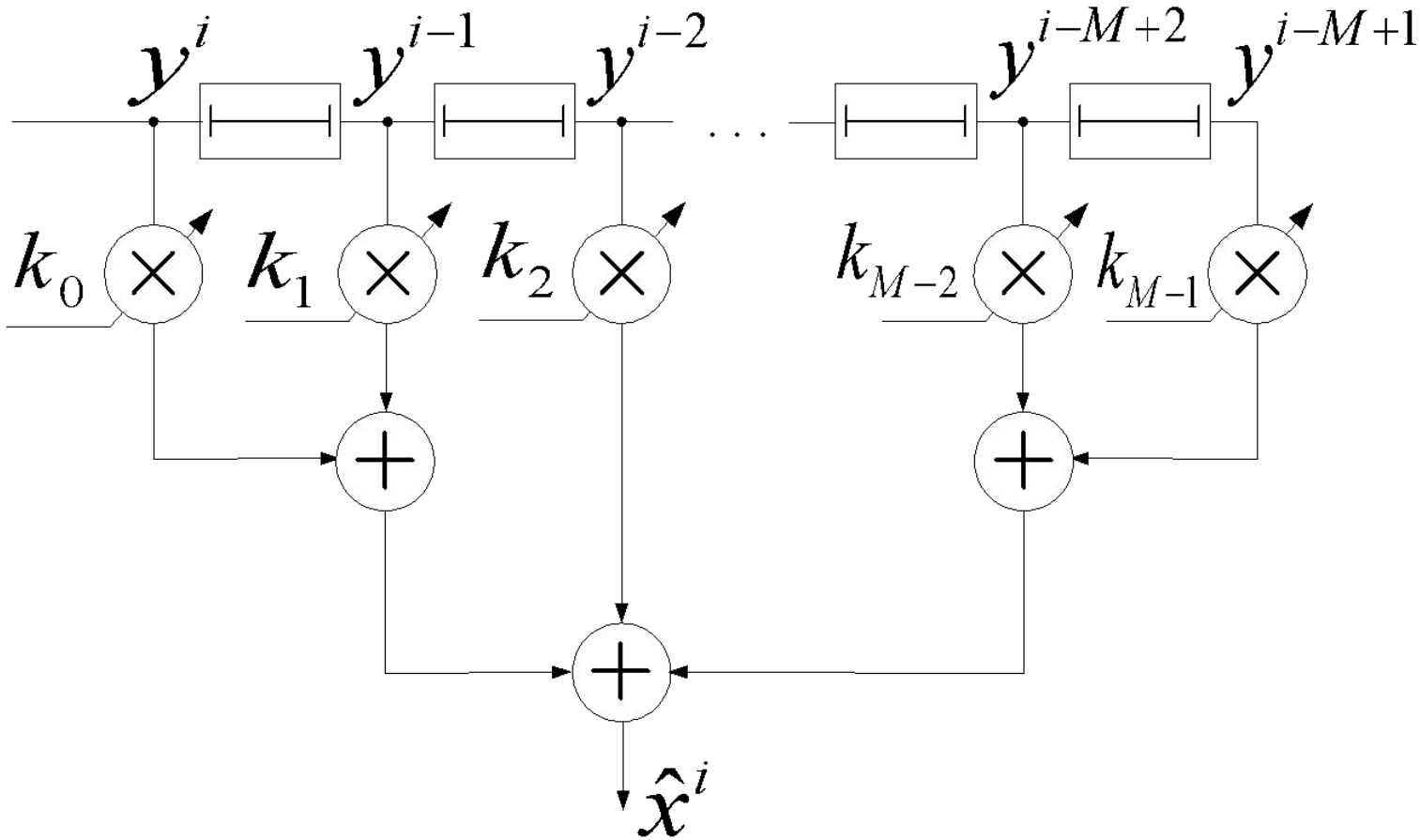


Сигнал на входе и выходе неизвестной системы



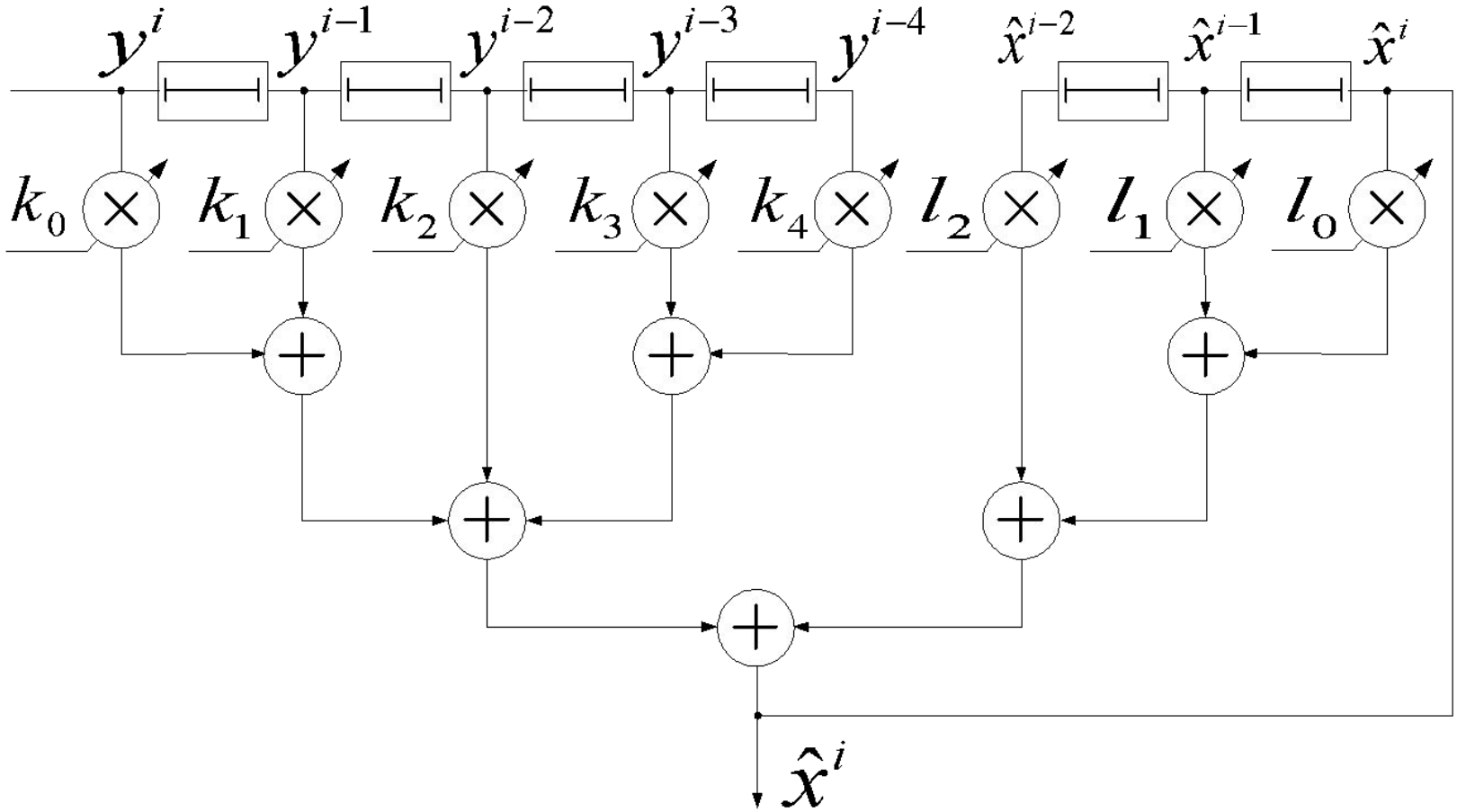
Сигнал на входе и выходе неизвестной системы, отфильтрованный сигнал

Адаптивный нерекурсивный фильтр



$$\hat{x}^i = \sum_{m=0}^{M-1} k^m y^{i-m} = \mathbf{k}\mathbf{y}^i$$

Адаптивный рекурсивный фильтр



$$\hat{x}^i = \sum_{m=0}^{M-1} k^m y^{i-m} - \sum_{n=0}^{N-1} l^n \hat{x}^{i-n} = \mathbf{k}\mathbf{y}^i - \mathbf{l}\hat{\mathbf{x}}^i$$

$$\varepsilon^i = x^i - \hat{x}^i = x^i - \sum_{m=0}^{M-1} k^m x^{i-m} = x^i - (\mathbf{k}^i)^T \mathbf{y}^i$$

$$\left(\varepsilon^i\right)^2 = \left(x^i\right)^2 + \left(\mathbf{k}^i\right)^T \mathbf{y}^i \left(\mathbf{y}^i\right)^T \mathbf{k}^i - 2x^i \left(\mathbf{y}^i\right)^T \mathbf{k}^i$$

$$E\left[\left(\varepsilon^i\right)^2\right] = E\left[\left(x^i\right)^2\right] + \left(\mathbf{k}^i\right)^T E\left[\mathbf{y}^i \left(\mathbf{y}^i\right)^T\right] \mathbf{k}^i - 2E\left[x^i \left(\mathbf{y}^i\right)^T\right] \mathbf{k}^i$$

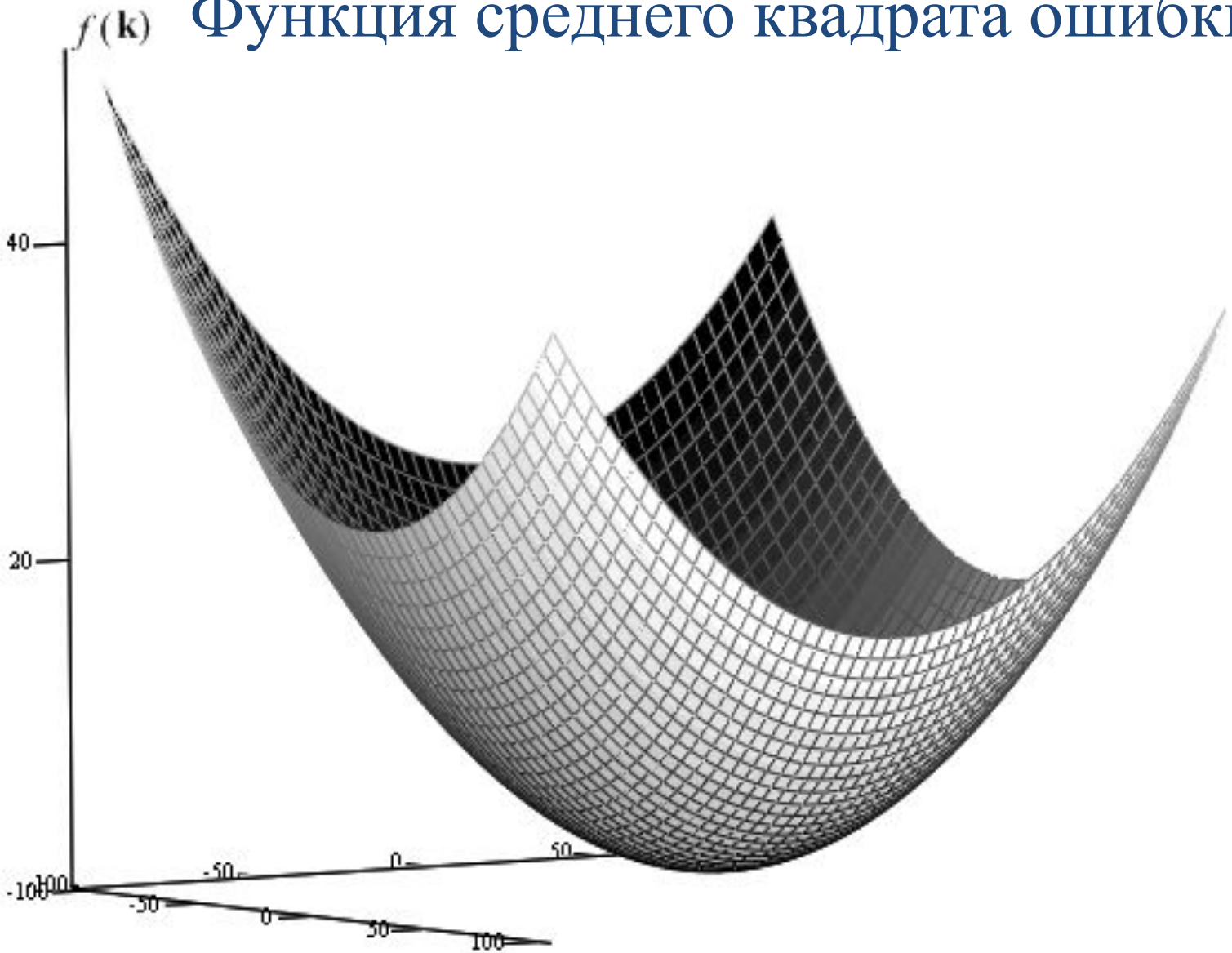
$$\xi = E\left[\left(\varepsilon^i\right)^2\right] = E\left[\left(x^i\right)^2\right] + \left(\mathbf{k}^i\right)^T \mathbf{R}\mathbf{k}^i - 2\mathbf{P}^T \mathbf{k}^i$$

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{k}^i} = 2\mathbf{R}\left(\mathbf{k}^i\right) - 2\mathbf{P} \qquad \nabla = 0 = 2\mathbf{R}\mathbf{k}^* - 2\mathbf{P}$$

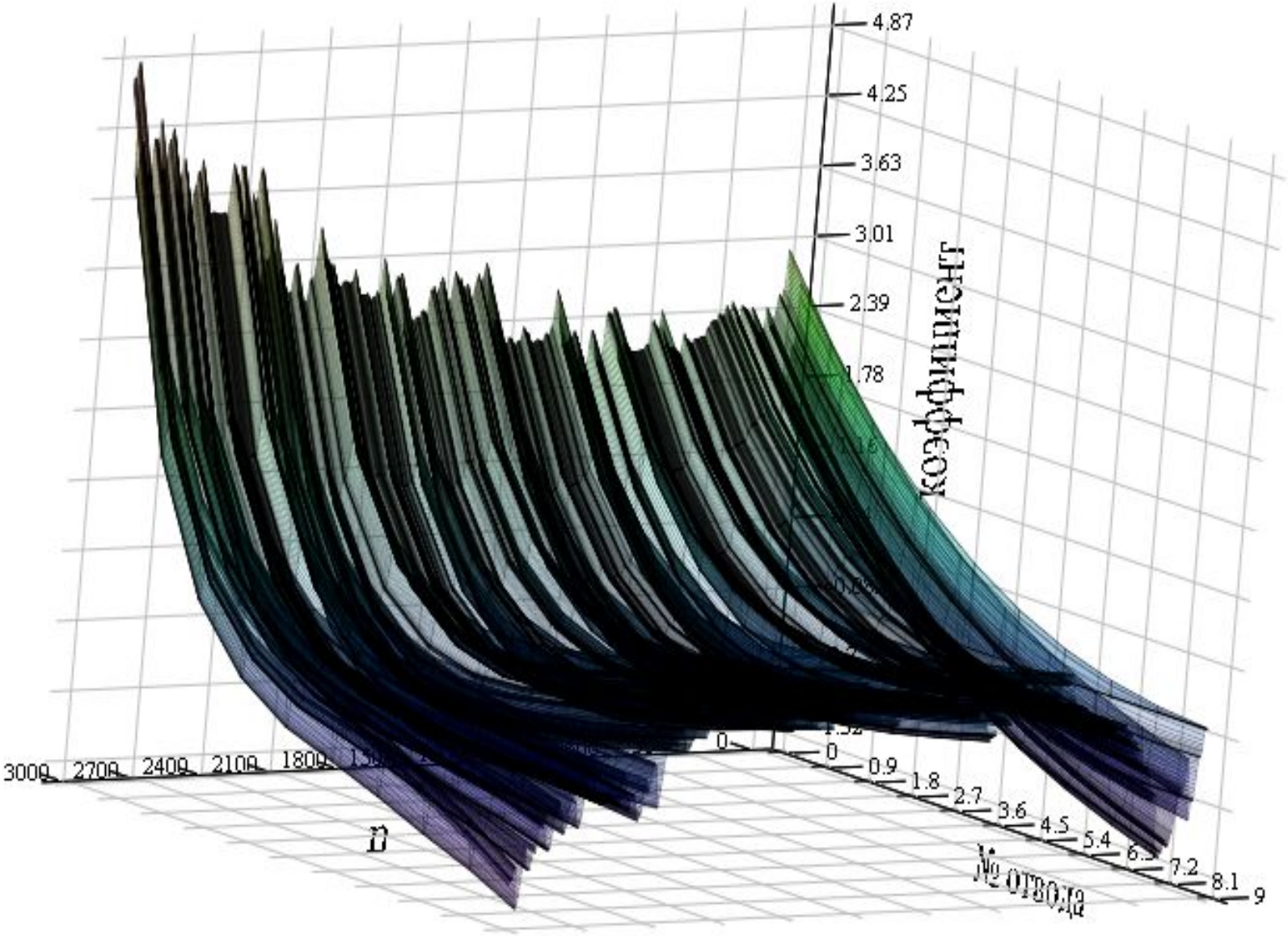
$$\mathbf{k}^* = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{P}$$

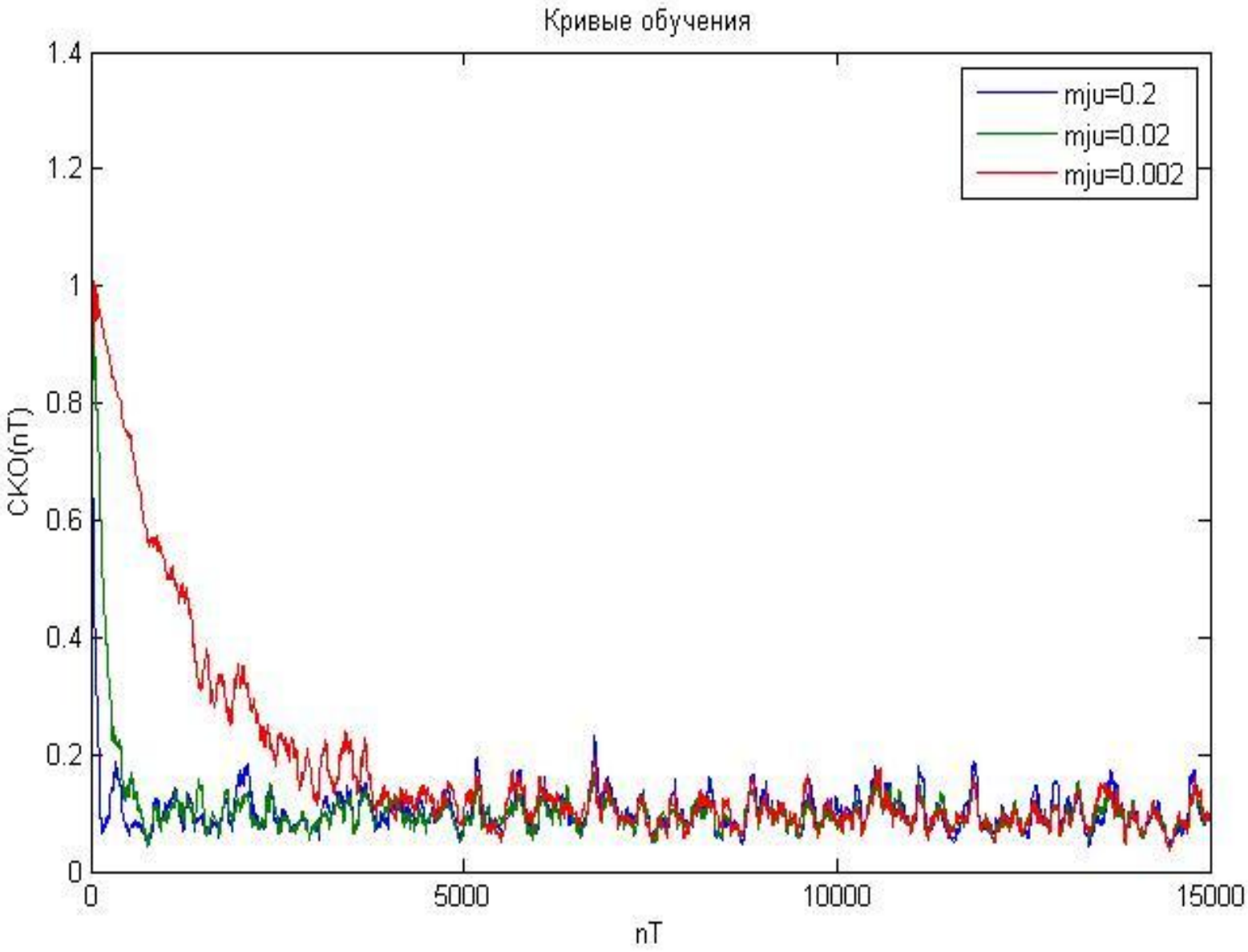
$$\xi_{\min} = E\left[\left(x^i\right)^2\right] - \mathbf{P}^T \mathbf{k}^*$$

Функция среднего квадрата ошибки



динамика подстройки вектора весовых коэффициентов




Кривые обучения
mju=0.2
mju=0.02
mju=0.002
СКО(nT)
nT
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
0
5000
10000
15000

Другое представление градиента

$$\xi = \xi_{\min} + (\mathbf{k}^i - \mathbf{k}^*)^T \mathbf{R} (\mathbf{k}^i - \mathbf{k}^*)$$

$$\xi = \xi_{\min} + (\mathbf{v}^i)^T \mathbf{R} \mathbf{v}^i$$

$$\nabla = \frac{\partial \xi}{\partial \mathbf{v}^i} = 2\mathbf{R}\mathbf{v}^i$$

Декорреляция сигнала ошибки и входного сигнала

$$\mathbf{k}^i = \mathbf{k}^*$$

$$\varepsilon^i = x^i - (\mathbf{k}^i)^T \mathbf{y}^i$$

$$\varepsilon^i \mathbf{y}^i = x^i \mathbf{y}^i - \mathbf{y}^i (\mathbf{y}^i)^T \mathbf{k}^i$$

$$E\left[\varepsilon^i \mathbf{y}^i\right] = E\left[x^i \mathbf{y}^i\right] - E\left[\mathbf{y}^i (\mathbf{y}^i)^T\right] \mathbf{k}^i$$

Поиск СКО

$$\xi = \xi_{\min} + \lambda(k - k*)^2 \quad \frac{\partial \xi}{\partial k} = 2\lambda(k - k*) \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial k^2} = 2\lambda$$

Простой алгоритм градиентного поиска

$$k^{i+1} = k^i + \mu(-\nabla^i) \qquad \nabla^i = \left.\frac{\partial \xi}{\partial k}\right|_{k=k^i} = 2\lambda(k^i - k^*)$$

$$k^{i+1} = k^i - 2\mu\lambda(k^i - k^*) = (1 - 2\mu\lambda)k^i + 2\mu\lambda k^*$$

$$k^i = k^i - 2\mu\lambda(k^i - k^*) = (1 - 2\mu\lambda)k^i + 2\mu\lambda k^*$$

$$k^i = (1 - 2\mu\lambda)^i k^0 + 2\mu\lambda k^* \frac{1 - (1 - 2\mu\lambda)^i}{1 - (1 - 2\mu\lambda)}$$

$$k^i = k^* + (1 - 2\mu\lambda)^i (k^0 - k^*)$$

Поиск СКО

$$\xi = \xi_{\min} + \lambda(k - k*)^2 \quad \frac{\partial \xi}{\partial k} = 2\lambda(k - k*) \quad \frac{\partial^2 \xi}{\partial k^2} = 2\lambda$$

Простой алгоритм градиентного поиска

$$k^{i+1} = k^i + \mu(-\nabla^i) \qquad \nabla^i = \left.\frac{\partial \xi}{\partial k}\right|_{k=k^i} = 2\lambda(k^i - k^*)$$

$$k^{i+1} = k^i - 2\mu\lambda(k^i - k^*) = (1 - 2\mu\lambda)k^i + 2\mu\lambda k^*$$

$$k^i = k^i - 2\mu\lambda(k^i - k^*) = (1 - 2\mu\lambda)k^i + 2\mu\lambda k^*$$

$$k^i = (1 - 2\mu\lambda)^i k^0 + 2\mu\lambda k^* \frac{1 - (1 - 2\mu\lambda)^i}{1 - (1 - 2\mu\lambda)}$$

$$k^i = k^* + (1 - 2\mu\lambda)^i (k^0 - k^*)$$