

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИнЭО

\_\_\_\_\_ С.И. Качин

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 г.

## **ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Конспект лекций

для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению

140203 «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем»

*Составитель С.В. Свечкарев*

Издательство

Томского политехнического университета

2015

## Содержание

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>1. Функциональные характеристики .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Пассивные элементы электрической цепи .....</b>	<b>12</b>
<b>3. Линейные измерительные преобразователи .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1. Измерительные трансформаторы тока (ИТТ) .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2. Измерительные трансформаторы напряжения (ИТН) .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3. Реакторы .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4. Трансреакторы .....</b>	<b>23</b>
<b>3.5. Магнитные усилители .....</b>	<b>24</b>
<b>3.6. Насыщающиеся трансформаторы тока .....</b>	<b>26</b>
<b>3.7. Фазоповоротные схемы .....</b>	<b>27</b>
<b>4. Полупроводниковые элементы .....</b>	<b>29</b>
<b>4.1. Двухполупериодный выпрямитель напряжения .....</b>	<b>31</b>
<b>4.2. Трехфазные двухполупериодные схемы выпрямления .....</b>	<b>31</b>
<b>4.3. Стабилитрон .....</b>	<b>31</b>
<b>4.4. Биполярные транзисторы .....</b>	<b>32</b>
<b>4.5. Полевые транзисторы .....</b>	<b>33</b>
<b>4.6. Комплементарные транзисторы .....</b>	<b>34</b>
<b>4.7. Тиристоры .....</b>	<b>35</b>
<b>4.8. Симисторы .....</b>	<b>36</b>
<b>5. Операционные усилители .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1. Инвертирующий усилитель .....</b>	<b>43</b>
<b>5.2. Не инвертирующий усилитель .....</b>	<b>44</b>
<b>5.3. Повторитель напряжения .....</b>	<b>44</b>
<b>5.4. Дифференциальный усилитель .....</b>	<b>44</b>
<b>5.5. Инвертирующий сумматор .....</b>	<b>45</b>
<b>5.6. Не инвертирующий сумматор .....</b>	<b>45</b>
<b>5.7. Интегратор .....</b>	<b>45</b>
<b>5.8. Схема дифференцирования на ОУ .....</b>	<b>46</b>

<b>5.9.</b>	<b>Логарифматор на ОУ .....</b>	<b>47</b>
<b>5.10.</b>	<b>Схема потенцирования на ОУ (антилогарифмирования) .....</b>	<b>47</b>
<b>5.11.</b>	<b>Схема умножения .....</b>	<b>48</b>
<b>5.12.</b>	<b>Схемы выделения модуля сигнала .....</b>	<b>49</b>
<b>5.13.</b>	<b>Усилитель – ограничитель .....</b>	<b>50</b>
<b>5.14.</b>	<b>Компаратор .....</b>	<b>50</b>
<b>6.</b>	<b>Активные фильтры .....</b>	<b>53</b>
<b>6.1.</b>	<b>Схема фильтра низких частот .....</b>	<b>54</b>
<b>6.2.</b>	<b>Фильтры высоких частот .....</b>	<b>56</b>
<b>6.3.</b>	<b>Полосовые фильтры .....</b>	<b>57</b>
<b>7.</b>	<b>Логические интегральные схемы .....</b>	<b>59</b>
<b>7.1.</b>	<b>КР1554ЛН1 – 6 логических элементов НЕ .....</b>	<b>60</b>
<b>7.2.</b>	<b>КР1554ЛА3 – 4 логических элементов 2И-НЕ .....</b>	<b>62</b>
<b>7.3.</b>	<b>КР1554ЛА1 – 2 логических элементов 4И-НЕ .....</b>	<b>63</b>
<b>7.4.</b>	<b>КР1554ЛЕ1 – 4 х 2ИЛИ-НЕ .....</b>	<b>63</b>
<b>7.5.</b>	<b>КР1554ЛП5 – 4 х Исключающее ИЛИ .....</b>	<b>63</b>
<b>7.6.</b>	<b>КР1554АТВ9 – 2 х JK-триггера .....</b>	<b>64</b>
<b>7.7.</b>	<b>КР1554ТМ2 – 2 х D-триггера .....</b>	<b>65</b>
<b>7.8.</b>	<b>КР1554ИР22 – 8-ми разрядный регистр .....</b>	<b>66</b>
<b>7.9.</b>	<b>КР1554ИР51 – последовательно-параллельный регистр .....</b>	<b>67</b>
<b>7.10.</b>	<b>КР1554КП2 – 2 х 4-х входовых селектора-мультиплексора ...</b>	<b>68</b>
<b>7.11.</b>	<b>КР1554ИД14 – 2 дешифратора с инверсными выходами .....</b>	<b>69</b>
<b>7.12.</b>	<b>КР1554АП20 – 8-ми разрядный приемопередатчик .....</b>	<b>69</b>
<b>7.13.</b>	<b>КР1554ИЕ6 – реверсивный двоично-десятичный счетчик ....</b>	<b>70</b>
<b>7.14.</b>	<b>КР1554ИЕ7 – реверсивный двоичный счетчик .....</b>	<b>72</b>
<b>8.</b>	<b>Микроконтроллеры АТ91САМ7 .....</b>	<b>75</b>

## Основные разделы дисциплины

1. Виды элементов автоматических устройств, их свойства и характеристики.
2. Операционные усилители и схемы на их основе.
3. Вторичные измерительные преобразователи.
4. Фильтры.
5. Микропроцессорные средства.

## Введение

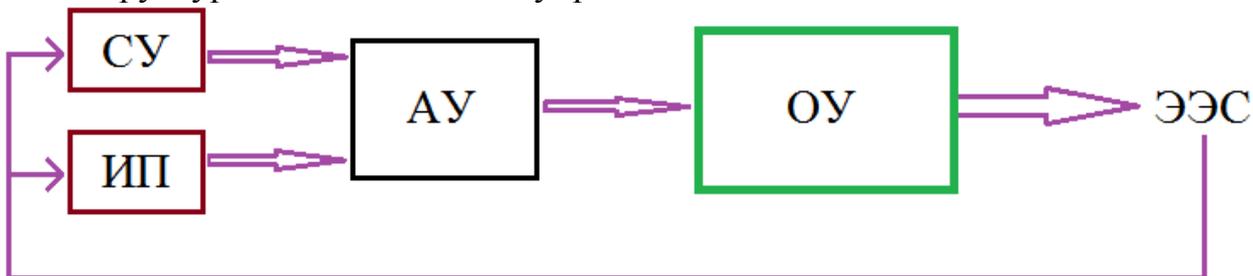
Современные ЭЭС являются одними из самых сложных систем, созданных человеком. Эта сложность обусловлена несколькими факторами:

- непрерывность и одновременность генерации, передачи и потребления.
- все процессы в объединенных энергосистемах взаимосвязаны.
- наличие большого числа параллельно работающих автоматических устройств.
- эксплуатация элементов и устройств различных поколений.

## Основные понятия

*Автоматическое управление.* Целенаправленное воздействие на управляемые объекты называется алгоритмом управления.

Структура автоматического управления:



где: ОУ – объект управления; АУ – автоматическое устройство управления; ИП – измерительные преобразователи; СУ – сторонние устройства.

## Виды элементов автоматических устройств:

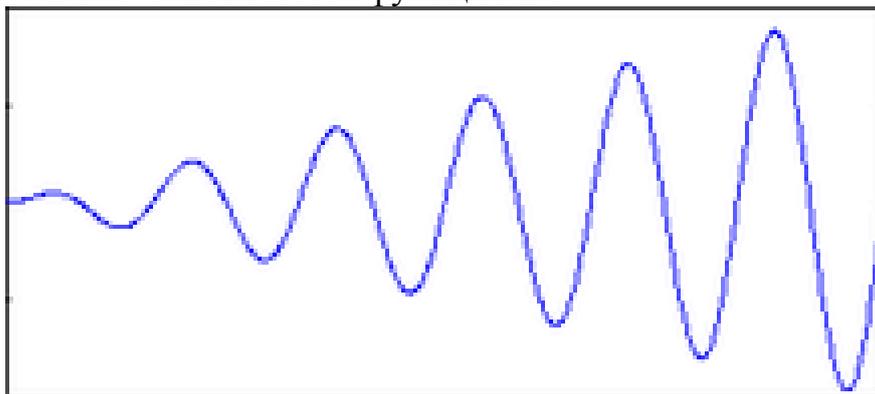
- Пассивные / активные
- Электромеханические
- Электромагнитные
- Индукционные
- Полупроводниковые
- Интегральные
- Цифровые
- Микропроцессорные

**По видам (типам) сигналов выделяются следующие:**

- аналоговый;
- дискретный;
- цифровой.

### **Аналоговый сигнал**

Аналоговый сигнал является непрерывным. Его можно зафиксировать с помощью различных видов датчиков. Например, датчиками напряжения и тока или механическими датчиками (ускорение, скорость). Аналоговые сигналы в математике описываются функциями.



### **Дискретный сигнал**

Содержит в себе только два состояния: 0 и 1. Характеризует состояния объектов управления, например: включено / отключено, есть / нет, и др.

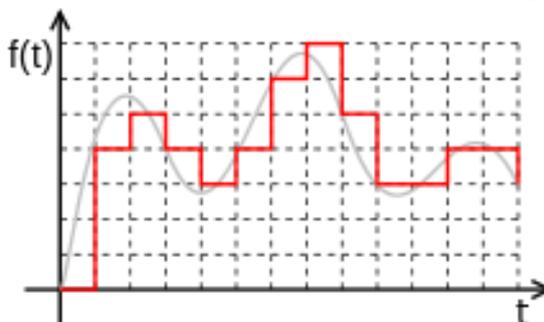
### **Цифровой сигнал**

Цифровые сигналы являются искусственными, т.е. их можно получить только путем преобразования из аналогового электрического сигнала.

Процесс последовательного преобразования непрерывного аналогового сигнала называется дискретизацией. Дискретизация бывает двух видов:

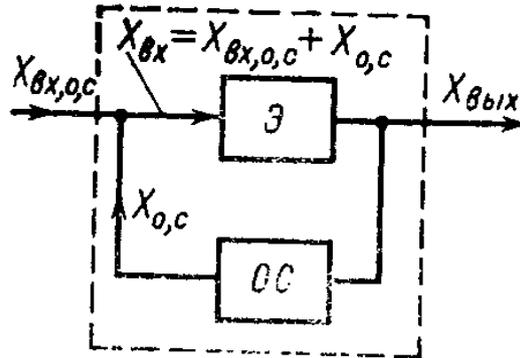
- по времени;
- по амплитуде.

Дискретизация по времени обычно называется операцией выборки. А дискретизация по амплитуде сигнала - квантованием по уровню.



## Обратная связь

Обратные связи (ОС) бывают двух видов: положительная и отрицательная.



Отрицательная ОС:  $X_{вых} = X_{вх} - X_{ос}$

Положительная ОС:  $X_{вых} = X_{вх} + X_{ос}$

### 1. Функциональные характеристики

- Дифференциальное уравнение общего вида:

$$X_{вых} = f(X_{вх}, t)$$

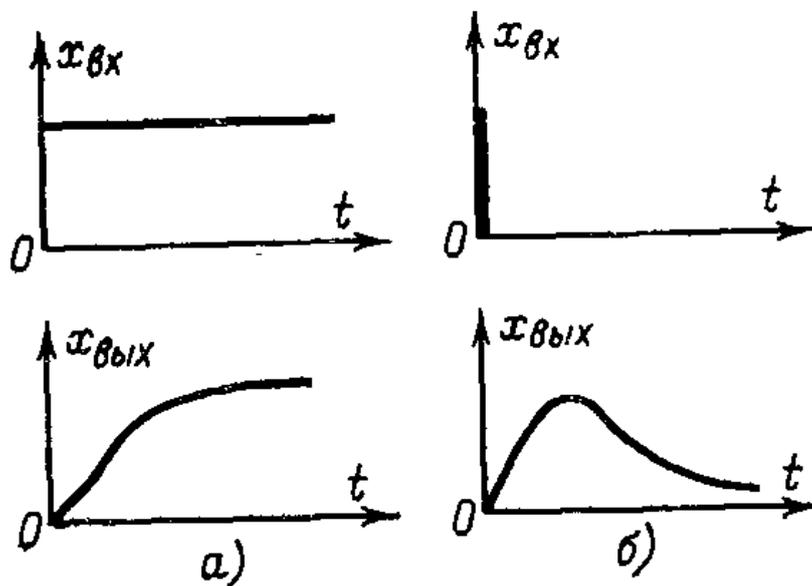
- Решение дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами:

$$X(t) = X_{св}(t) + X_{пр}(t),$$

где:  $X_{св}(t)$  – свободная составляющая процессов, обусловленная только внутренними свойствами объектов управления;

$X_{пр}(t)$  – принужденная составляющая – характеризует влияние на выходной сигнал от входного воздействия.

К функциональным характеристикам относятся также переходная (а) и импульсная (б) характеристики.



Переходная характеристика показывает изменение выходного сигнала от однократного изменения входного. При установившихся значениях однозначно характеризует принужденную составляющую процесса.

Импульсная характеристика – показывает изменение во времени выходного сигнала от импульсного изменения входного. Характеризует свободную составляющую процесса.

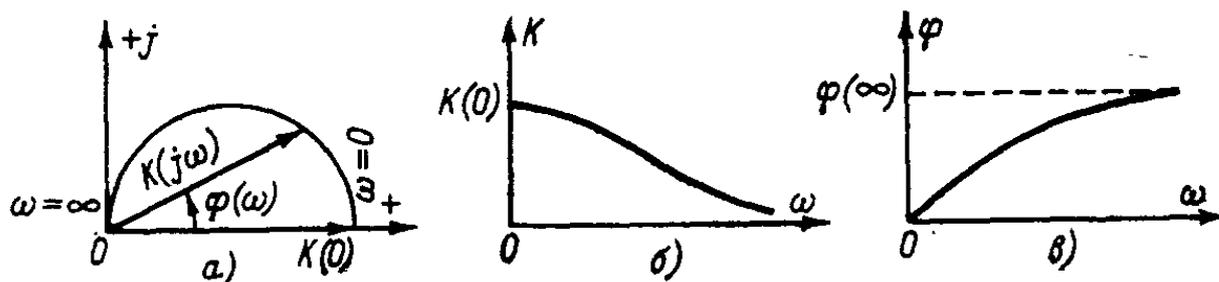
### Передаточная функция

Преобразование Лапласа импульсной характеристики:

$$W(p) = \frac{X_{\text{ВЫХ}}(p)}{X_{\text{ВХ}}(p)}$$

### Комплексная частотная характеристика

- а) амплитудно-фазная (АФХ);
- б) амплитудно-частотная (АЧХ);
- в) фазо-частотная (ФЧХ).



### Логарифмические характеристики

G - усиление или ослабление сигнала, P1 и P2 - мощность сигнала. Так как мощность в цепи определяется величиной напряжения или тока, возведенной в квадрат, логарифм отношения этих величин должен быть умножен на 20 (а не на 10):

$$G[\text{дБ}] = 10 \log \frac{P_1}{P_2}; \quad G[\text{дБ}] = 20 \log \frac{U_1}{U_2};$$

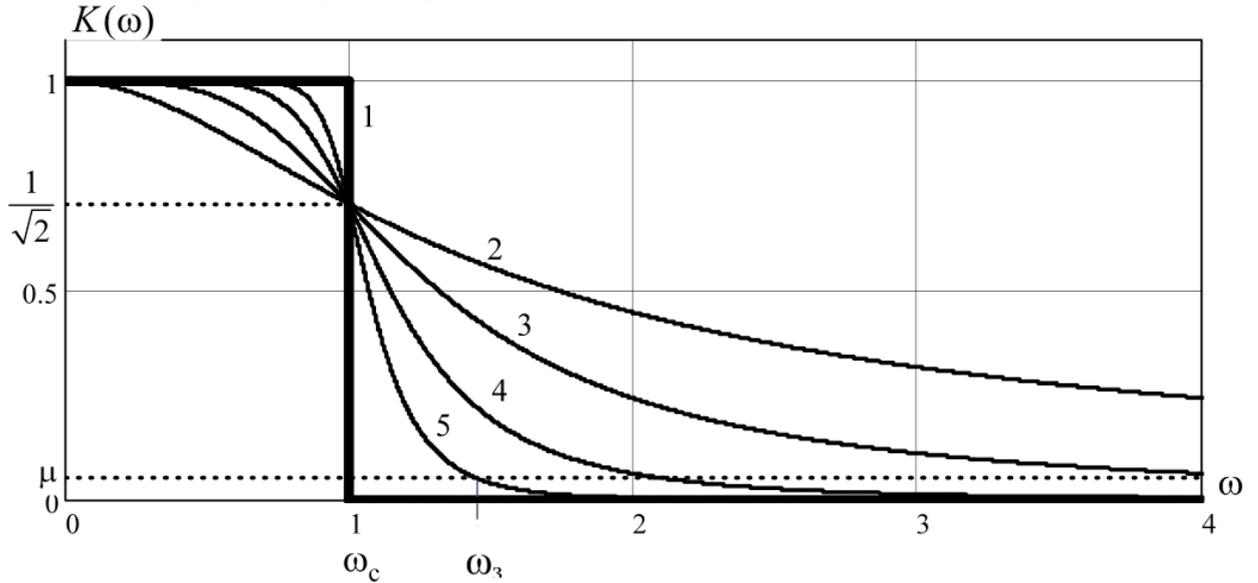
Чтобы избежать недоразумений, необходимо понимать, что независимо от того, имеем ли мы дело с напряжением, током или мощностью, отношение 6 дБ всегда есть 6 дБ для любого из этих параметров. Однако если это мощность, то отношение 6 дБ означает уменьшение или увеличение почти в 4 раза, если напряжение или ток - почти в 2 раза. Пользуясь следующей таблицей, можно с некоторым приближением переводить значения уровней децибел в числовые значения и наоборот.

Например, для мощности  $22 \text{ дБ} = 20 \text{ дБ} + 2 \text{ дБ} = 100 * 1,585 = 158,5 \text{ раз}$ .

Таблица 1. Децибелы и отношения мощностей, токов и напряжений.

дБ	Отношение тока или напряжения	Отношение мощности	дБ	Отношение тока или напряжения	Отношение мощности
0	1,000	1,000	0	1,000	1,000
-0,1	0,989	0,977	0,1	1,012	1,023
-0,2	0,977	0,955	0,2	1,023	1,047
-0,3	0,966	0,933	0,3	1,035	1,072
-0,4	0,955	0,912	0,4	1,047	1,096
-0,5	0,944	0,891	0,5	1,059	1,122
-0,6	0,933	0,871	0,6	1,072	1,148
-0,8	0,912	0,832	0,8	1,096	1,202
-1,0	0,891	0,794	1,0	1,122	1,259
-1,5	0,841	0,708	1,5	1,189	1,413
-2,0	0,794	0,631	2,0	1,259	1,585
-2,5	0,750	0,562	2,5	1,334	1,778
-3,0	0,708	0,501	3,0	1,413	1,995
-3,5	0,668	0,447	3,5	1,496	2,239
-4,0	0,631	0,398	4,0	1,585	2,512
-4,5	0,596	0,355	4,5	1,679	2,818
-5,0	0,562	0,316	5,0	1,778	3,162
-6,0	0,501	0,251	6,0	1,995	3,981
-7,0	0,447	0,200	7,0	2,239	5,012
-8,0	0,398	0,159	8,0	2,512	6,310
-9,0	0,355	0,126	9,0	2,818	7,943
-10	0,316	0,100	10	3,162	10,000
-11	0,282	0,0794	11	3,55	12,6
-12	0,251	0,0631	12	3,98	15,9
-13	0,224	0,0501	13	4,47	20,0
-14	0,200	0,0398	14	5,01	25,1
-15	0,178	0,0316	15	5,62	31,6
-16	0,159	0,0251	16	6,31	39,8
-18	0,126	0,0159	18	7,94	63,1
-20	0,100	0,0100	20	10,0	100,0
-30	0,0316	0,001	30	31,6	1000,0
-40	0,01	0,0001	40	100,0	10 <sup>4</sup>
-50	0,00316	0,00001	50	316,0	10 <sup>5</sup>
-60	0,001	0,000001	60	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>
-70	0,000316	0,0000001	70	3160,0	10 <sup>7</sup>
-80	0,0001	0,00000001	80	10 <sup>4</sup>	10 <sup>8</sup>
-90	0,0000316	0,000000001	90	3,16*10 <sup>4</sup>	10 <sup>9</sup>
-100	0,00001	0,0000000001	100	10 <sup>5</sup>	10 <sup>10</sup>

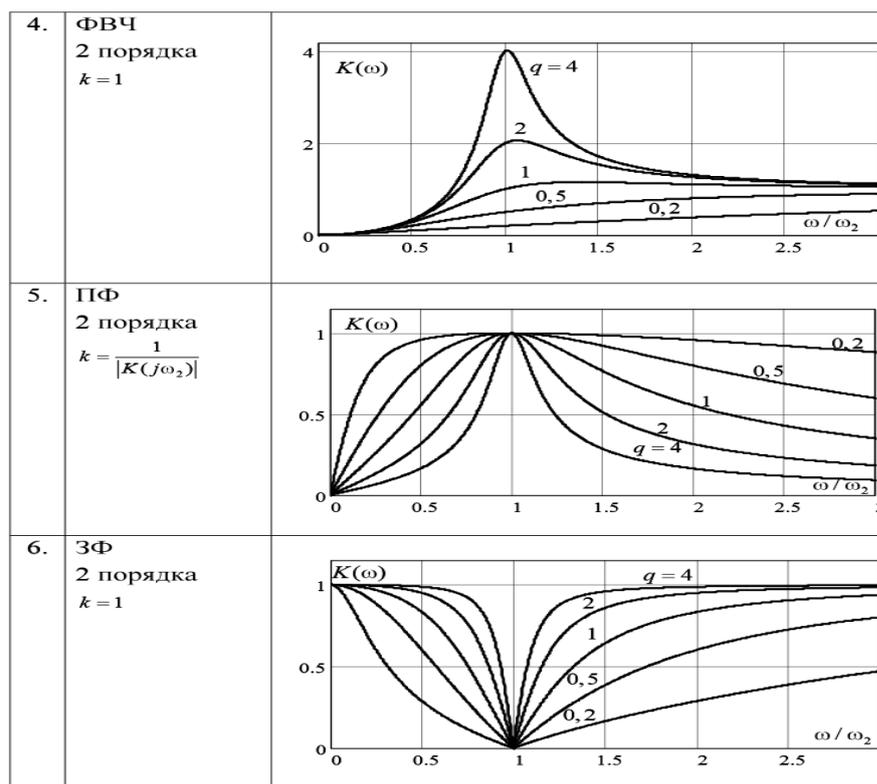
### Пример АЧХ фильтров нижних частот (ФНЧ)



где:  $\omega_c$  – частота среза; 1 – характеристика идеального ФНЧ; 2 – ФНЧ первого порядка (дифференциального); 3 – второго; 4 – третьего; 5 – четвертого порядка.

Примеры АЧХ фильтров низкой частоты, высокой частоты (ФВЧ), фазового фильтра (ФФ), полосового фильтра (ПФ), заградительного фильтра (ЗФ).

№	Наименование	Амплитудно-частотная характеристика
1.	ФНЧ, ФВЧ 1 порядка $k=1$	
2.	ФФ 1 порядка, ФФ 2 порядка $k=1$	
3.	ФНЧ 2 порядка $k=1$	



### Частотные характеристики

Зависимость от частоты модуля коэффициента передачи напряжения называется *амплитудно-частотной характеристикой*.

$$K = \frac{U_2}{U_1} = \frac{|U_2|(\omega)}{|U_1|(\omega)}$$

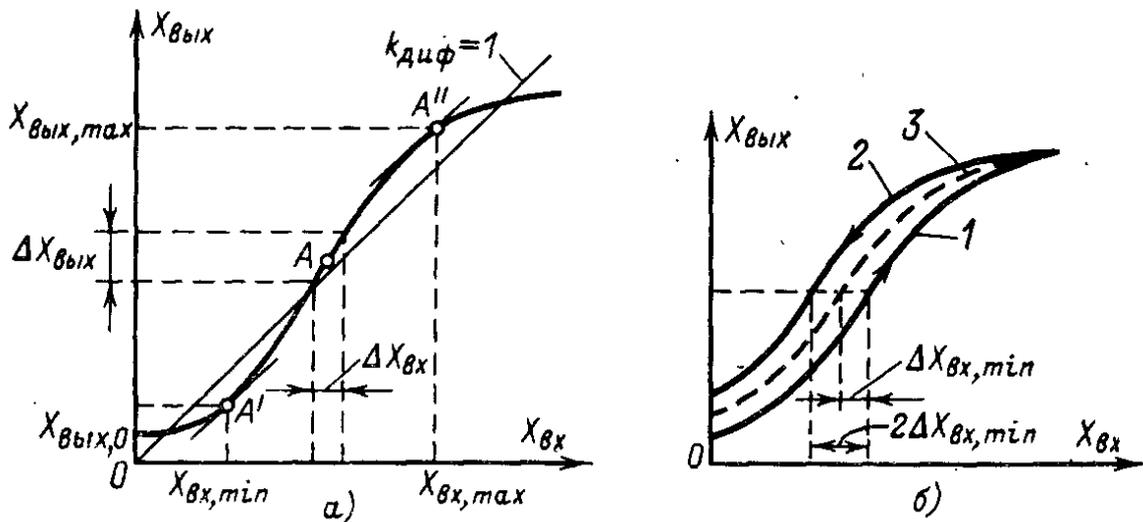
Зависимость фазового сдвига между напряжениями на выходе и входе при изменении частоты называется *фазочастотной характеристикой*.

$$K = \frac{|U_2| \exp j\varphi_2}{|U_1| \exp j\varphi_1} = |K| e^{j\varphi}$$

### Проходная характеристика

Зависимость в установившемся режиме:  $X_{\text{вых}} = f(X_{\text{вх}})$ .

Характеризует зависимость выходного сигнала от направления изменения, т.е. от увеличения или уменьшения входного сигнала.



а) при возрастании; б) при возрастании и убывании

*Непрерывная проходная характеристика:*

- Дифференциальный коэффициент преобразования

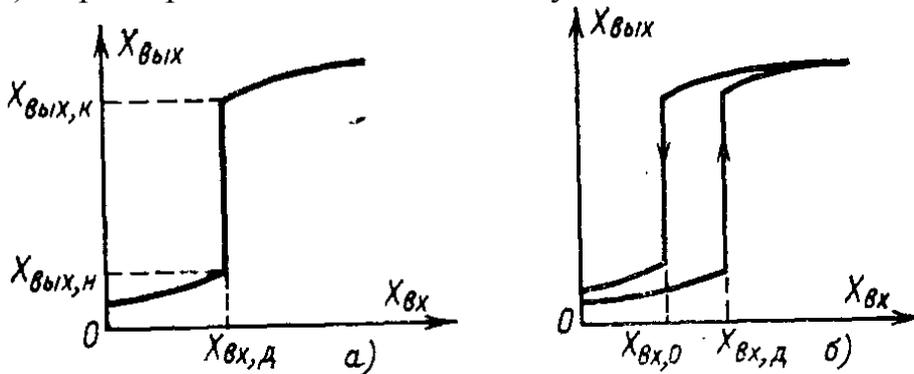
$$k_{\text{диф}} = \lim \frac{\Delta X_{\text{ВЫХ}}}{\Delta X_{\text{ВХ}}} = \frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dX_{\text{ВХ}}}$$

- Статистический коэффициент преобразования

$$k_{\text{СТ}} = \frac{X_{\text{ВЫХ max}} - X_{\text{ВЫХ min}}}{X_{\text{ВЫХ max}}}$$

*Релейная проходная характеристика:*

- а) Характеристика, имеющая разрыв или изменение знака производной.
- б) Характеристика имеет только 2 устойчивых состояния.



**Надежность элементов**

- Средняя наработка до отказа:

$$t_{\text{отк ср}} = \int_0^{\infty} t_{\text{отк}} P_{\text{отк}}(t) dt,$$

где:  $P_{\text{отк}}(t)$  – плотность вероятности.

## 2. Пассивные элементы электрической цепи

Резистор (сопротивление):

$$u = Ri$$

Конденсатор:

$$u = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int idt; \quad i = C \frac{du}{dt}$$

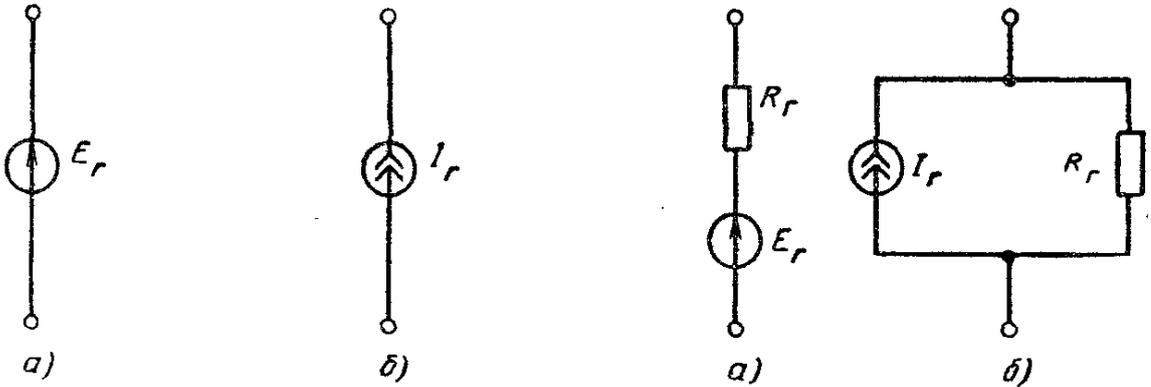
Индуктивность:

$$u = L \frac{di}{dt}; \quad i = \frac{1}{L} \int udt$$

Источники тока и напряжения:

Генератором ЭДС или напряжения называются источники постоянного или переменного напряжения с  $R_r=0$ ;

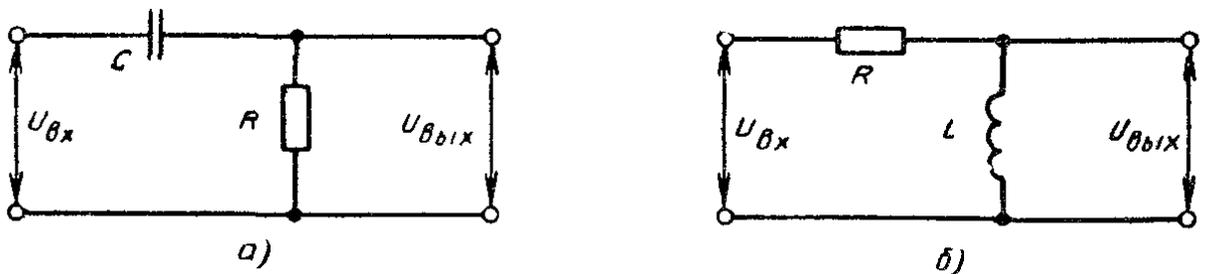
Генератором тока – источники постоянного или переменного тока с  $R_r=\infty$ .



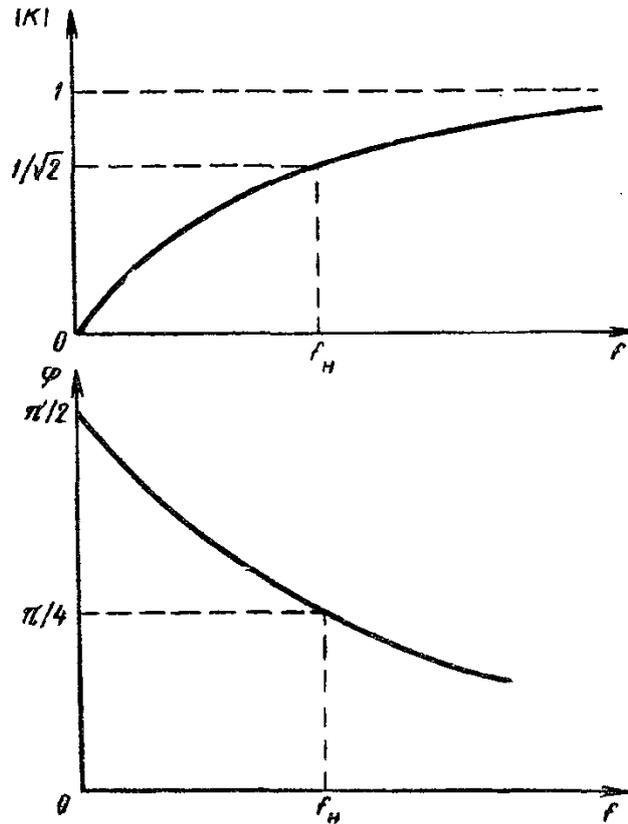
а) идеальный и реальный источники напряжения;

б) идеальный и реальный источники тока;

Дифференцирующие цепи:



## АЧХ и ФЧХ



$$H(f) = K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + 1/j\omega CR},$$

или

$$H(f) = K = 1 / (1 + \omega_n / j\omega) = 1 / (1 + f_n / jf),$$

где

$$\omega_n = 2\pi f_n = 1/RC.$$

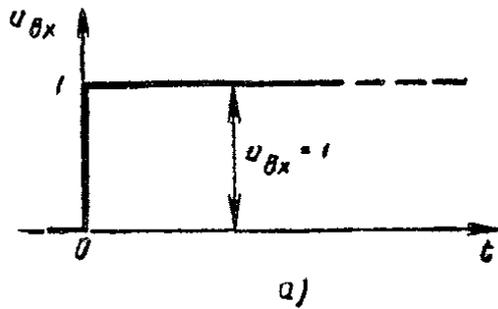
$$\omega_n = R/L.$$

$$H(f) = K = \frac{1 + j(f_n/f)}{1 + (f_n/f)^2},$$

откуда

$$\operatorname{tg} \varphi = f_n/f, \quad \varphi = \operatorname{arctg}(f_n/f).$$

Переходная характеристика:

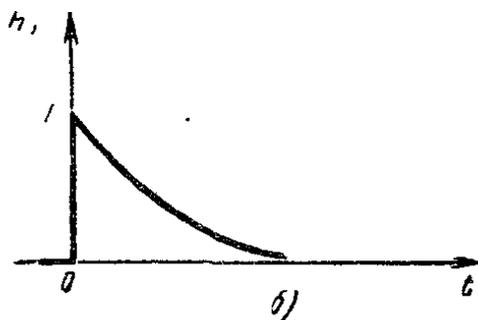


$$h_1(t) = \exp(-t/T) \text{ при } t \geq 0,$$

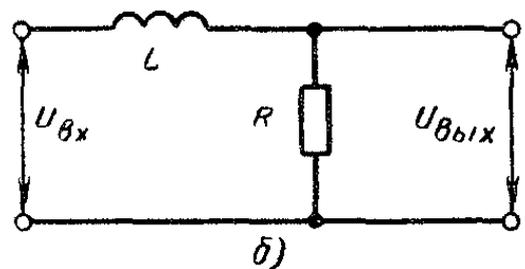
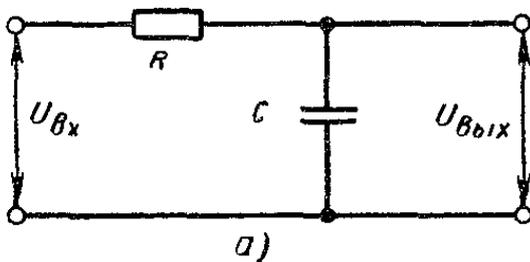
$$T = RC,$$

$$T = L/R.$$

$$T = 1/\omega_n.$$



### Интегрирующие цепи



$$H(f) = K = U_{\theta_{\text{вых}}}/U_{\theta x} = 1/(1 + j\omega RC),$$

откуда

$$H(f) = K = U_{\theta_{\text{вых}}}/U_{\theta x} = 1/(1 + j\omega/\omega_e),$$

или

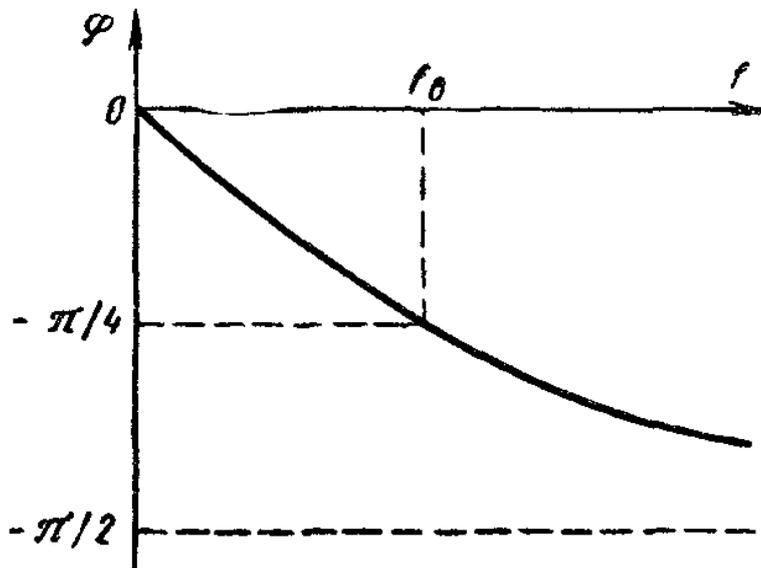
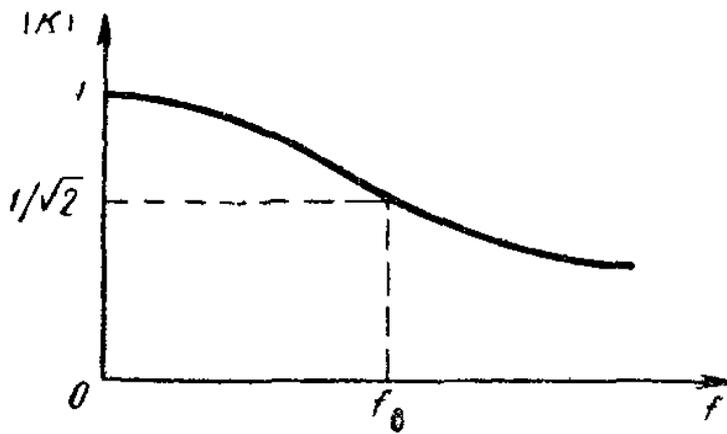
$$H(f) = K = 1/(1 + jf/f_e),$$

где

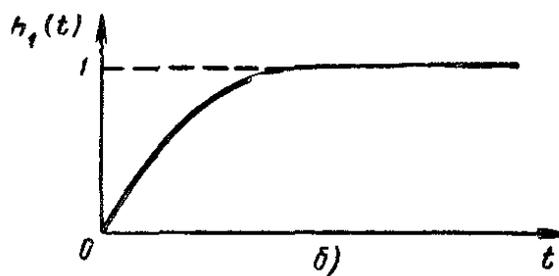
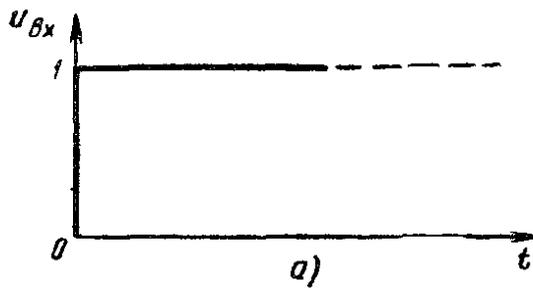
$$\omega_e = 2\pi f_e = 1/RC.$$

$$\omega_e = R/L.$$

АЧХ и ФЧХ.



Переходная характеристика



$$h_1(t) = 1 - \exp(-t/T),$$

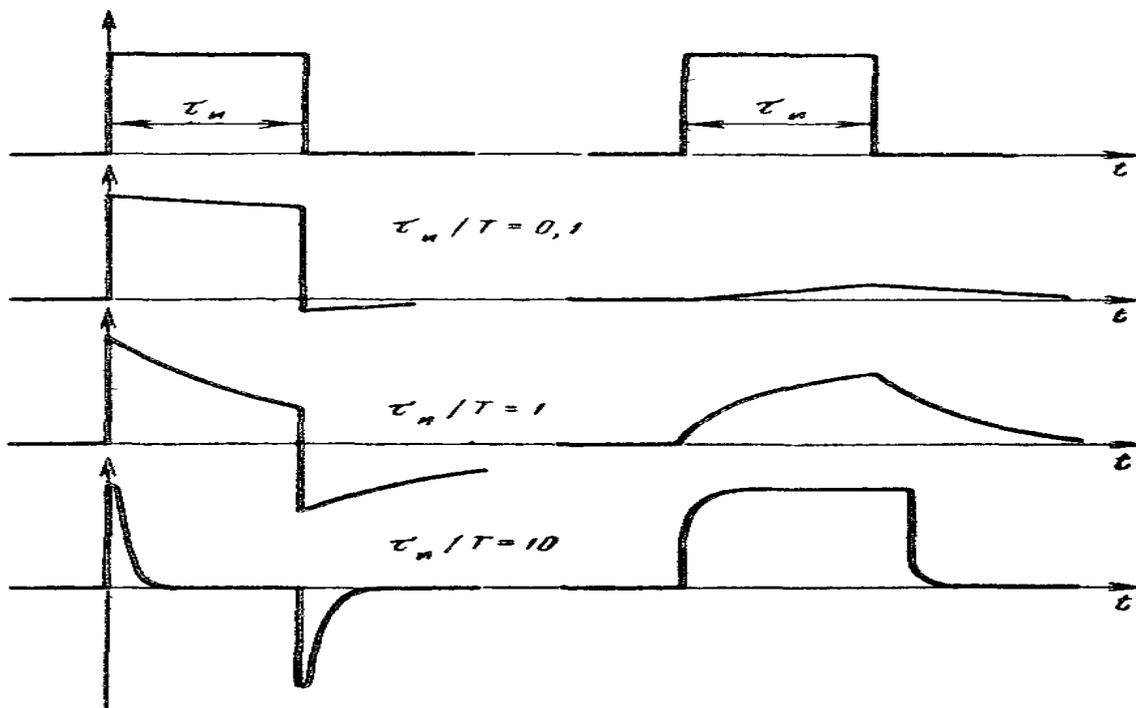
где

$$T = 1/\omega_s = RC,$$

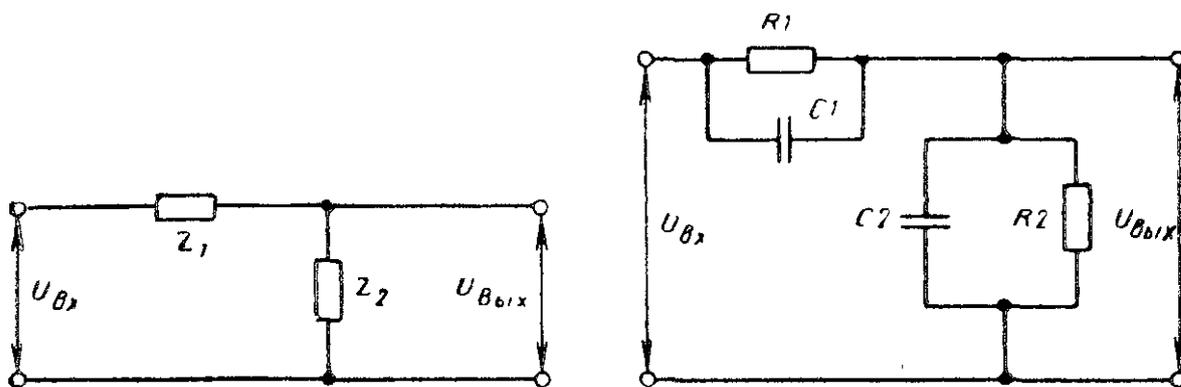
или

$$T = L/R,$$

Импульсы на выходе дифференцирующей и интегрирующей цепей при воздействии прямоугольных импульсов.



### Неискажающие делители напряжения



$$Z_2 = kZ_1,$$

$$K = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{kZ_1}{Z_1 + kZ_1} = \frac{k}{1+k} = \text{const.}$$

### Колебательный контур

Резонансная частота  $f_0$  – частота при которой реактивная составляющая сопротивления колебательного контура равна 0.

$$Z = r + j(\omega L - 1/\omega C)$$

$$\omega_0 L - 1/\omega_0 C = 0 \text{ или } \omega_0 L = 1/\omega_0 C.$$

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC},$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0.$$

- Характеристическое сопротивление  $\rho$  – сопротивление индуктивности или емкости на резонансной частоте.

$$\rho = \omega_0 L,$$

или

$$\rho = 1/\omega_0 C.$$

$$\rho = \sqrt{L/C}.$$

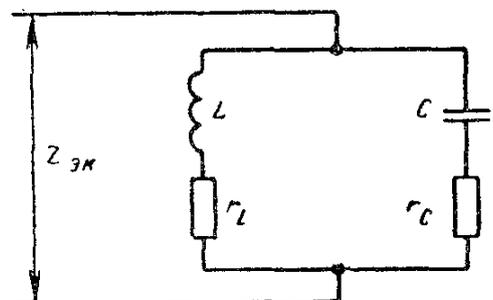
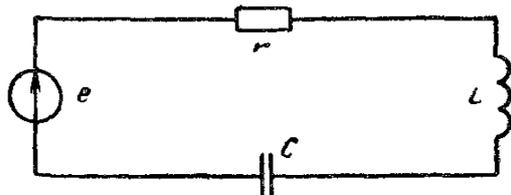
- Добротность контура – отношение напряжения на индуктивности или емкости к напряжению на активном сопротивлении при резонансной частоте.

$$Q = U_L/E = U_C/E = \rho I/rI = \rho/r.$$

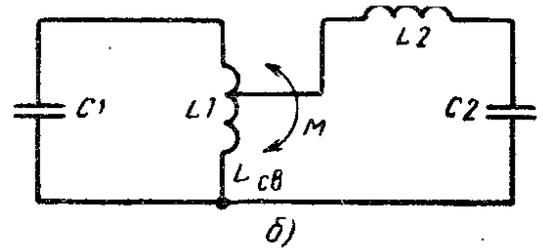
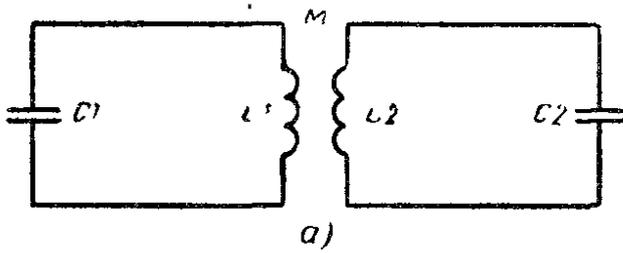
- Величина обратная добротности называется затуханием контура.

$$\delta = 1/Q.$$

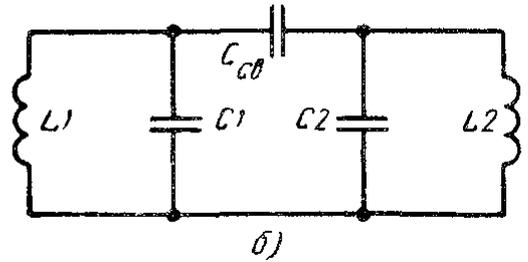
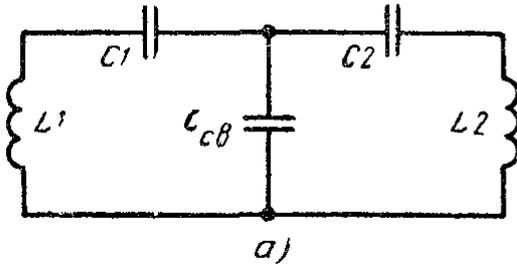
Последовательный и параллельный колебательные контура:



Индуктивно связанные контура:



• Контур с емкостной связью:



Обобщенная эквивалентная схема:

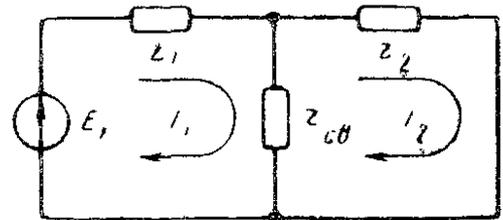
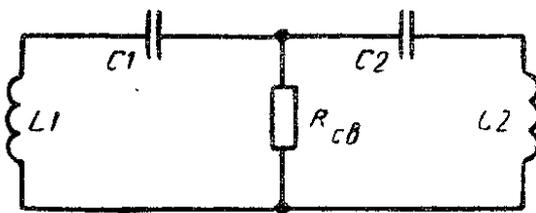
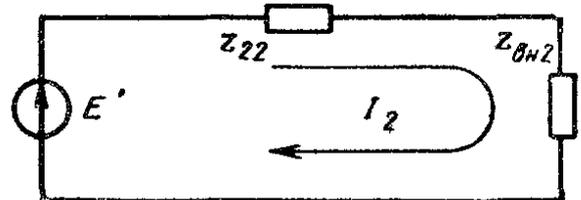
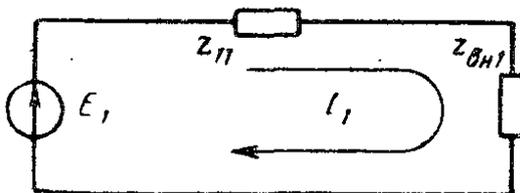


Схема замещения 1 и 2 контуров:



Расчет комплексного значения токов:

$$I_1 = \frac{E_1}{z_{11} + (z_{cb}z_2)/(z_{cb} + z_2)}$$

Введя обозначения  $z_{11} = z_1 + z_{cb}$ ,  $z_{22} = z_2 + z_{cb}$ , получим

$$I_1 = \frac{E_1}{z_{11} + z_{cb}(z_{22} - z_{cb})/z_{22}} = \frac{E_1}{z_{11} + z_{cb} - z_{cb}^2/z_{22}}$$

или

$$I_1 = E_1 / (z_{11} + z_{bn1}),$$

где

$$z_{bn1} = -z_{cb}^2/z_{22}.$$

$$I_2 = \frac{E'}{z_2 + (z_1 z_{ce}) / (z_1 + z_{ce})} = \frac{E'}{z_2 + z_{ce} (z_{11} - z_{ce}) / z_{11}},$$

откуда

$$I_2 = E' / (z_{22} + z_{вн2}),$$

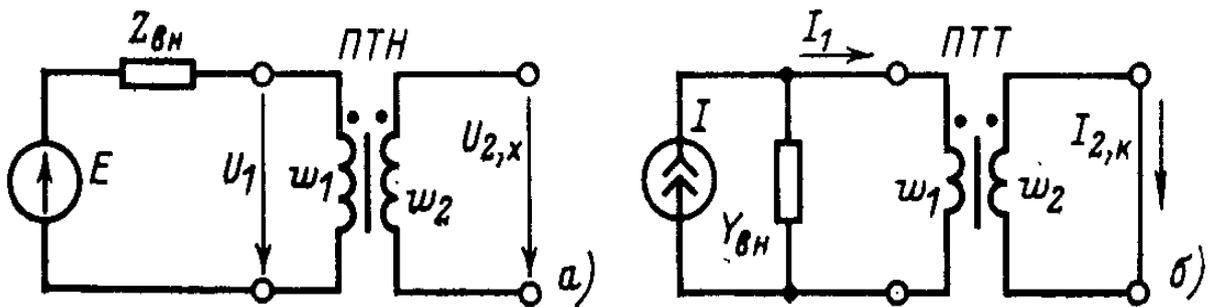
где

$$z_{вн2} = -z_{ce}^2 / z_{11}$$

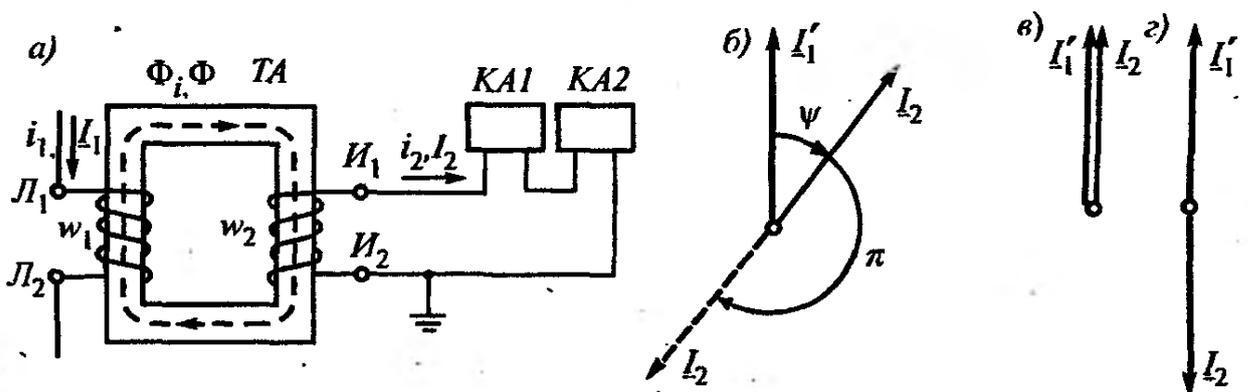
### 3. Линейные измерительные преобразователи

Промежуточные трансформаторы в зависимости от режима работы подразделяются на измерительные и согласующие.

Схемы включения промежуточных трансформаторов напряжения и токов.

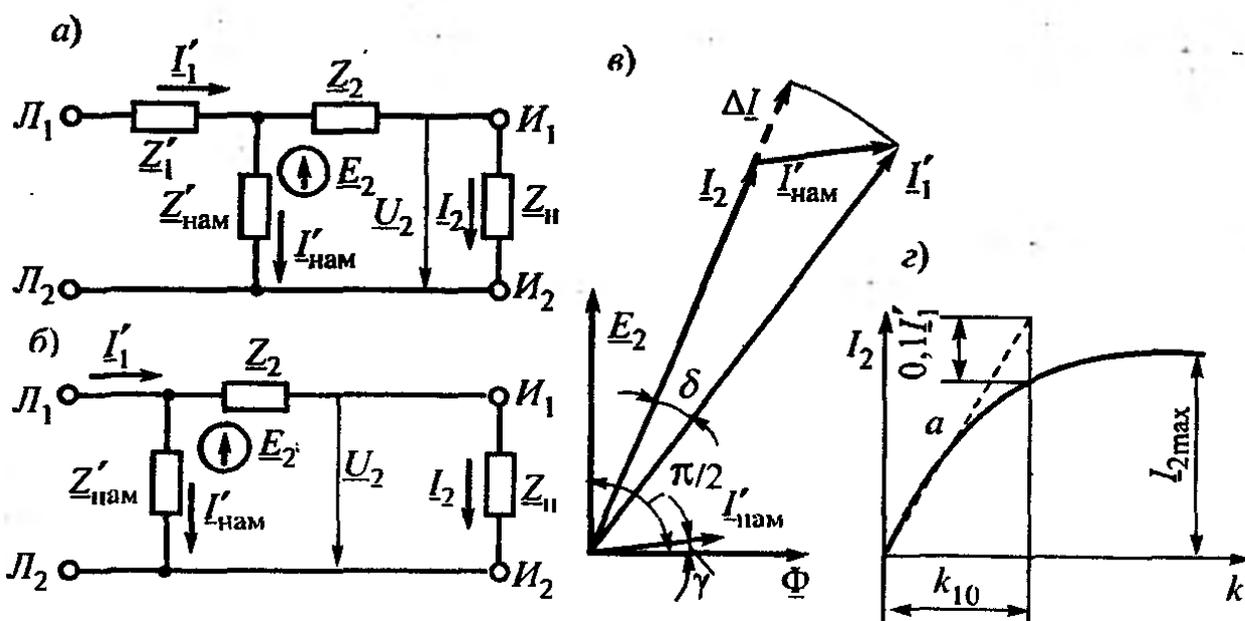


#### 3.1. Измерительные трансформаторы тока (ИТТ)



$$I_1 w_1 - I_2 w_2 = F_{нам}$$

- Схема замещения и векторные диаграммы:



Номинальные вторичные токи ИТТ:

- 1А;
- 5А;
- Допускаются к применению 2А и 2,5А.

Для целей РЗ применяются ИТТ классов точности 5% и 10%.

Погрешность ИТТ – погрешность при максимальной кратности первичного тока.

$$\epsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_2 K_1 - i_1)^2 dt},$$

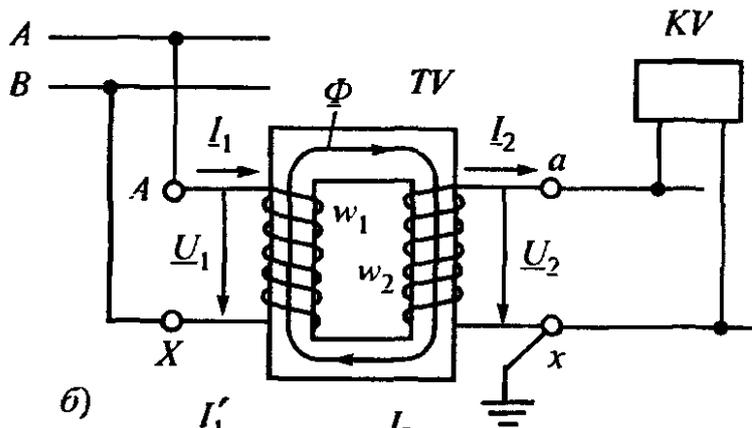
где  $I_1$  – действующее значение первичного тока;  $K_1$  – номинальный коэффициент трансформации;  $T$  – длительность периода тока.

### Типы ИТТ

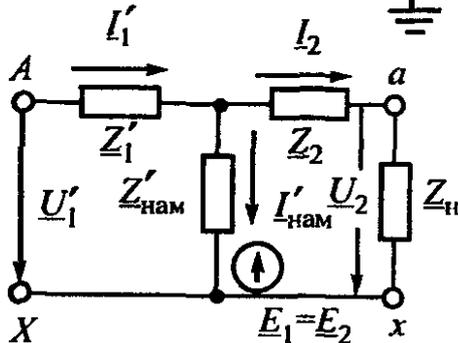
- Магнитные трансформаторы тока;
- Цифровые трансформаторы тока;
- Оптические трансформаторы тока;
- Измерители тока на эффекте Холла.

### 3.2. Измерительные трансформаторы напряжения (ИТН)

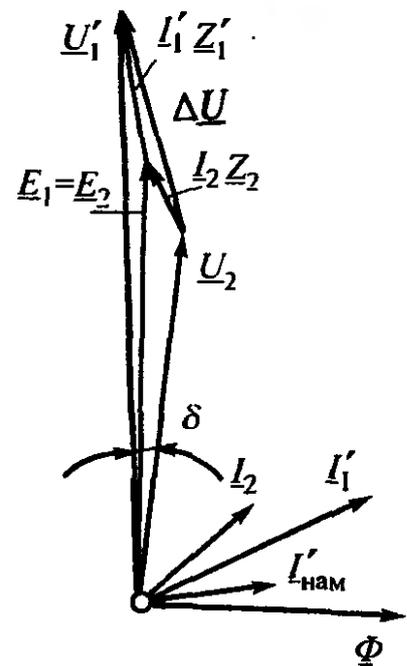
а)



б)



в)



Коэффициент трансформации:

$$K_U = w_1/w_2 = U_1/U_2.$$

Погрешность измерения:

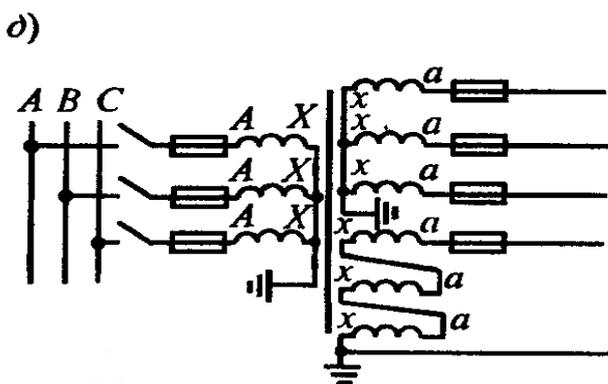
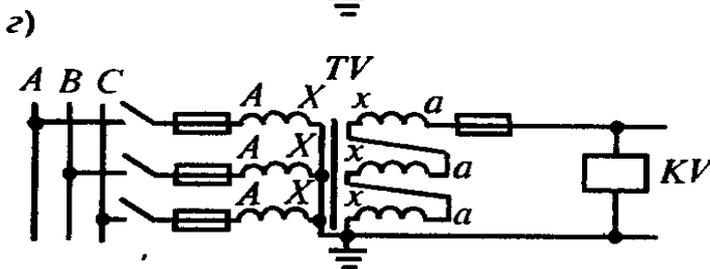
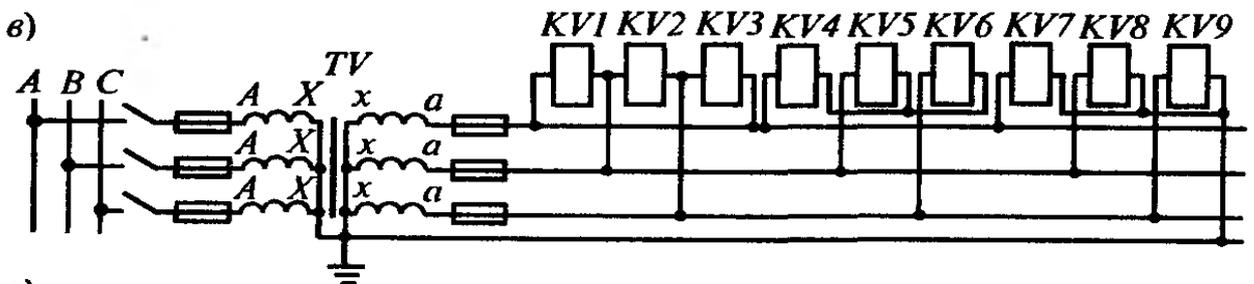
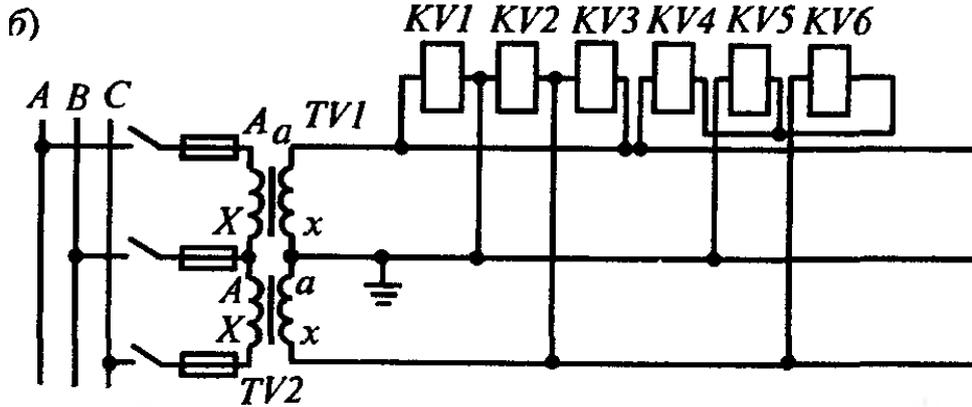
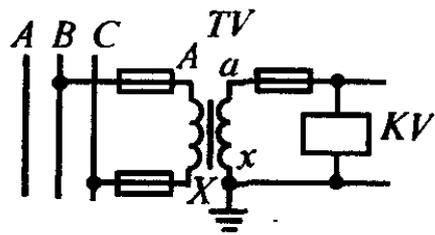
$$f_U = [(K_U U_2 - U_1)/U_1] \cdot 100$$

Номинальное вторичное напряжение 100В.

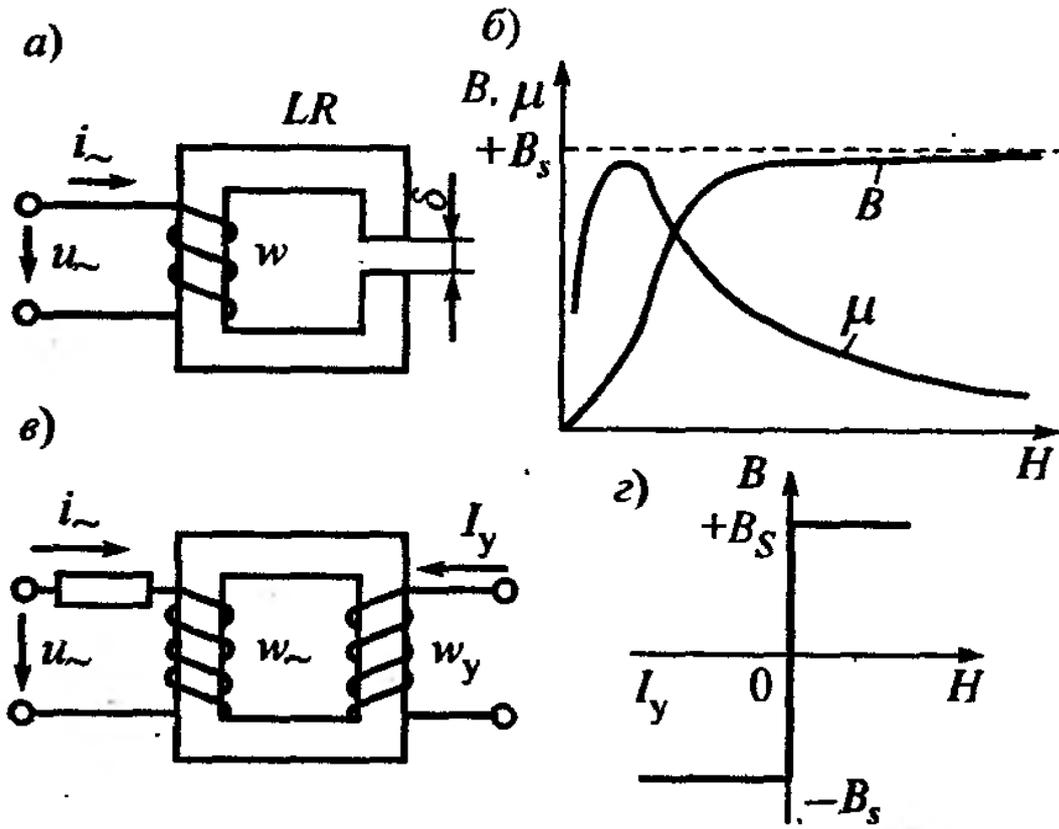
Классы точности: 0,2; 0,5; 1 и 3.

Правила подключения:

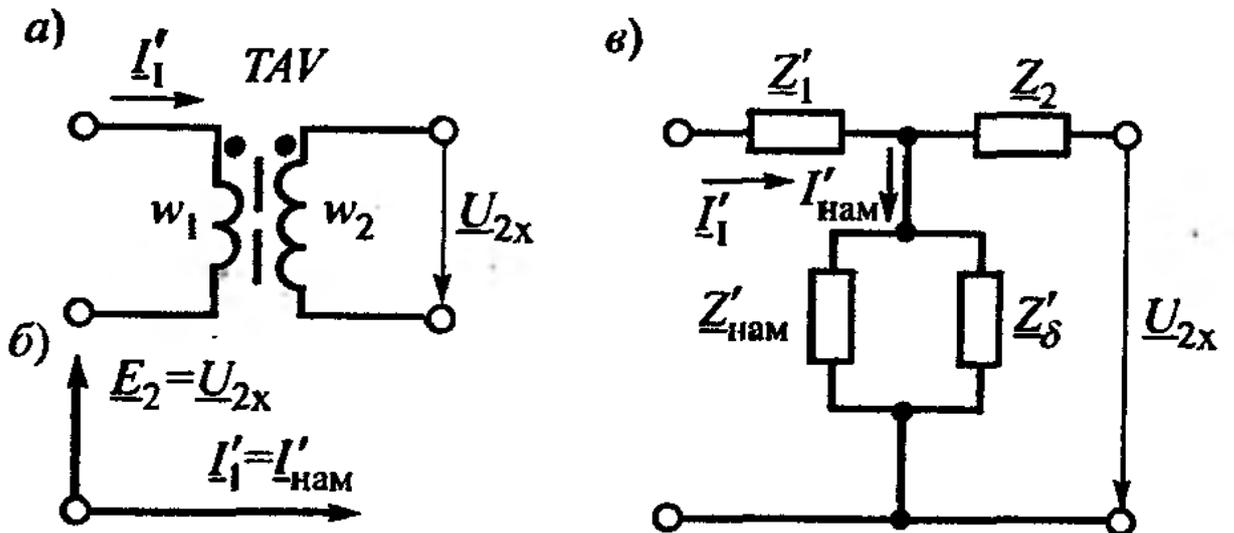
- В случае включения первичных обмоток на фазные напряжения – начала подключаются к фазам, концы объединяются с землей.
- При междуфазном подключении начала подключаются к предыдущим фазам, концы к последующим в порядке их электрического чередования.



### 3.3. Реакторы

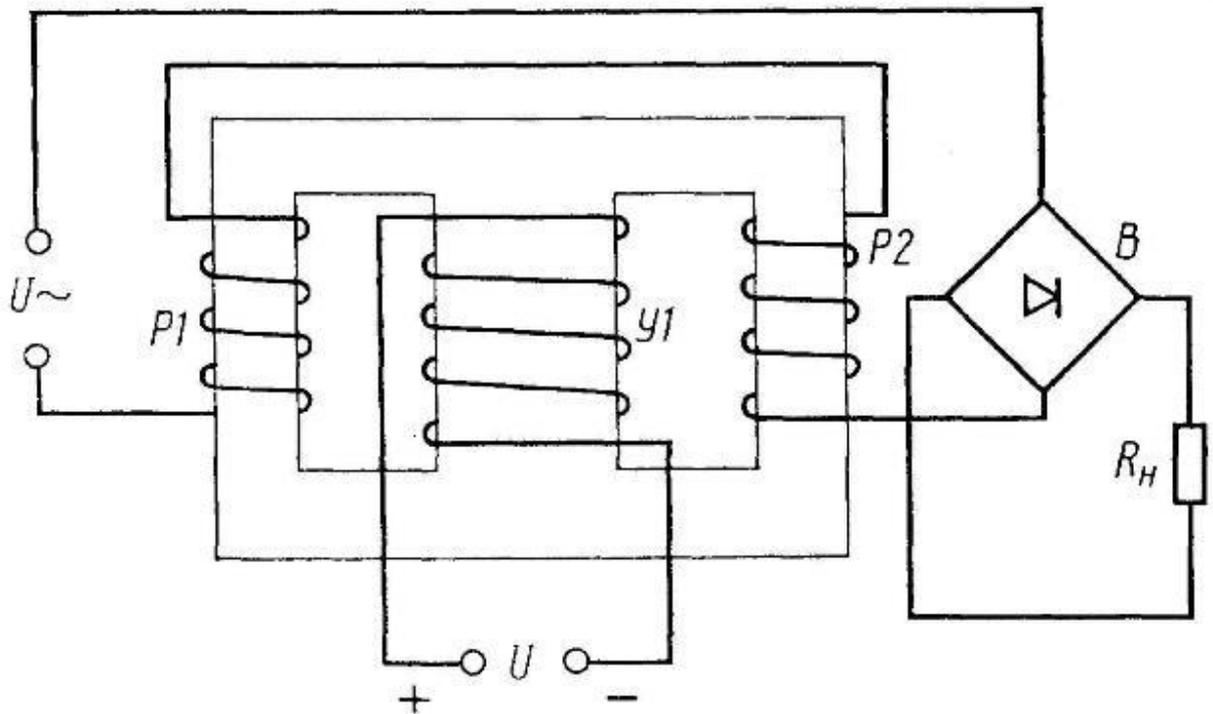
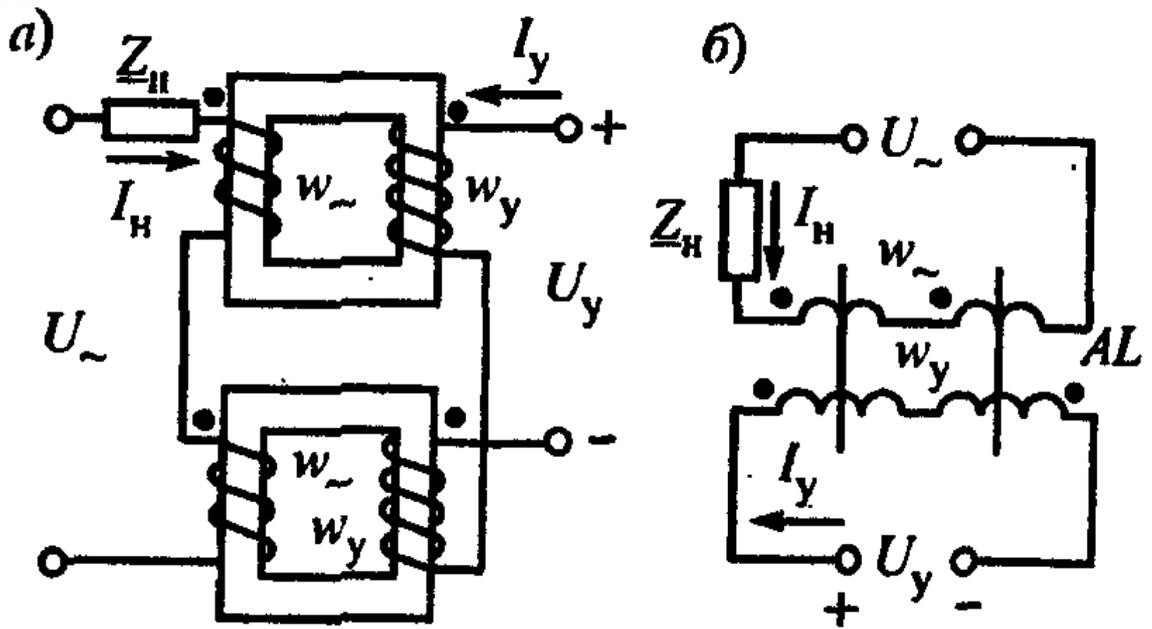


### 3.4. Трансреакторы

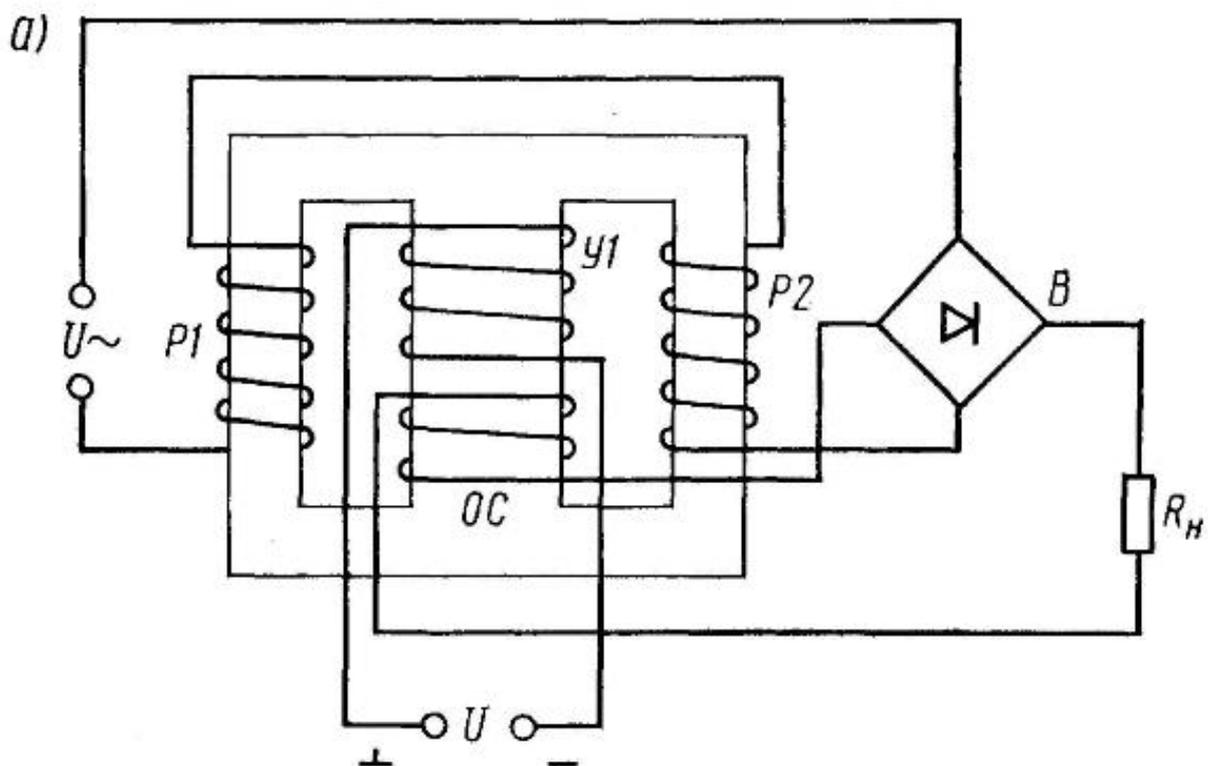


$$U_{2x}/I'_1 = Z'_{\text{нам}} Z'_{\delta} / (Z'_{\text{нам}} + Z'_{\delta}).$$

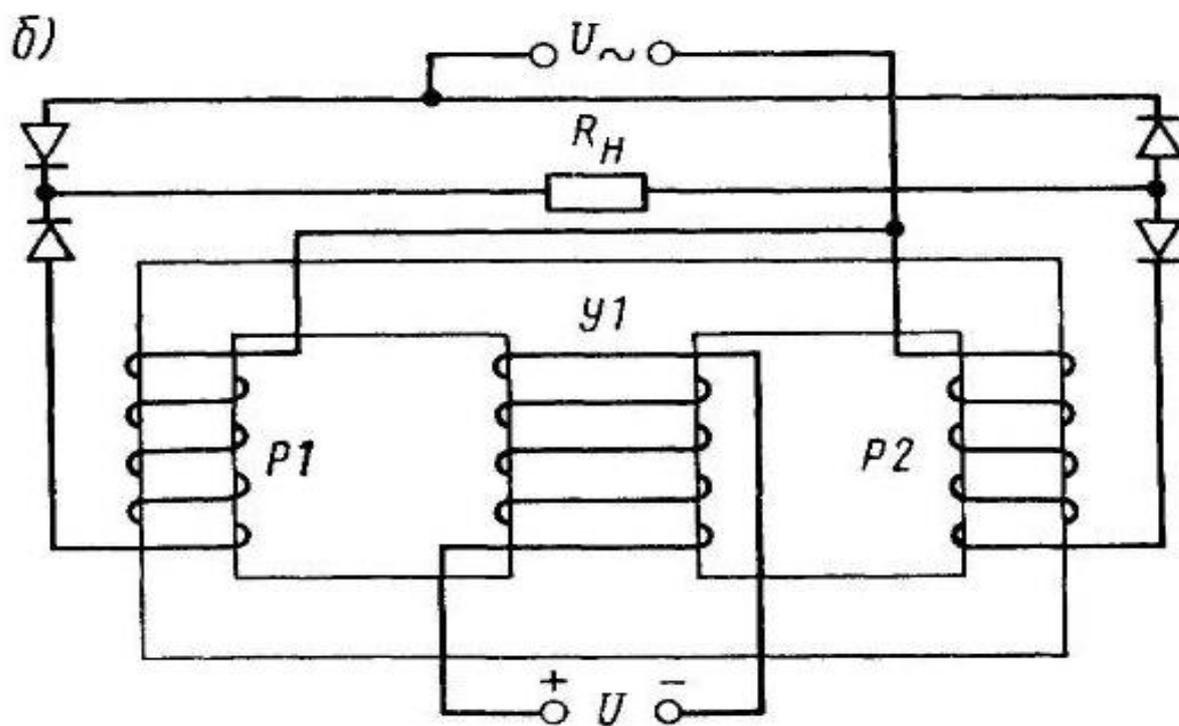
### 3.5. Магнитные усилители



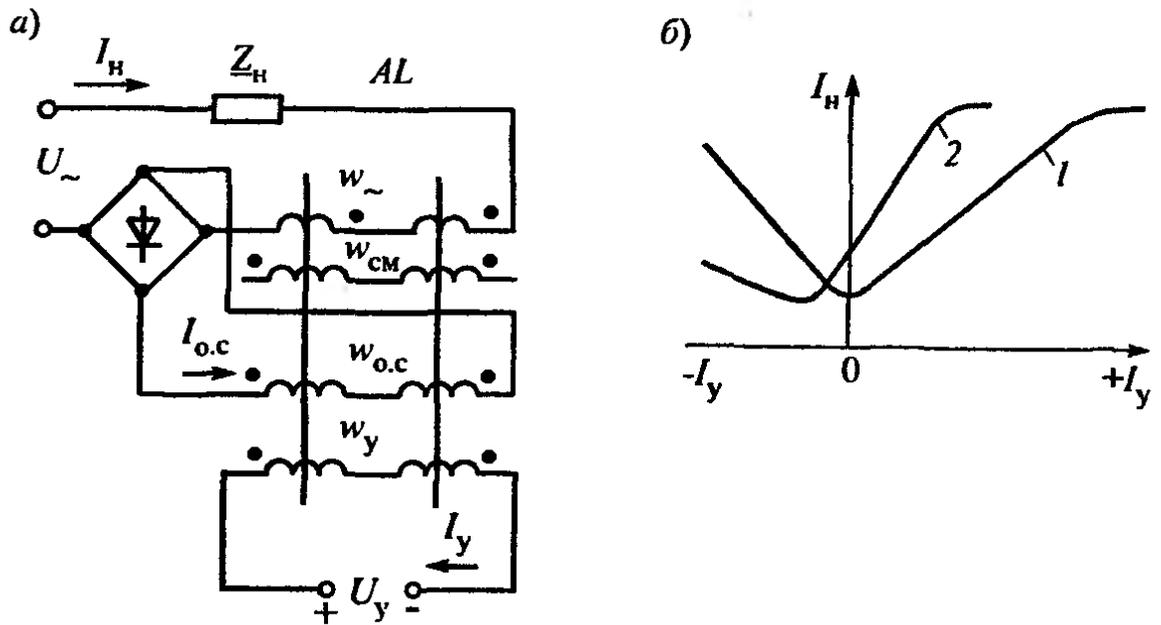
С внешней положительной ОС



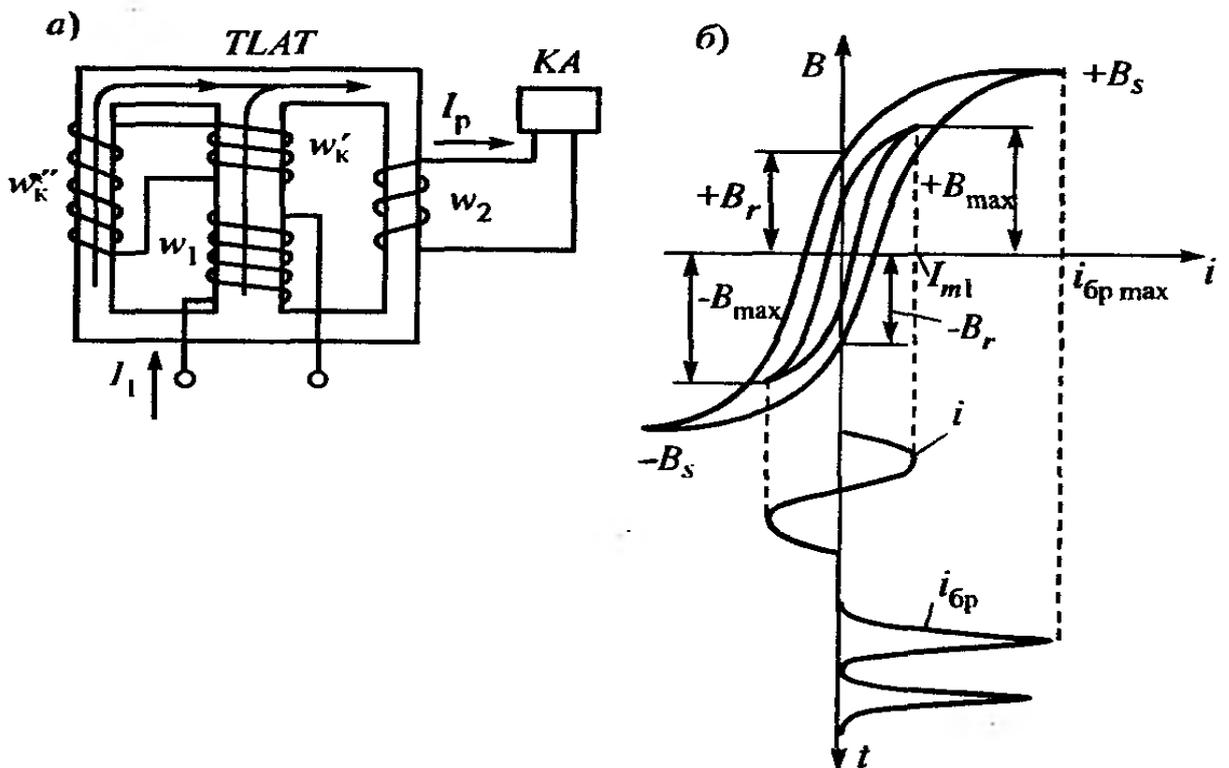
С внутренней ПОС



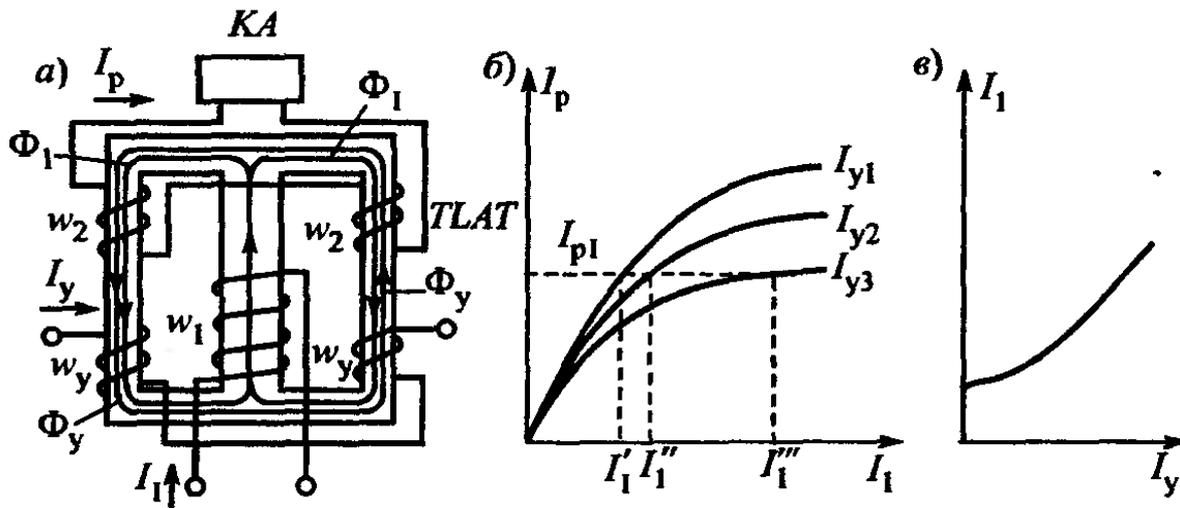
## Характеристики управления



## 3.6. Насыщающиеся трансформаторы тока



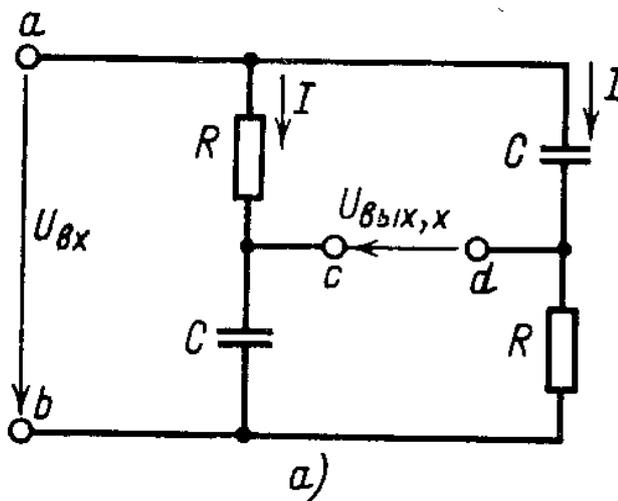
С дополнительным подмагничиванием

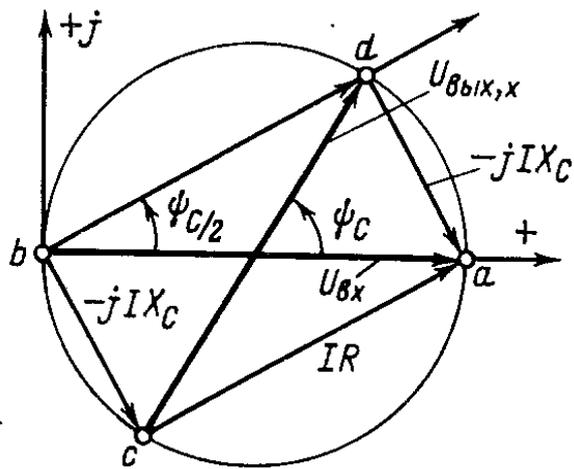


### 3.7. Фазопоротные схемы

Проходная характеристика:

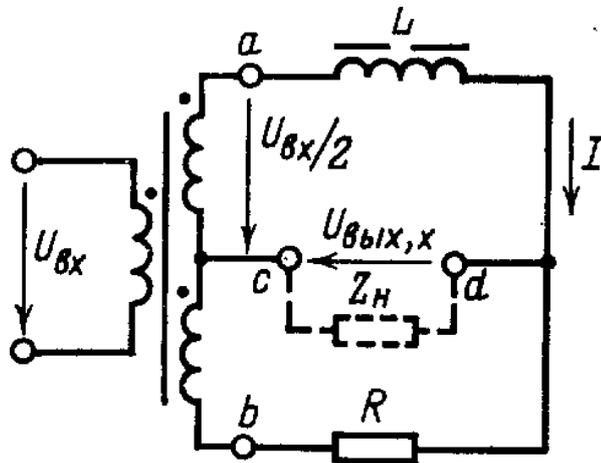
$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = ke^{j\psi} U_{\text{ВХ}}$$



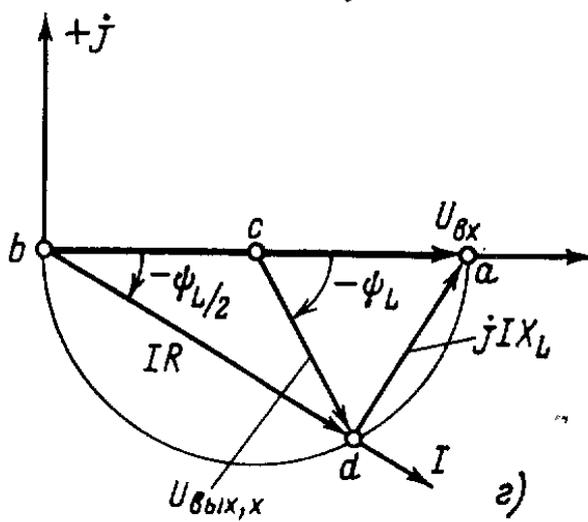


б)

$$\dot{U}_{\text{BYX,X}} = U_{\text{BX}} \frac{R + jX_C}{R - jX_C};$$



б)

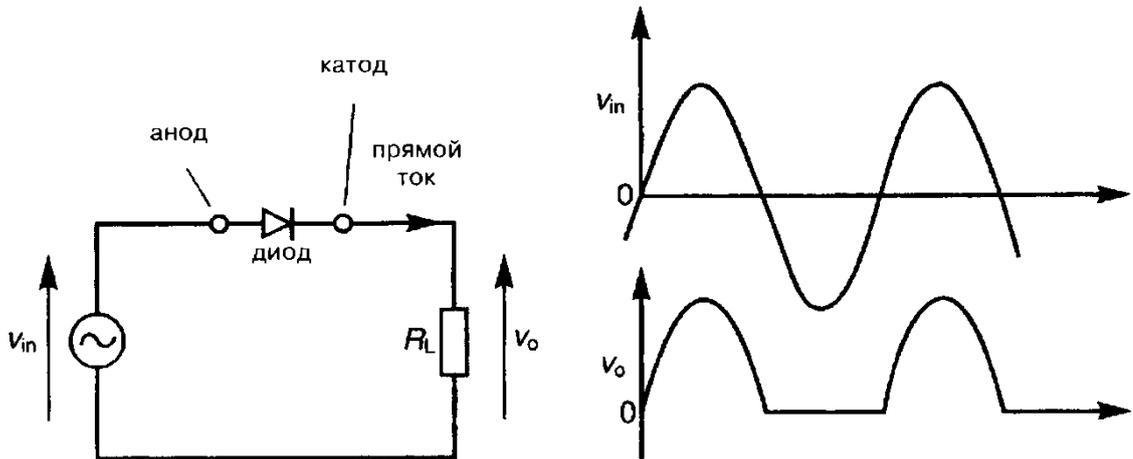


а)

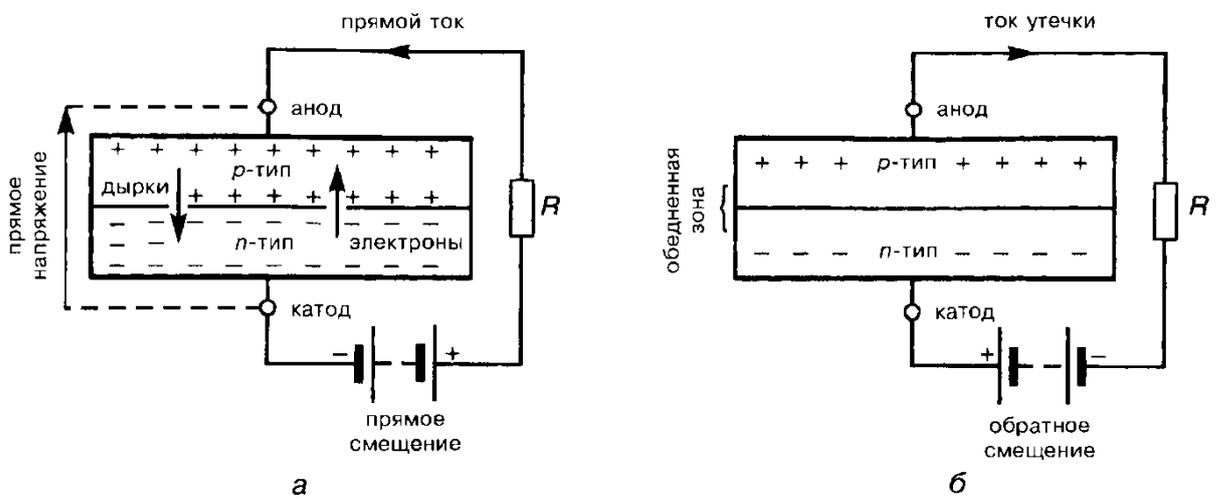
$$\dot{U}_{\text{ВЫХ,Х}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{\sqrt{2}} \frac{R - jX_L}{R + jX_L},$$

#### 4. Полупроводниковые элементы

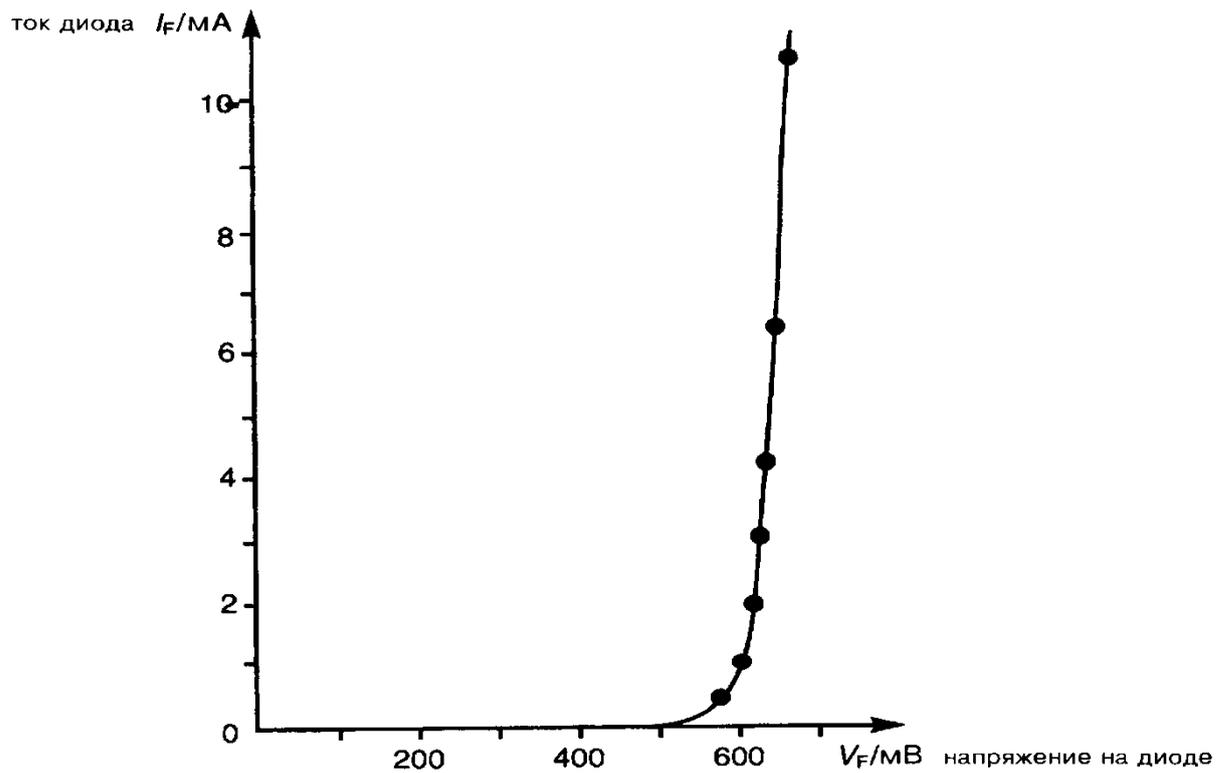
Схема выпрямления на основе идеального диода:



Принцип действия полупроводникового диода:



Вольт-амперная характеристика кремниевого диода:



Характеристики диода:

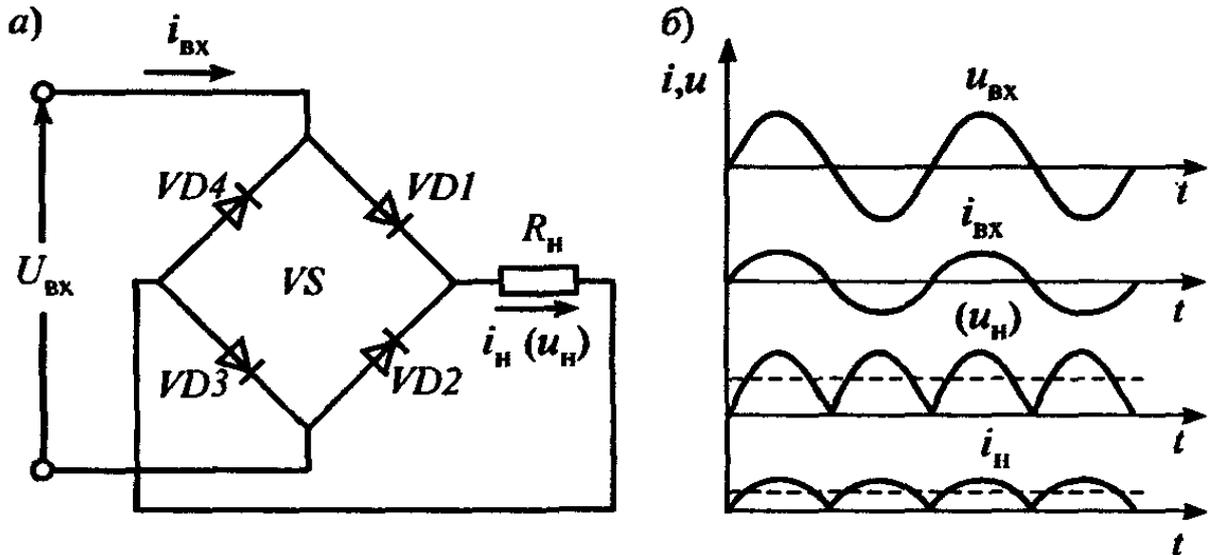
$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right].$$

где:  $I_s$  – ток при абсолютном 0;  $V_D$  – приложенное напряжение;  $V_T$  – напряжение, зависящее от температуры.

Динамическое сопротивление:

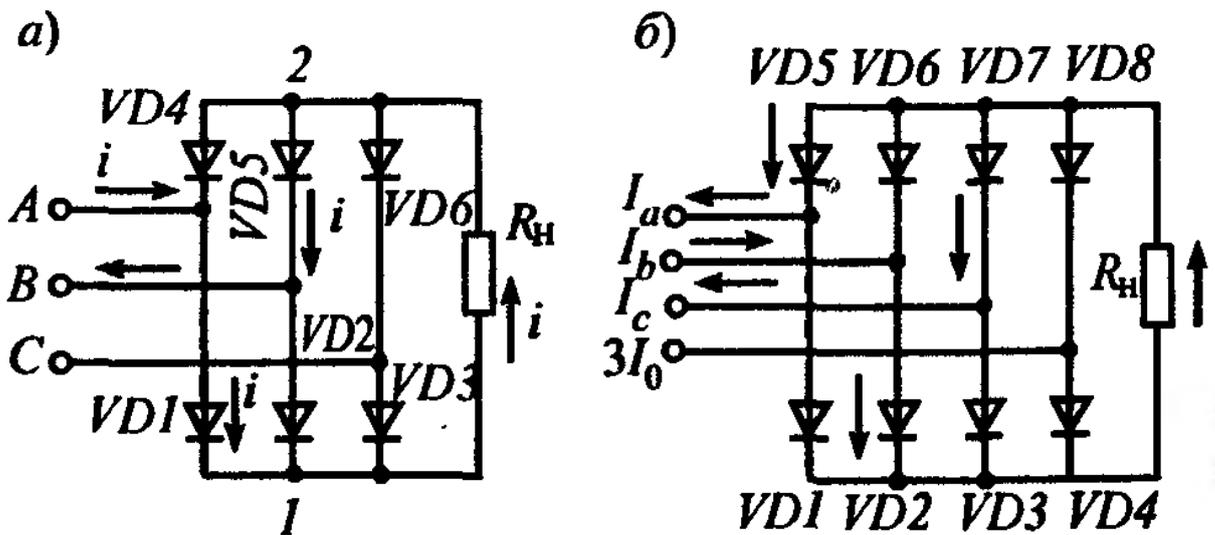
$$r_d = \frac{dV_D}{dI}.$$

#### 4.1. Двухполупериодный выпрямитель напряжения:

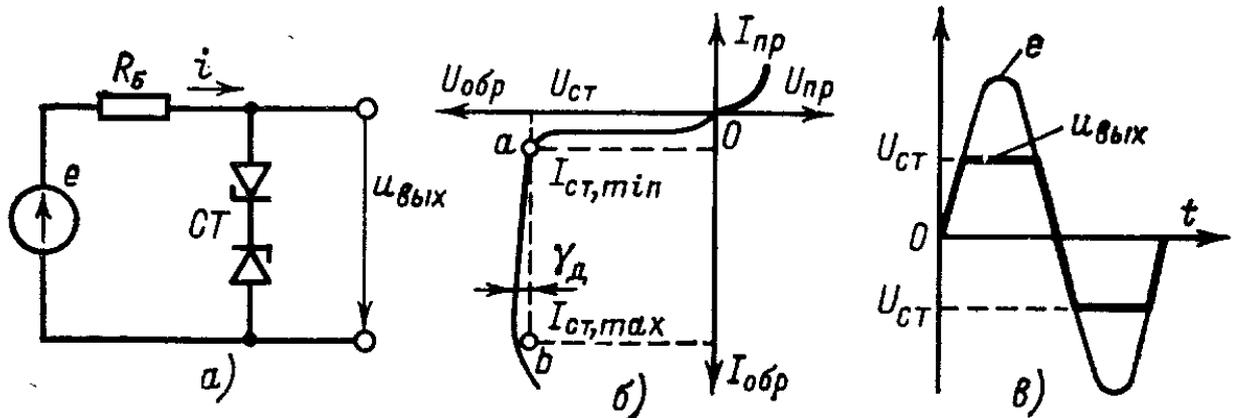


$$I_{cp} = (2/\pi)I_{max} = (2\sqrt{2}/\pi)I; \quad U_{cp} = (2/\pi)U_{max} = (2\sqrt{2}/\pi)U,$$

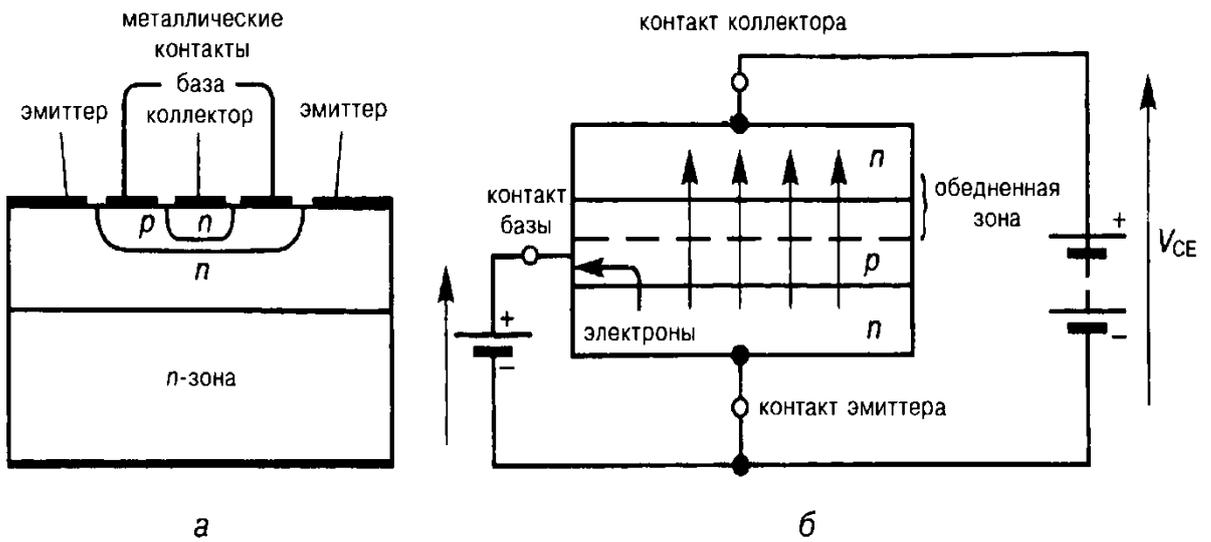
#### 4.2. Трехфазные двухполупериодные схемы выпрямления:



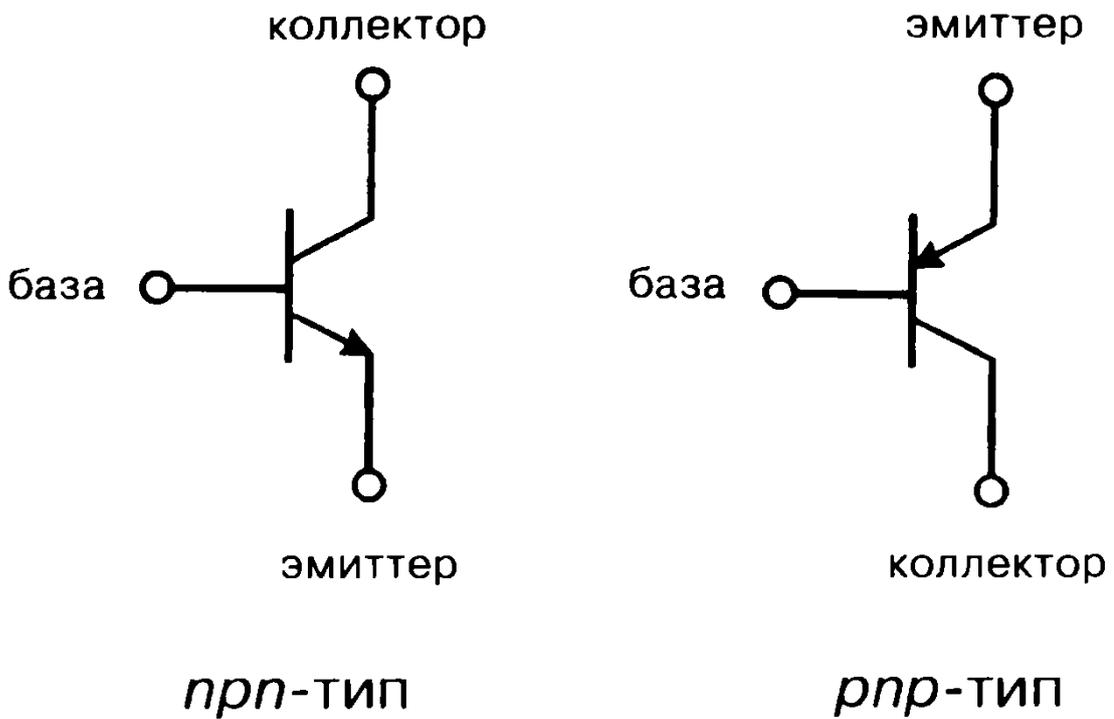
#### 4.3. Стабилитрон



#### 4.4. Биполярные транзисторы



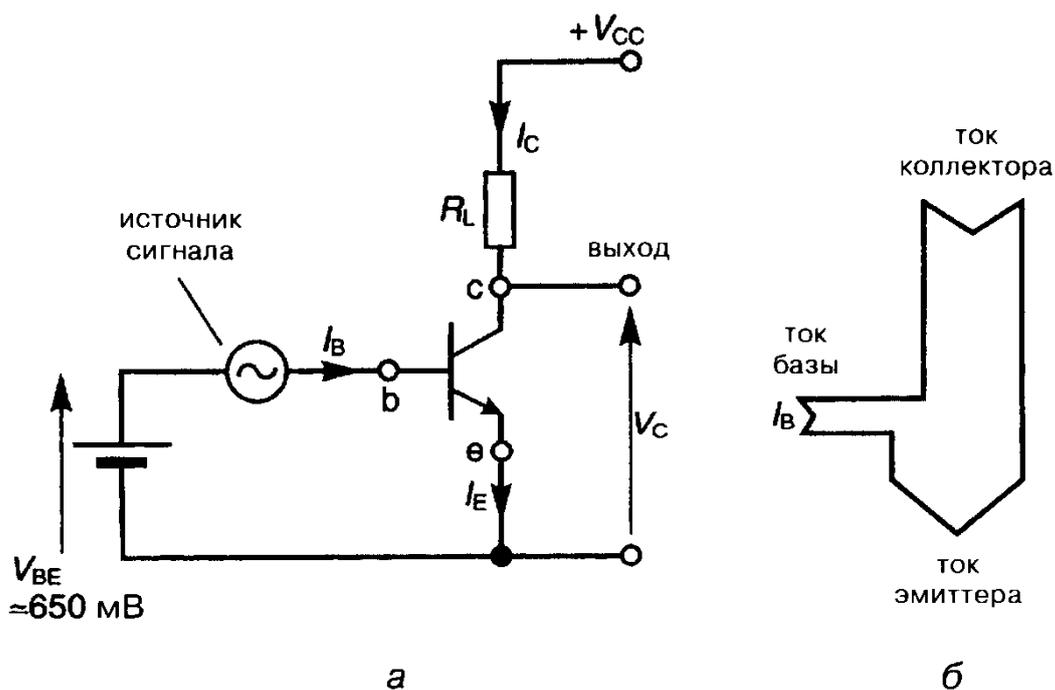
Условные обозначения:



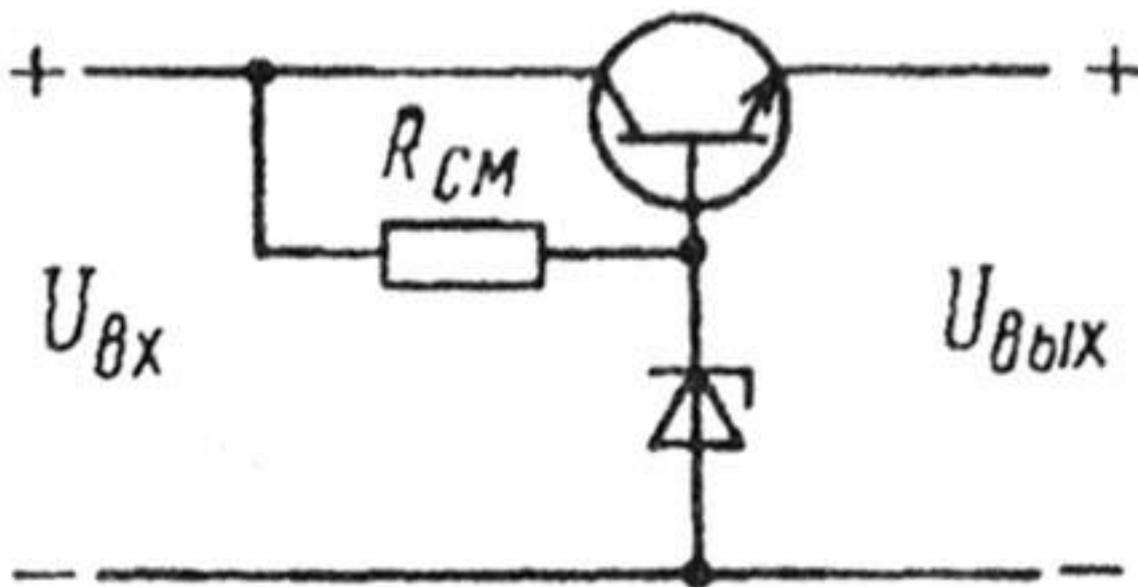
Параметры:

- Коэффициент усиления по току;

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$



- Стабилизатор напряжения (компенсационный):



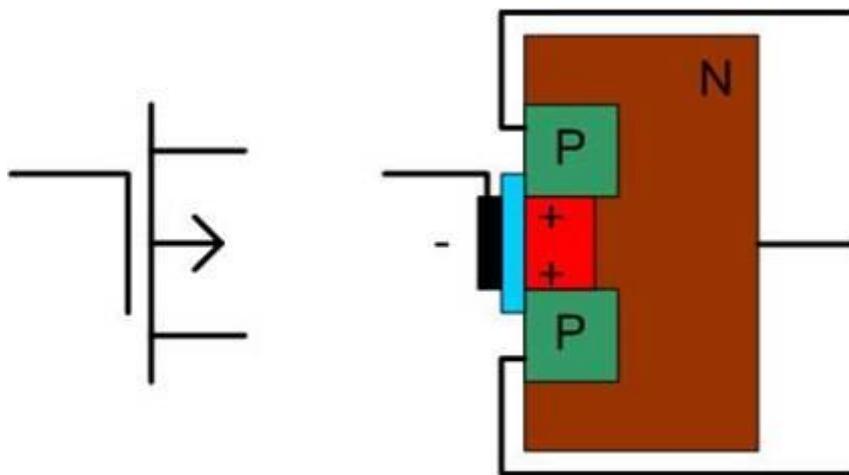
#### 4.5. Полевые транзисторы

- С управляющим переходом (JFET);
- С изолированным затвором (IGFET).

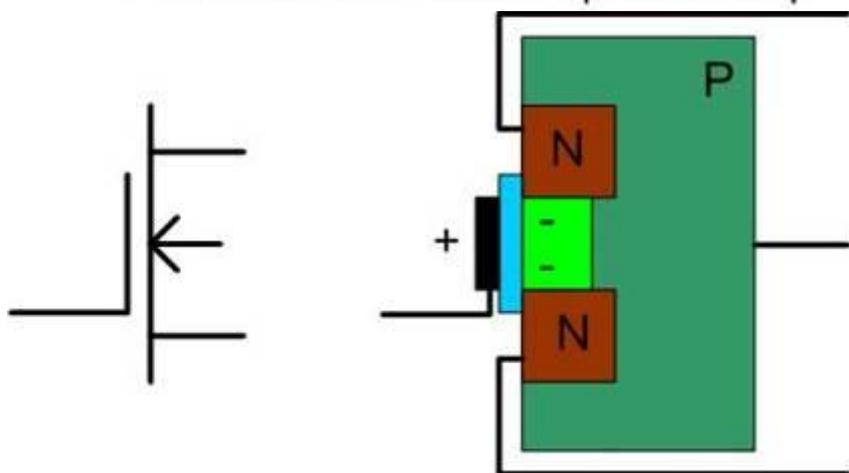
МОП (MOS) транзисторы – металл-окисел-полупроводник.

Комплементарные пары транзисторов (один р-канальный, второй n-канальный) – КМОП (CMOS).

2 типа МОП- транзисторов



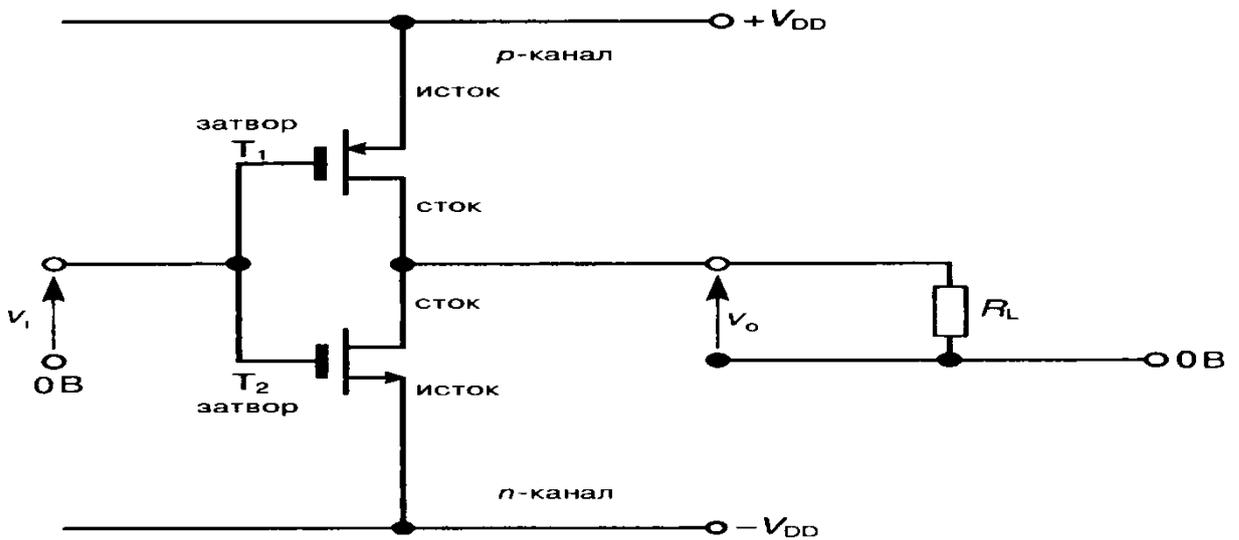
P-канальный МОП-транзистор



N-канальный МОП-транзистор

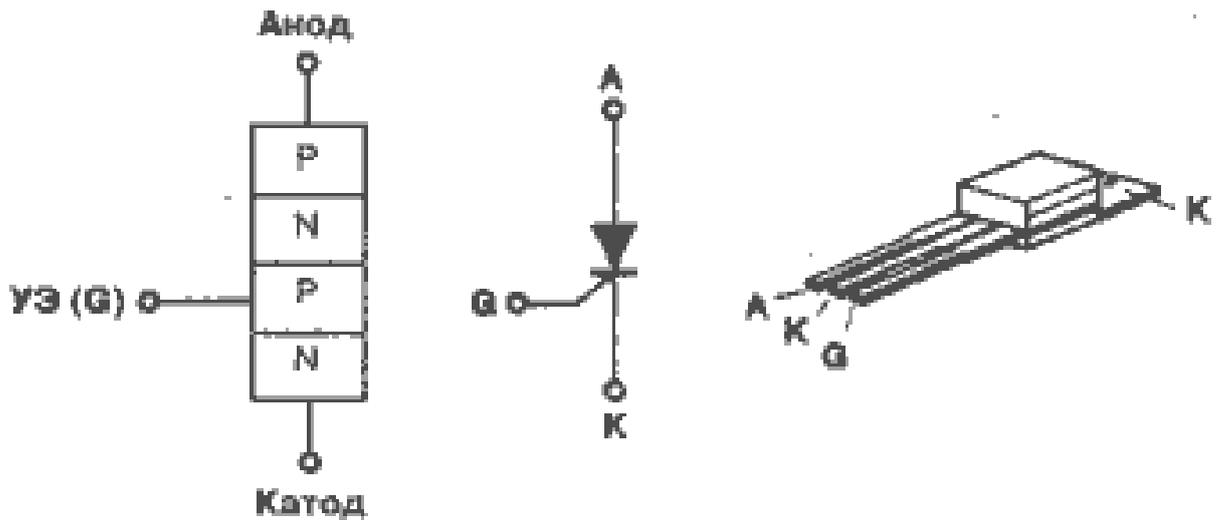
#### 4.6. Комплементарные транзисторы

P-канальные и N-канальные транзисторы являются как бы зеркальным отражением друг друга. Пару таких транзисторов, соединенных последовательно называют, комплементарной парой. А к названию технологии, использующей такие пары транзисторов добавилась буква «К» - КМОП.



### 4.7. Тиристоры

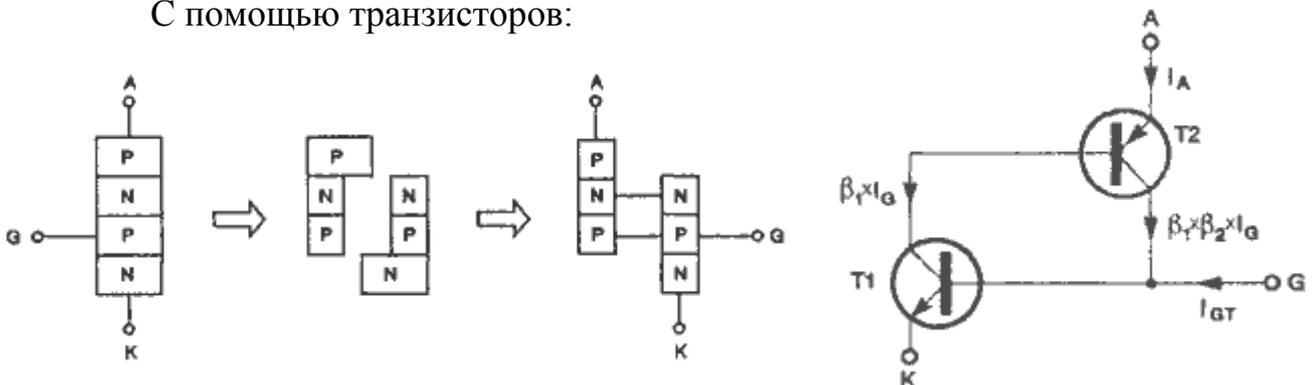
Тиристором называется управляемый трехэлектродный полупроводниковый прибор, состоящий из чередующихся четырех кремниевых слоев типа р и n.



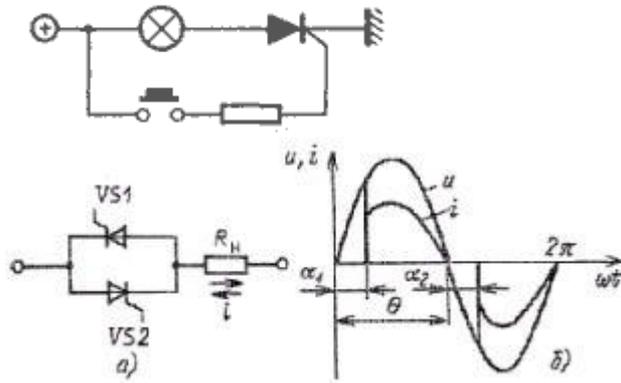
Представление тиристора с помощью диодов:



С помощью транзисторов:

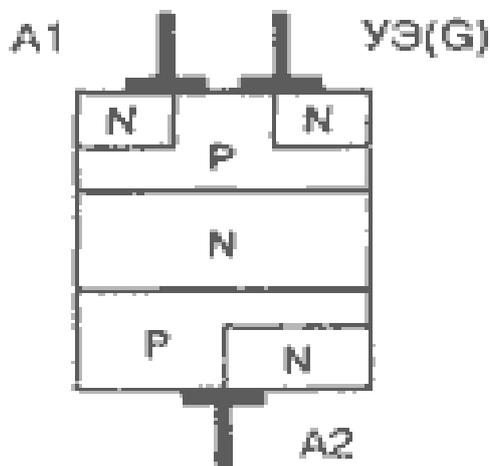


Схемы включения:



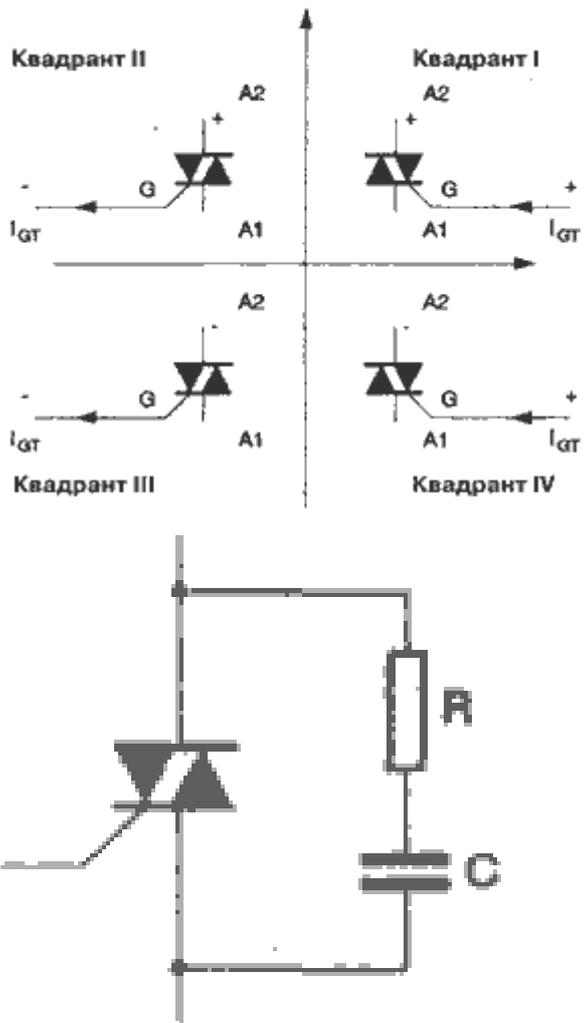
#### 4.8. Симисторы

Структура симистора:



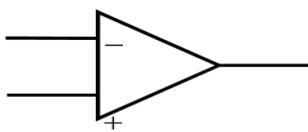
Симистор переходит в закрытое состояние после изменения полярности между его выводами A1 и A2 или если значение рабочего тока меньше тока удержания  $I_y$ .

В режиме переменного питания смена состояний симистора вызывается изменением полярности напряжения на рабочих электродах A1 и A2. Поэтому в зависимости от полярности управляющего тока можно определить четыре варианта управления симистором:

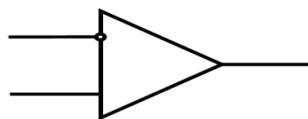


## 5. Операционные усилители

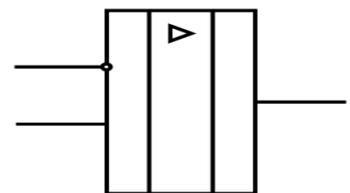
Обозначения ОУ



a)



b)

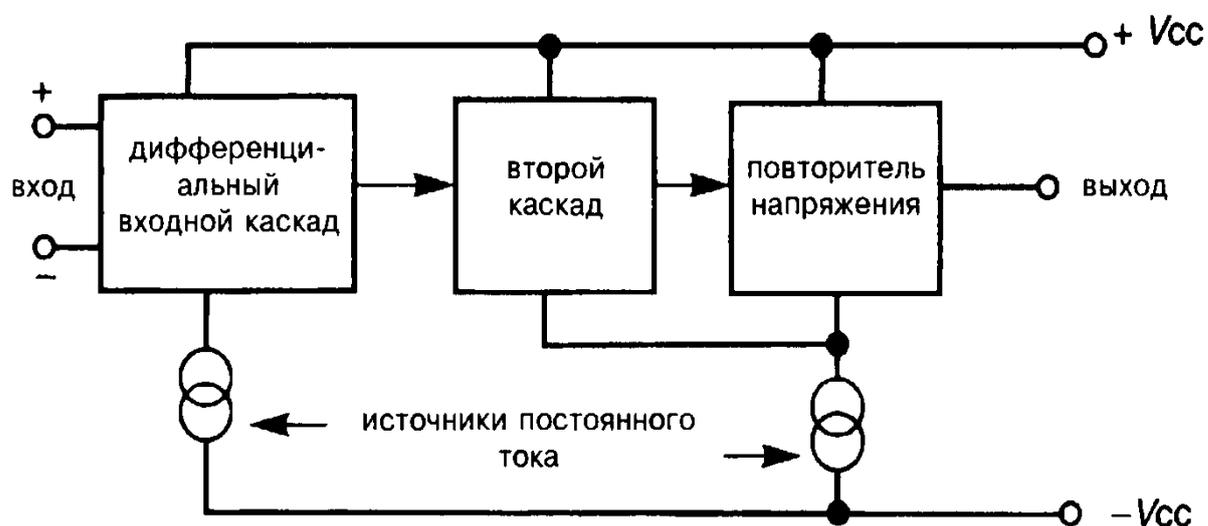


c)

Параметры ОУ:

Параметр	Идеальный ОУ	Реальный ОУ
Входное сопротивление $R_{вх}$ , Ом	$\infty$	$10^5 \div 10^8$
Выходное сопротивление $R_{вых}$ , Ом	0	$10 \div 100$
Коэффициент усиления (без ОС) $k_{ус}$	$\infty$	$10^3 \div 10^6$
Частота среза, МГц	$\infty$	$0,1 \div 10$
Смещение нуля, температурный дрейф напряжения смещения	отсутствуют	$0,1 \div 20$ мВ
Шумы	отсутствуют	

Структура:



Входной дифференциальный каскад

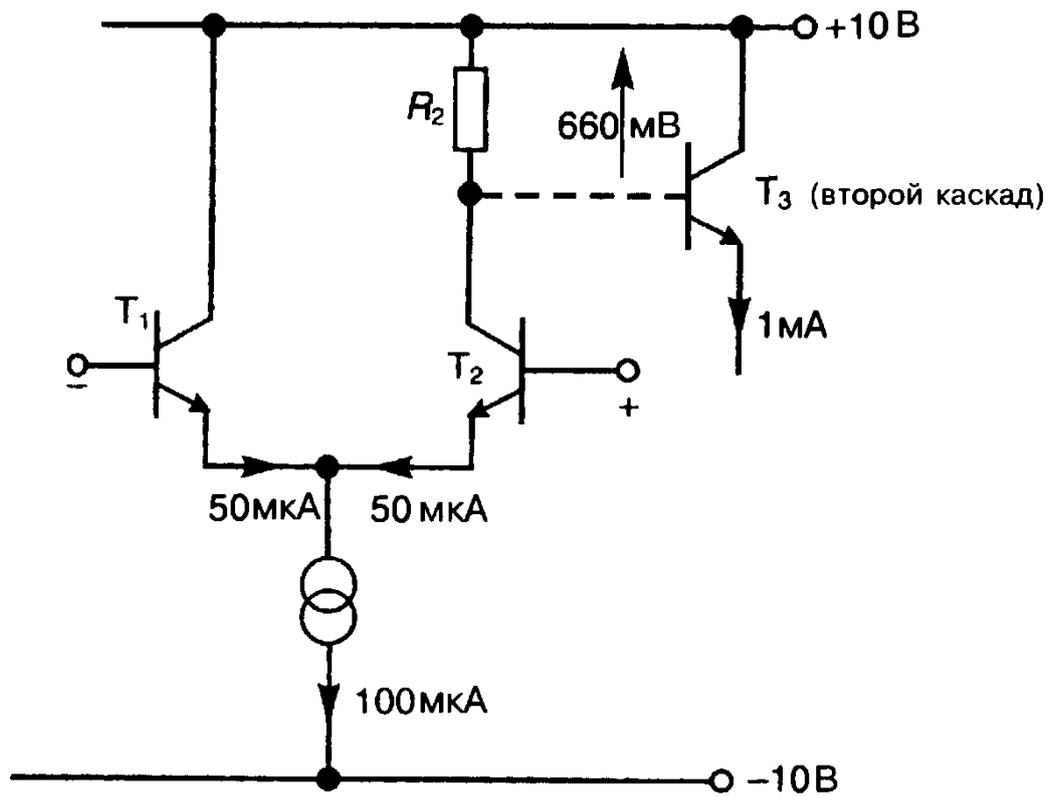
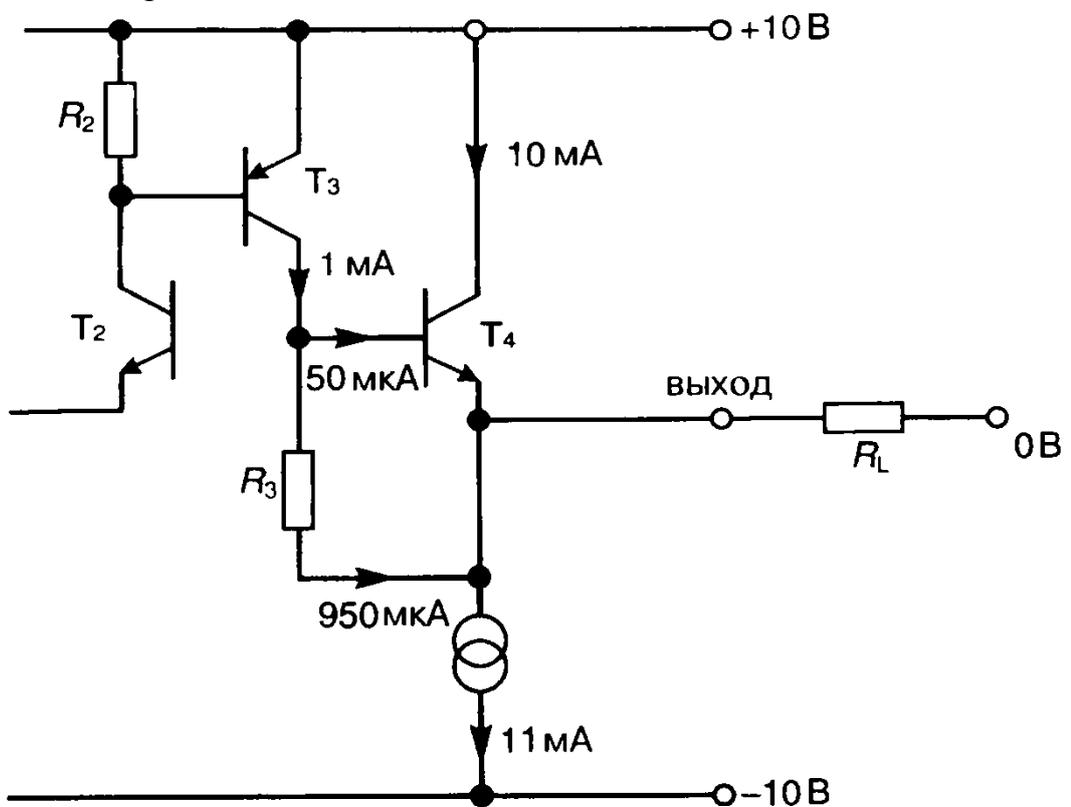
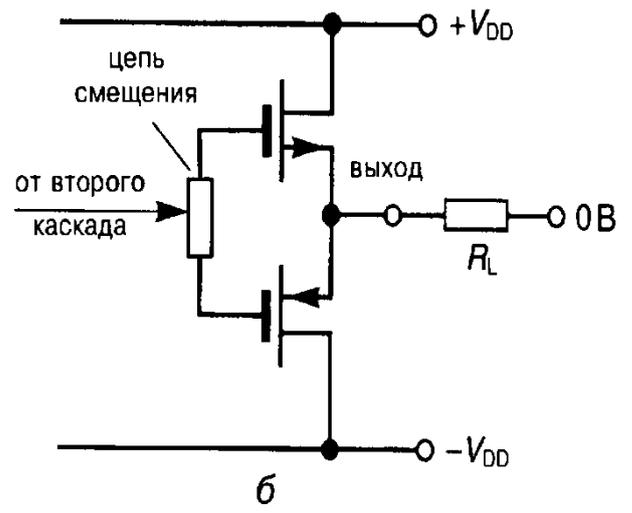
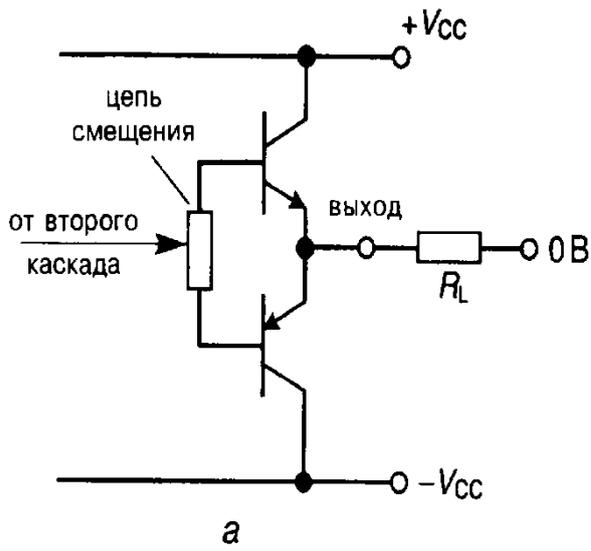


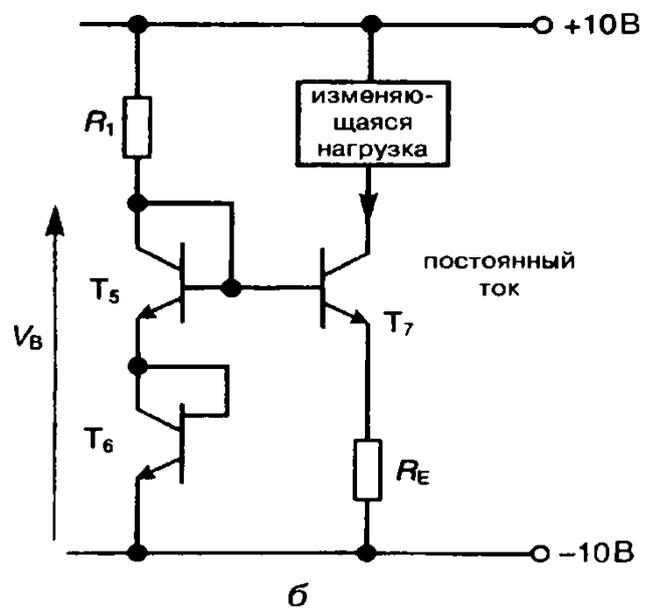
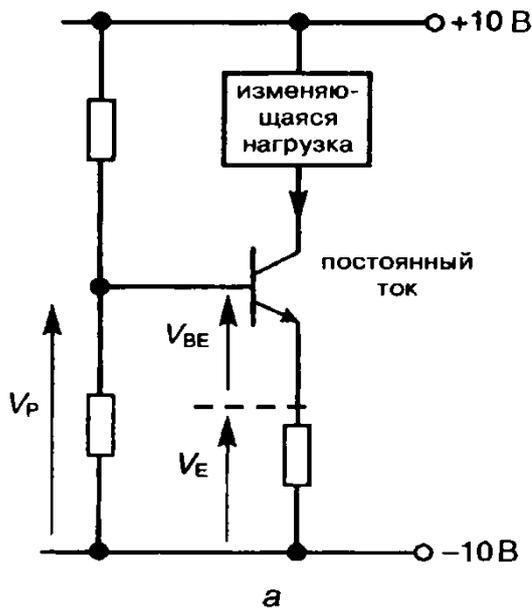
Схема второго и выходного каскадов:



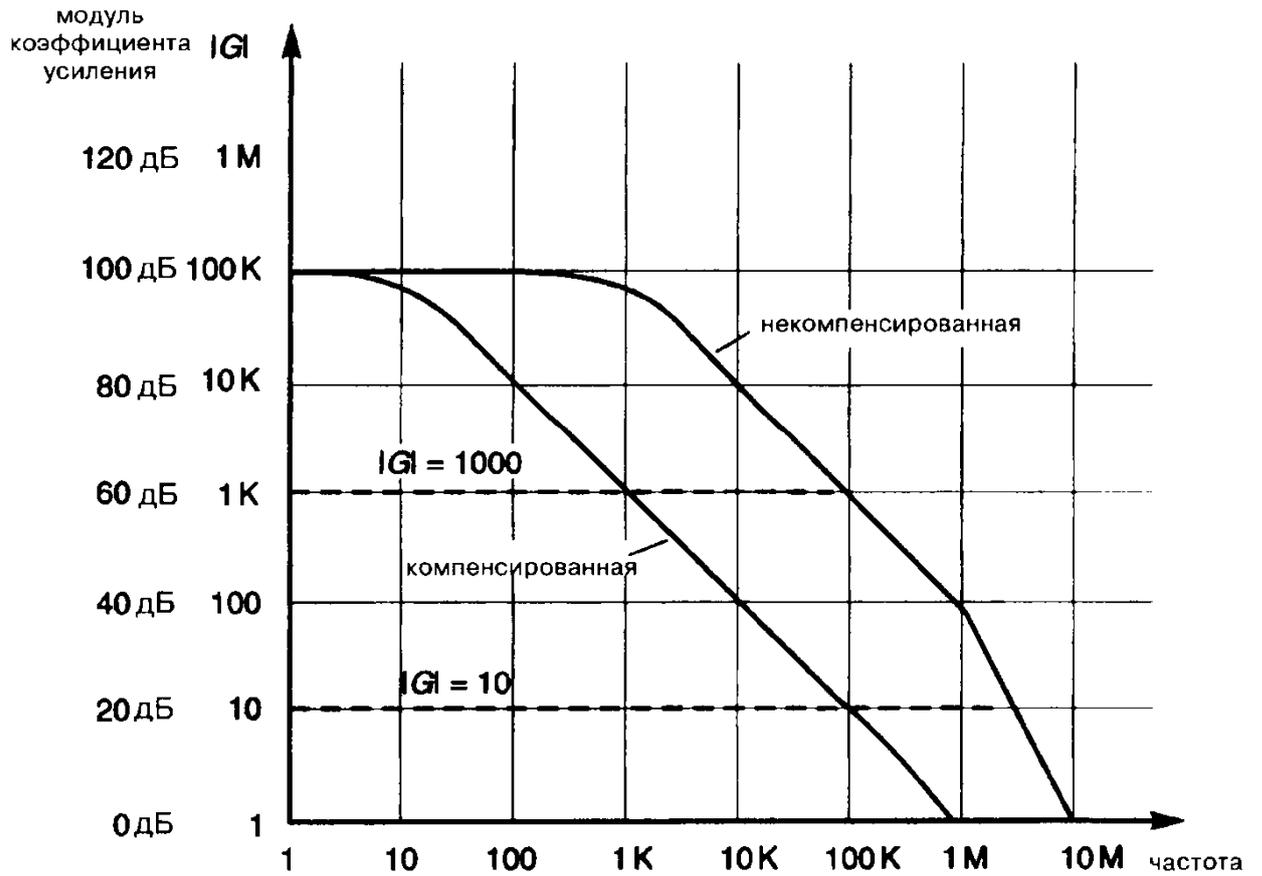
Двухтактный выходной каскад



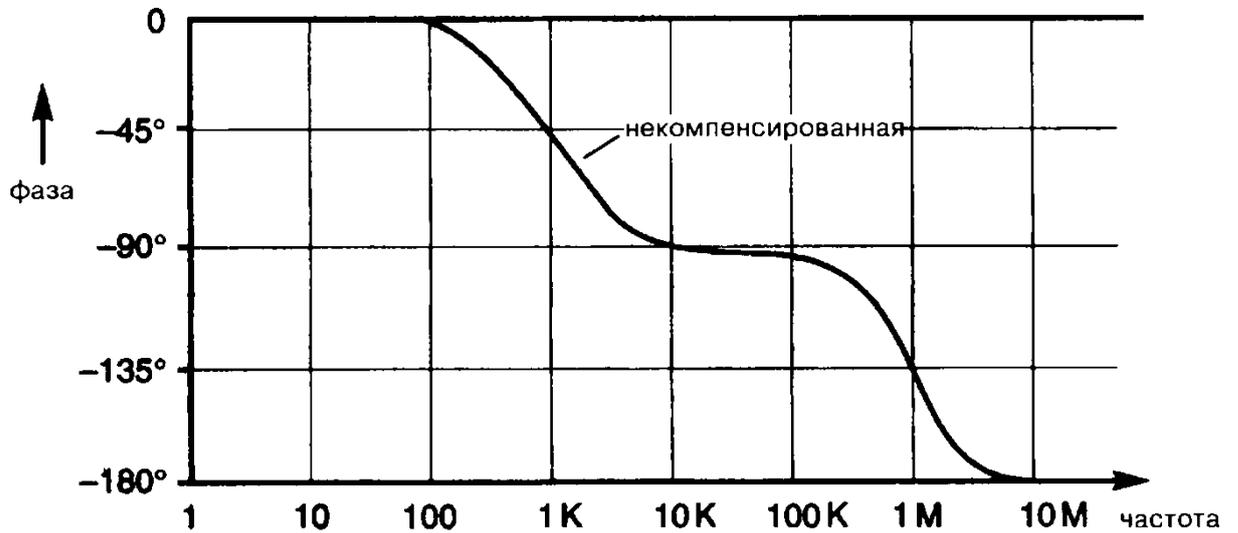
Источники тока без компенсации и с температурной компенсацией.



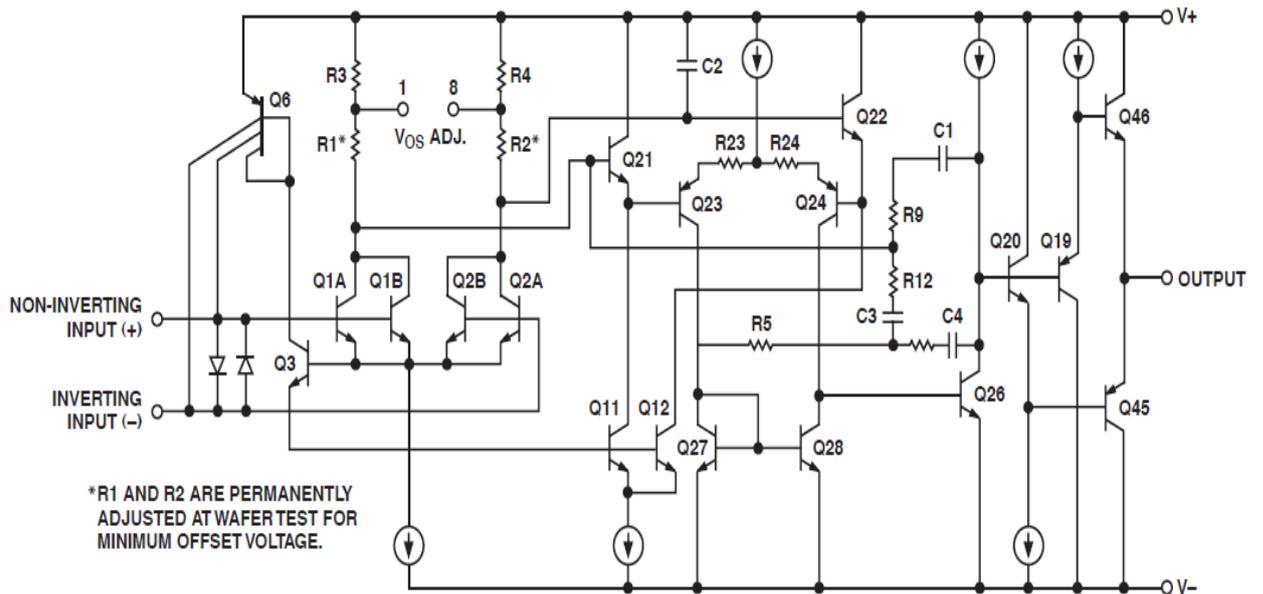
АЧХ:



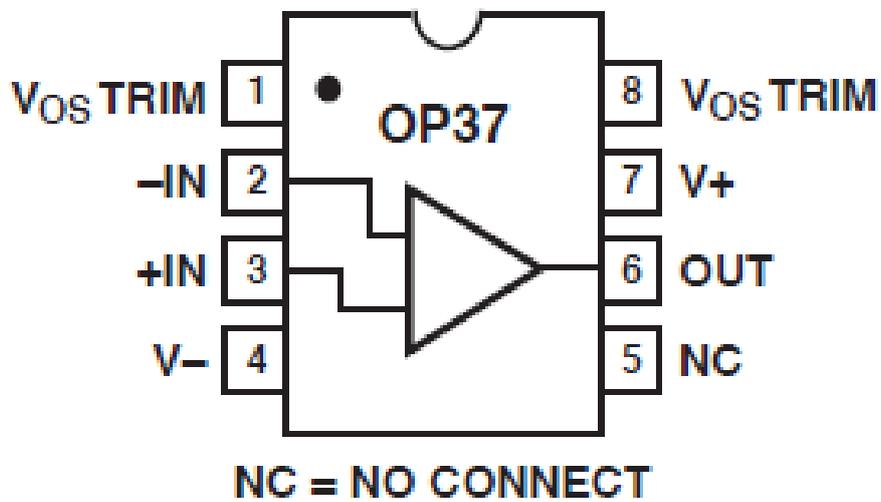
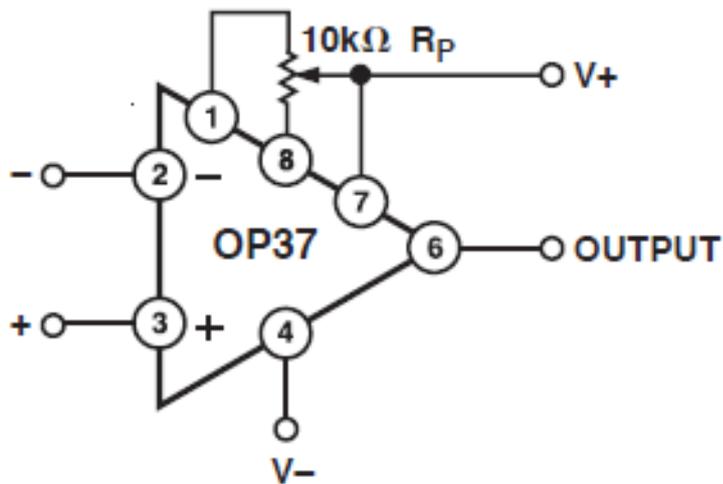
ФЧХ:



## Схема OP37 (Analog Devices)



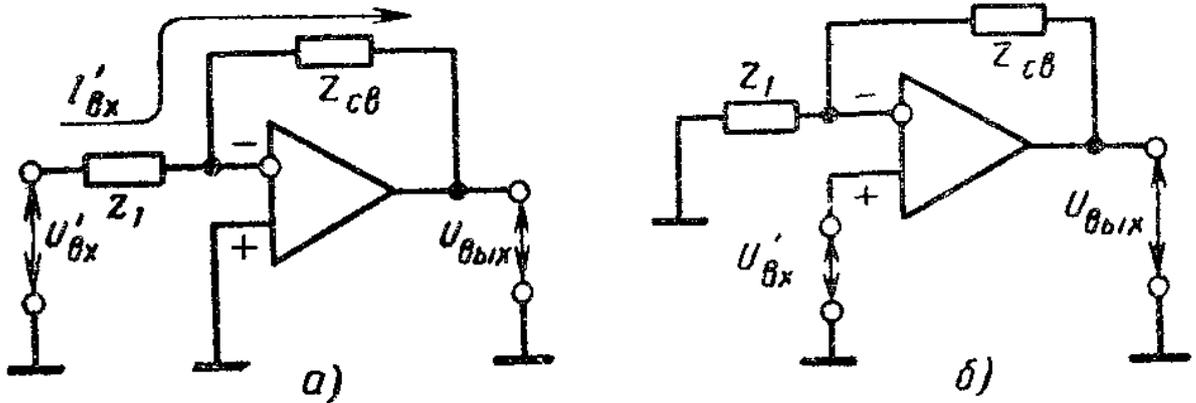
Типовая схема включения:



В зависимости от назначения различаются следующие типы ОУ:

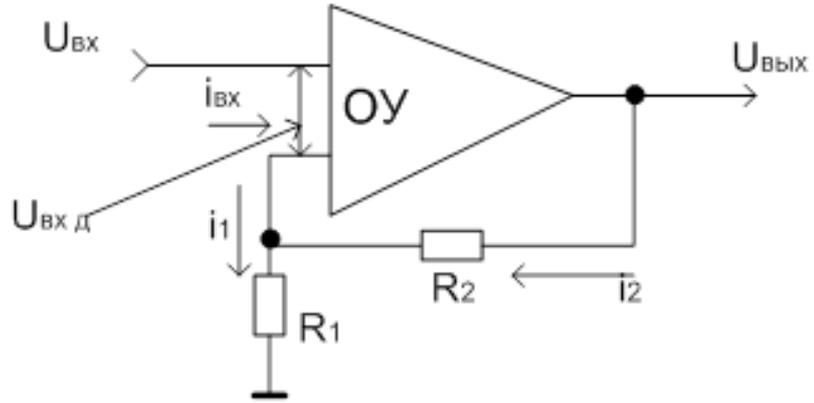
- Широкого применения: характеризуются невысокой ценой, малой выходной мощностью.
- Прецизионные: имеют более высокий коэффициент усиления, меньшее смещение нуля, меньший уровень шумов, малые входные токи и температурные дрейфы.
- Быстродействующие: обладают высокими динамическими характеристиками (частота среза до 1000 МГц, скорость нарастания выходного напряжения до 1000 В/мкс).
- Высоковольтные: напряжение от  $\pm 50\text{В}$  до  $\pm 200\text{В}$ .
- Мощные: с выходным током не менее 300 мА.
- Микромощные: ток потребления может составлять до 1 мкА.
- Однополярные: обычно +5В.
- Многоканальные: содержат два и более ОУ.
- Изолированные: с гальванической развязкой.
- Программируемые: имеется ряд параметров (чаще всего коэффициент усиления) с программным изменением.
- и др.

### 5.1. Инвертирующий усилитель



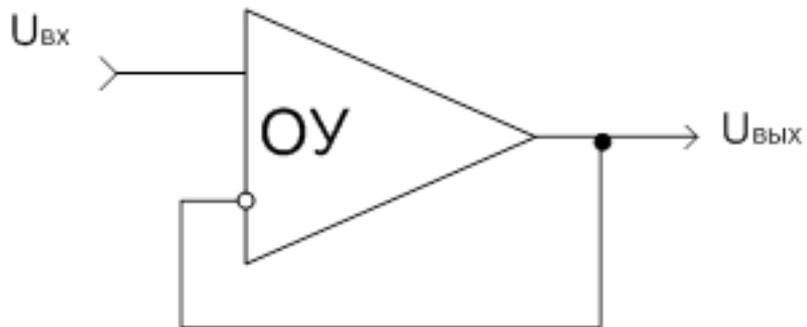
$$K' = U_{\text{вых}} / U'_{\text{вх}} = -Z_{\text{св}} / Z_1.$$

### 5.2. Не инвертирующий усилитель

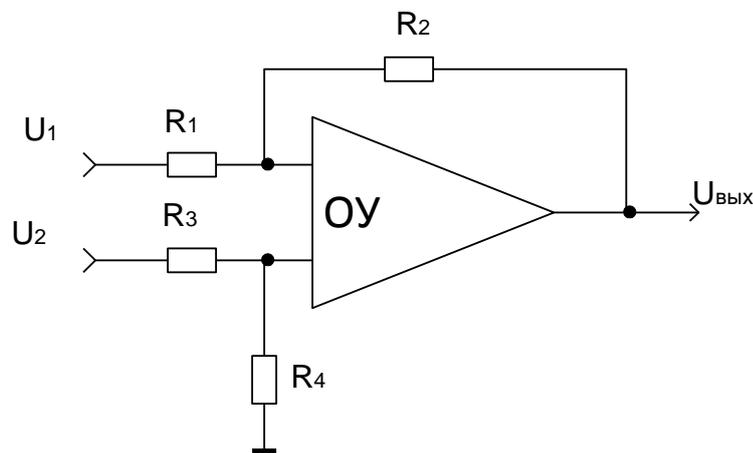


$$U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = K_u = (R_2 + R_1)/R_1 = 1 + R_2/R_1$$

### 5.3. Повторитель напряжения

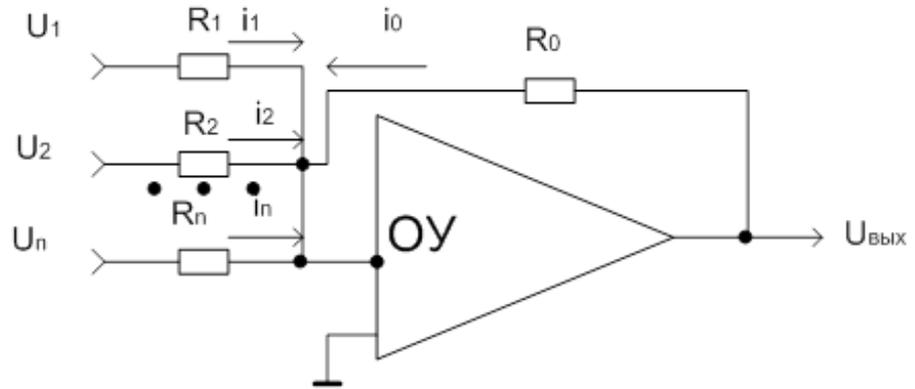


### 5.4. Дифференциальный усилитель



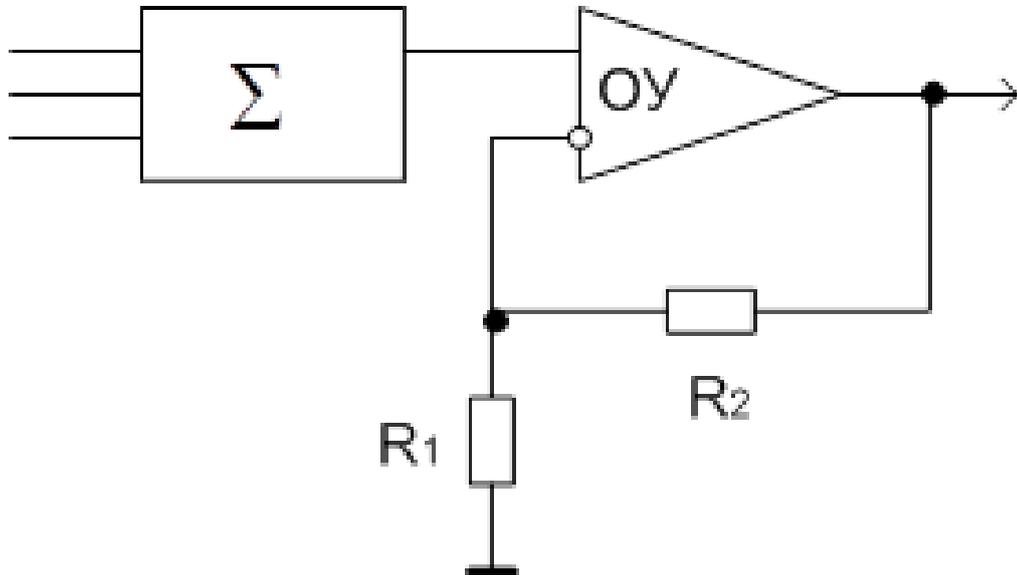
$$U_{\text{ВЫХ}} = U_2 \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} - U_1 \frac{R_2}{R_1}$$

### 5.5. Инвертирующий сумматор

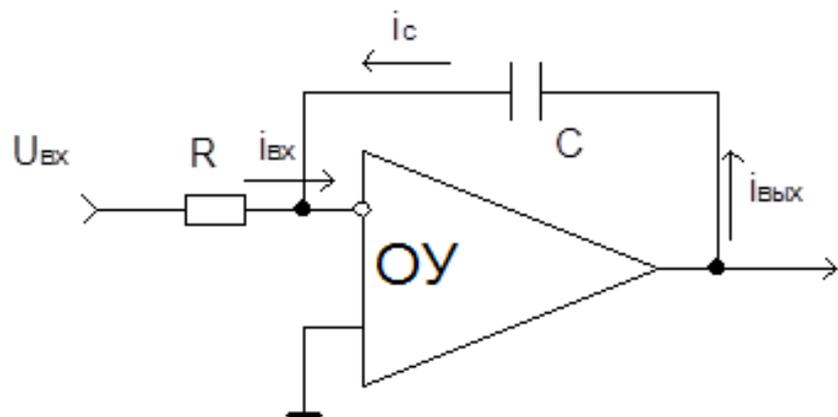


$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(\frac{R_0}{R_1}U_1 + \dots + \frac{R_0}{R_n}U_n\right)$$

### 5.6. Не инвертирующий сумматор



### 5.7. Интегратор

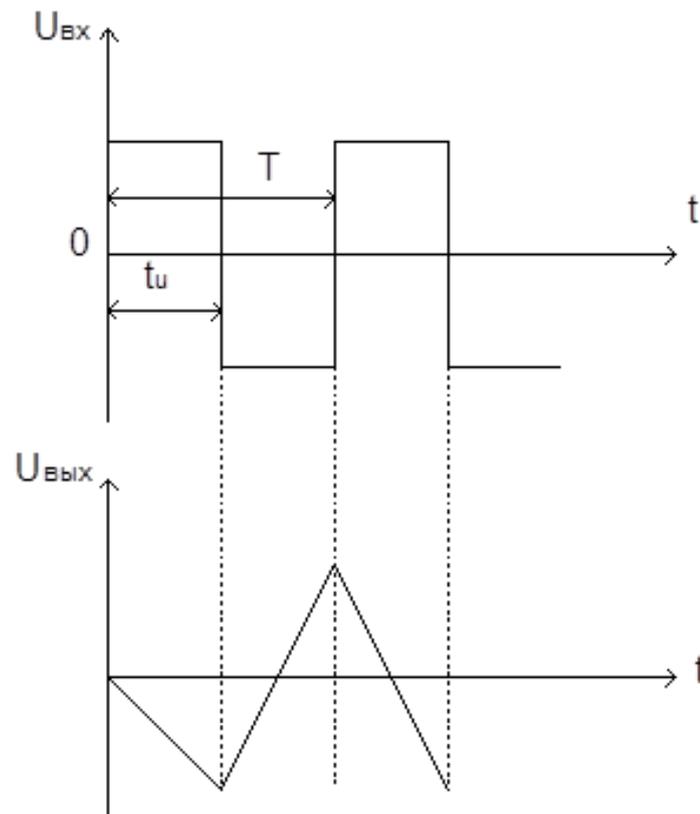


Интегратор:

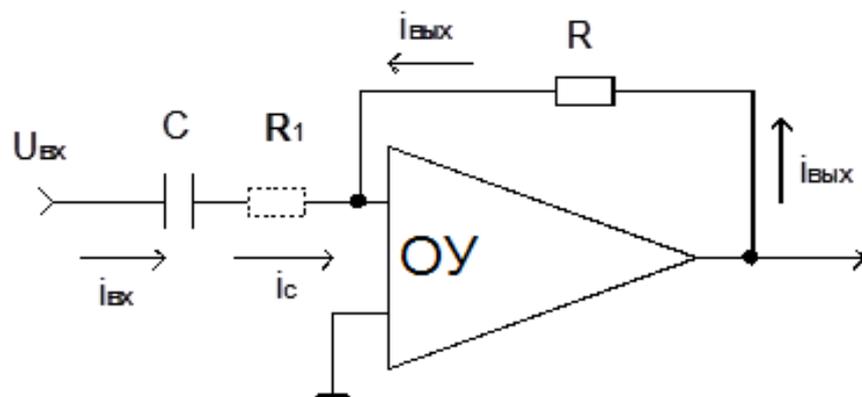
- $i_{\text{ВХ}} = -i_{\text{с}}$
- $i_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}(t)/R$
- $i_{\text{с}} = dq_{\text{с}}/dt = d(CU_{\text{с}})/dt$

- $U_C = U_{\text{ВЫХ}}(t) \rightarrow I_C = C(dU_{\text{ВЫХ}}(t)/dt)$
- $U_{\text{ВХ}}(t)/R = -C(dU_{\text{ВЫХ}}(t)/dt)$
- $U_{\text{ВЫХ}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{ВХ}}(t) dt$
- $RC = \tau$  – постоянная времени интегрирования.
- ОУ с емкостью в цепи ОС выполняет функции идеального интегрирования.

Диаграмма сигналов интегратора



### 5.8. Схема дифференцирования на ОУ

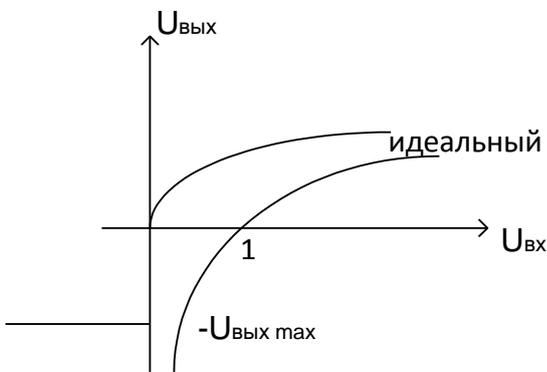
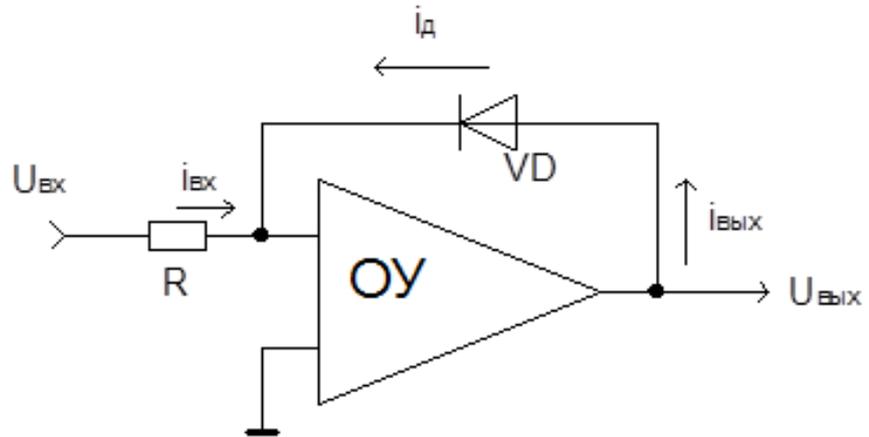


Дифференциатор

- $i_C = -i_{\text{ВЫХ}}$
- $i_C = i_{\text{ВХ}} = C \cdot (dU_{\text{ВХ}}(t)/dt)$
- $i_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}(t)/R$
- $U_{\text{ВЫХ}}(t) = -RC(dU_{\text{ВХ}}(t)/dt)$

$RC = \tau_d$  – постоянная времени дифференцирования.

### 5.9. Логарифматор на ОУ



$$i_{вх} = -i_d$$

$$i_{вх} = U_{вх}/R$$

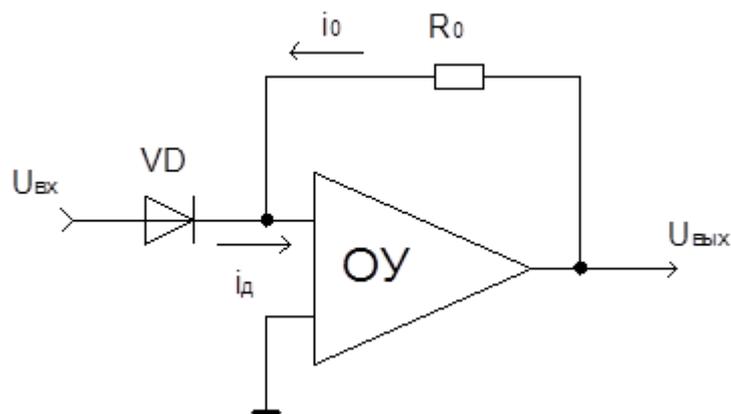
$$i_d = I_0 \text{обрнас} * e^{U_d/\phi T} \text{ – при прямом включении}$$

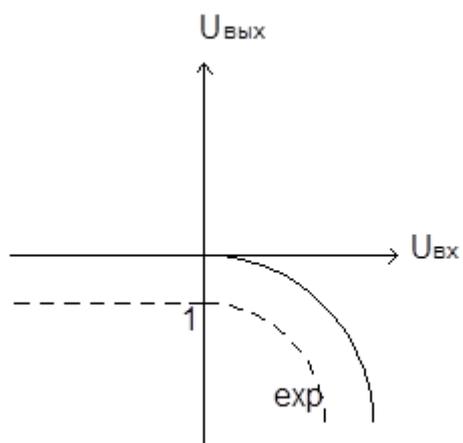
$$U_d = U_{вых}$$

$$U_{вх}/R = -I_0 e^{U_{вых}/\phi T}$$

$$U_{вых} = \phi T \ln(-U_{вх}/I_0 R) \text{ - если } U_{вх} < 0.$$

### 5.10. Схема потенцирования на ОУ (антилогарифмирования):

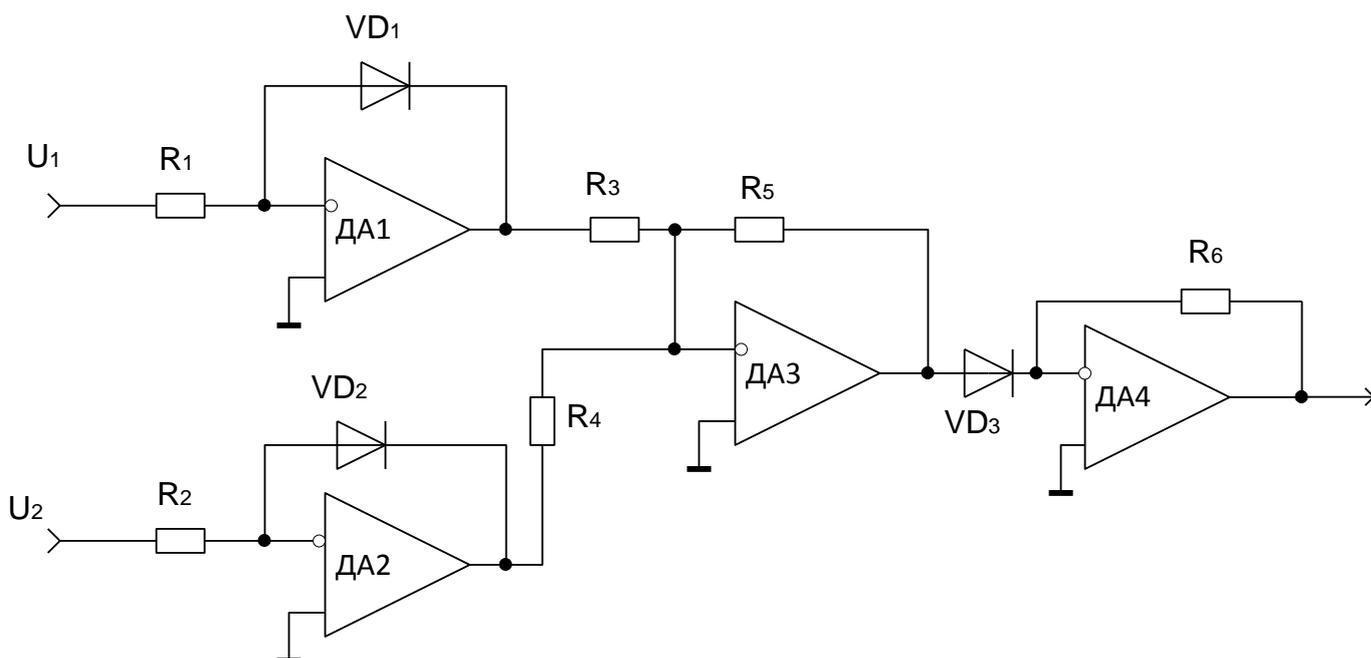




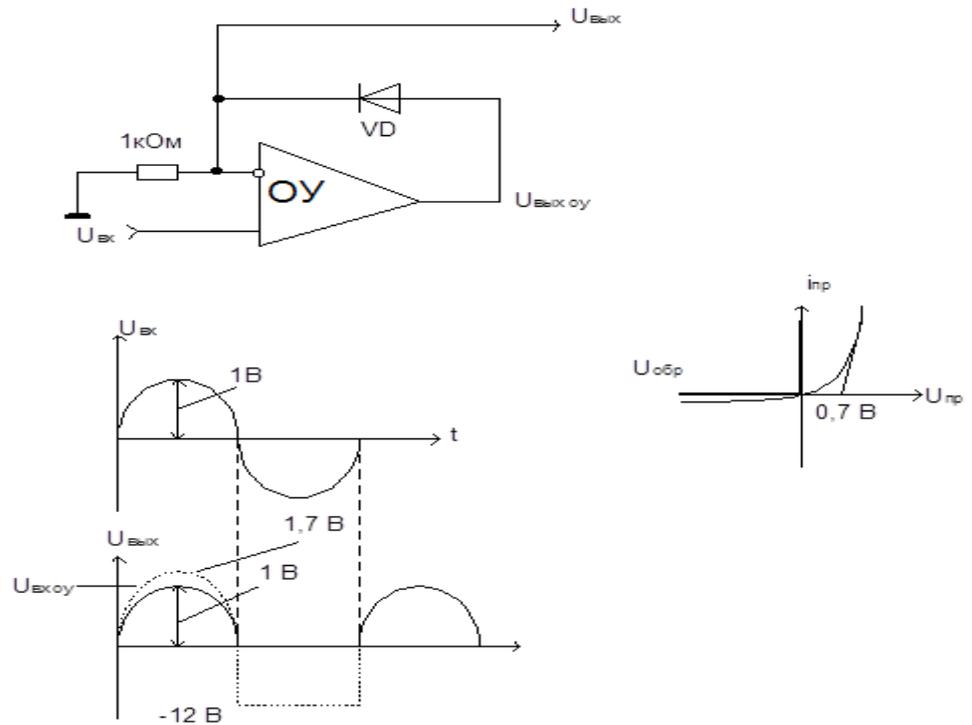
- $i_d = -i_0$
- $i_0 = U_{\text{ВЫХ}}/R_0$
- $i_d = I_{0H}e^{U_d/\varphi T}$
- $U_d = U_{\text{ВХ}}$
- $U_{\text{ВЫХ}} = - (I_{0H} * R_0)e^{U_{\text{ВХ}}/\varphi T}$

### 5.11. Схема умножения:

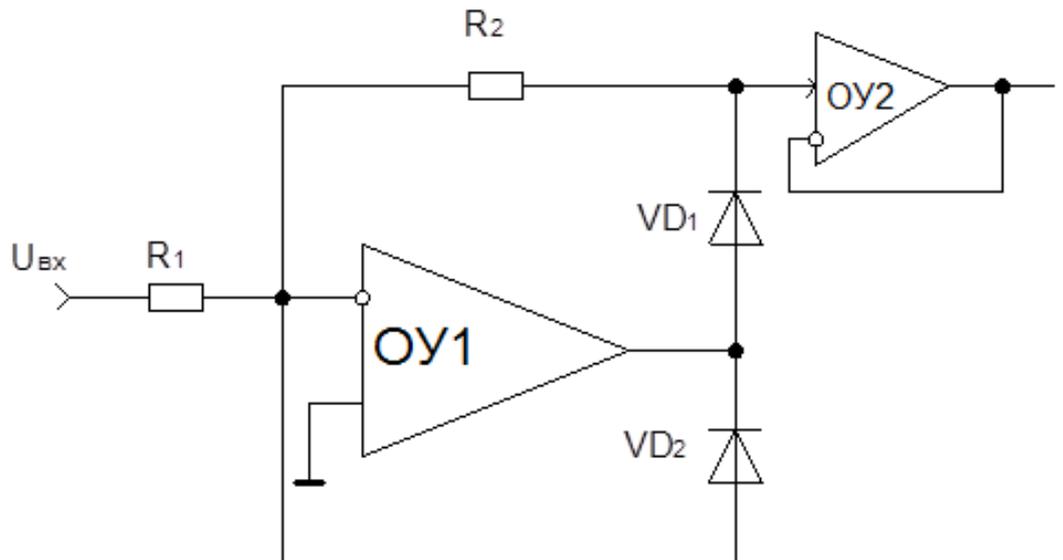
$$U_{\text{ВЫХ}} = R * U_1 * U_2 = k * e^{\ln(U_1 * U_2)} = k * \exp(\ln U_1 + \ln U_2)$$



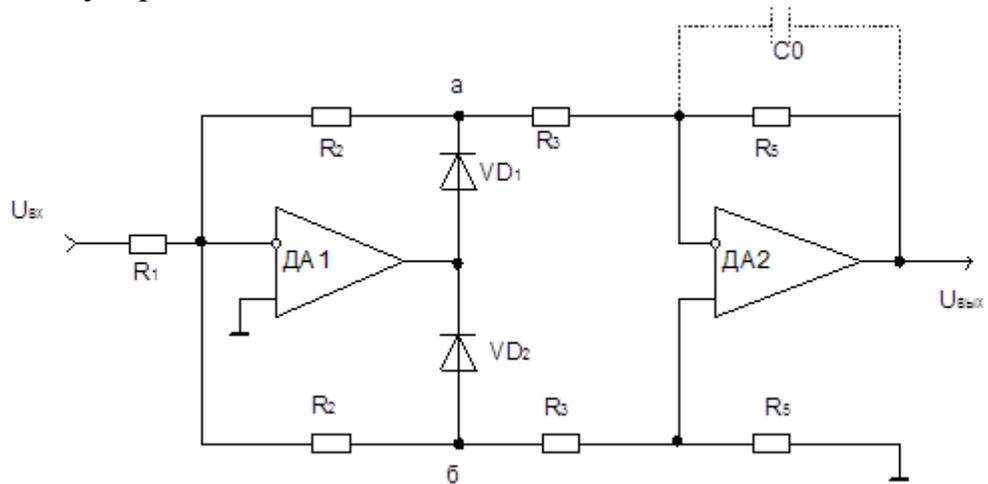
## 5.12. Схемы выделения модуля сигнала



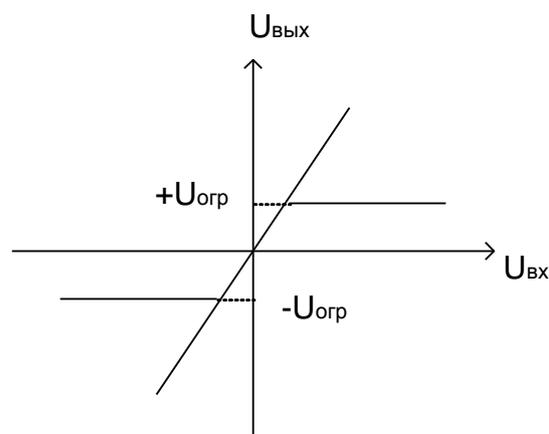
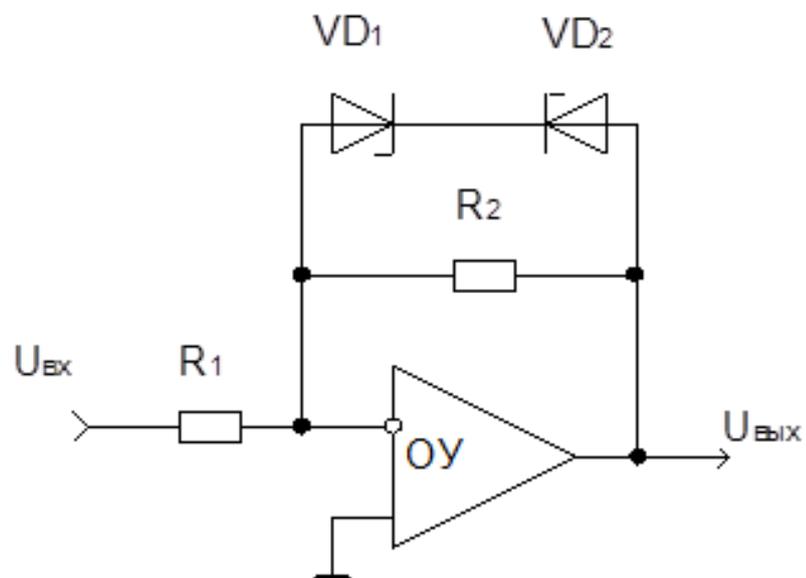
Инвертирующая схема



## Двухполупериодная схема



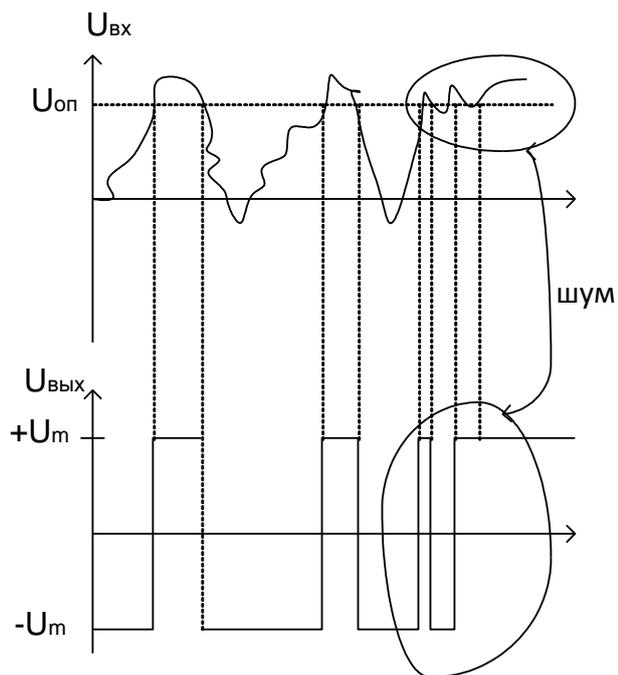
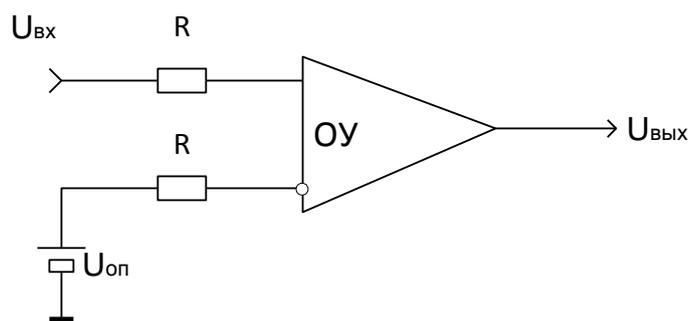
## 5.13. Усилитель – ограничитель



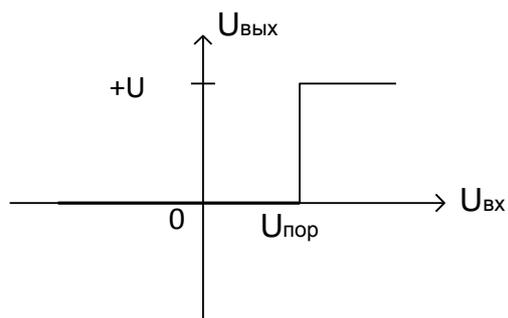
## 5.14. Компаратор

$U_{вх} > U_{пор}$ ,  $U_{вых} = \langle 1 \rangle$ ;

$U_{вх} < U_{пор}$ ,  $U_{вых} = \langle 0 \rangle$ .

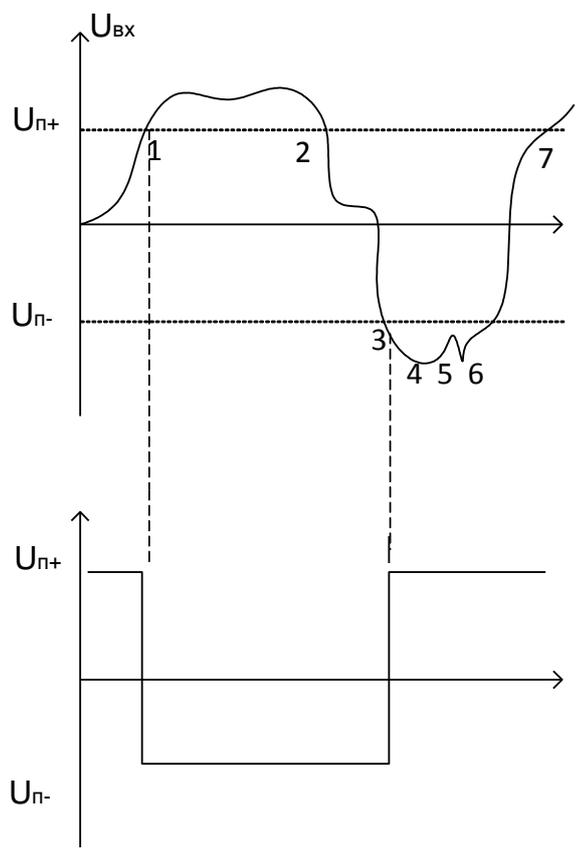
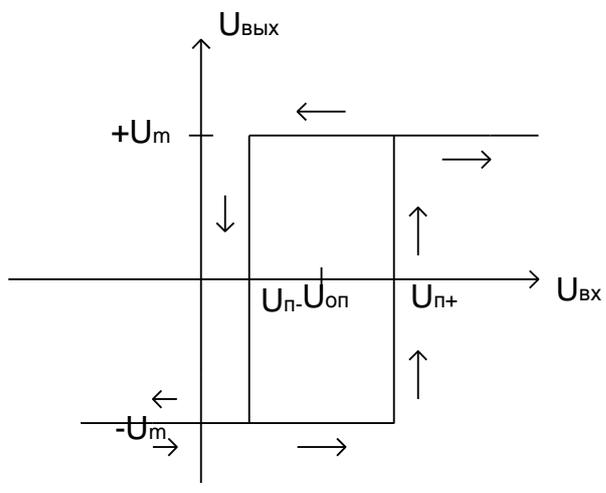
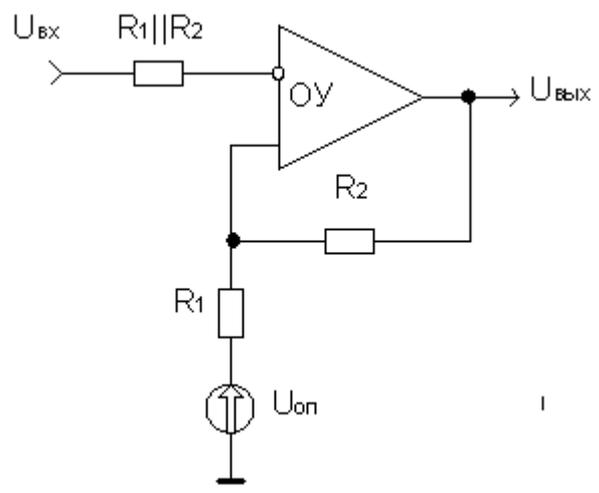


идеальный компаратор



Компаратор с положительной ОС:

$$U_{\text{ср}} = \frac{(U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{оп}})R_1}{R_1 + R_2} + U_2$$



## 6. Активные фильтры

Активные фильтры можно разделить на группы по различным признакам:

- Назначению;
- Полосе пропускаемых частот;
- Типу усилительных элементов;
- Виду обратных связей и др.

По полосе пропускаемых частот фильтры делятся на четыре основные группы:

- Нижних частот;
- Верхних частот;
- Полосовые;
- Заграждающие.

Фильтры нижних частот пропускают сигналы от постоянного напряжения до некоторой предельной частоты, называемой частотой среза фильтра.

Фильтры верхних частот начиная с частоты среза, и выше.

Полосовые фильтры пропускают сигналы в некоторой полосе частот от  $f_1$  до  $f_2$ , а заграждающие фильтры имеют характеристику, противоположную полосовым, и пропускают сигналы с частотой ниже  $f_1$  и выше  $f_2$ .

Как полосовые, так и заграждающие фильтры могут иметь гребенчатую частотную характеристику, в которой будет несколько полос пропускания и затухания.

По назначению фильтры делятся на:

- сглаживающие фильтры источников питания;
- заграждающие фильтры помех;
- фильтры для селективных усилителей низкой или высокой частоты и др.

По типу усилительных элементов можно выделить:

- транзисторные фильтры;
- фильтры на усилителях с ограниченным усилением;
- на операционных усилителях;
- на повторителях напряжения и др.

Фильтры могут иметь одну цепь обратной связи или несколько.

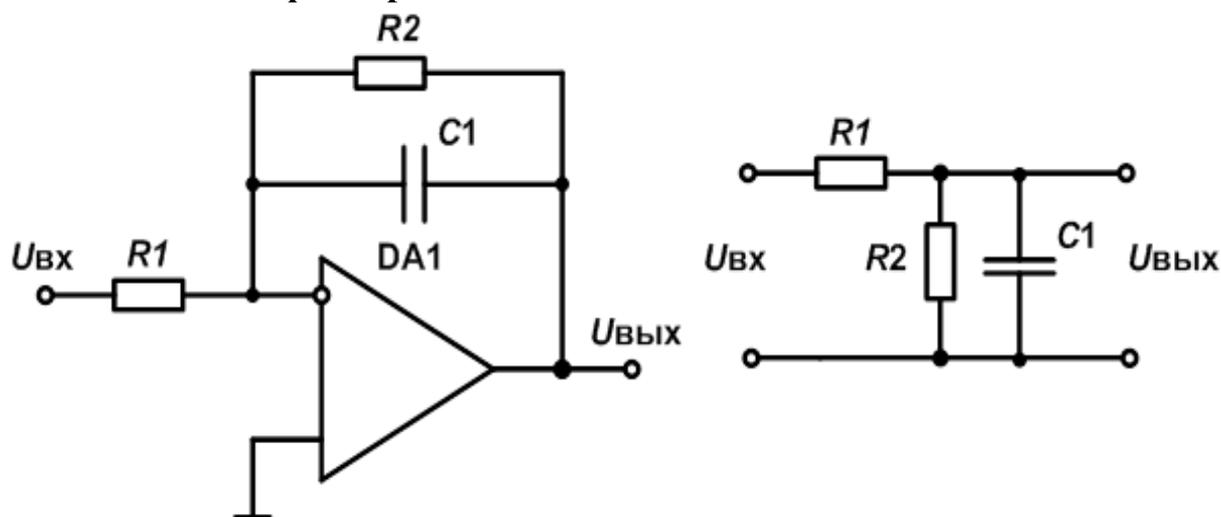
В связи с этим различают фильтры с одноконтурной и с многоконтурной обратной связью.

Кроме этого, различают фильтры по числу полюсов на частотной характеристике - фильтры первого порядка, второго и более высоких порядков.

Фильтры высоких порядков имеют более крутые границы полос пропускания и затухания и более плоскую характеристику в области полосы пропускания, что естественно улучшает качество фильтра.

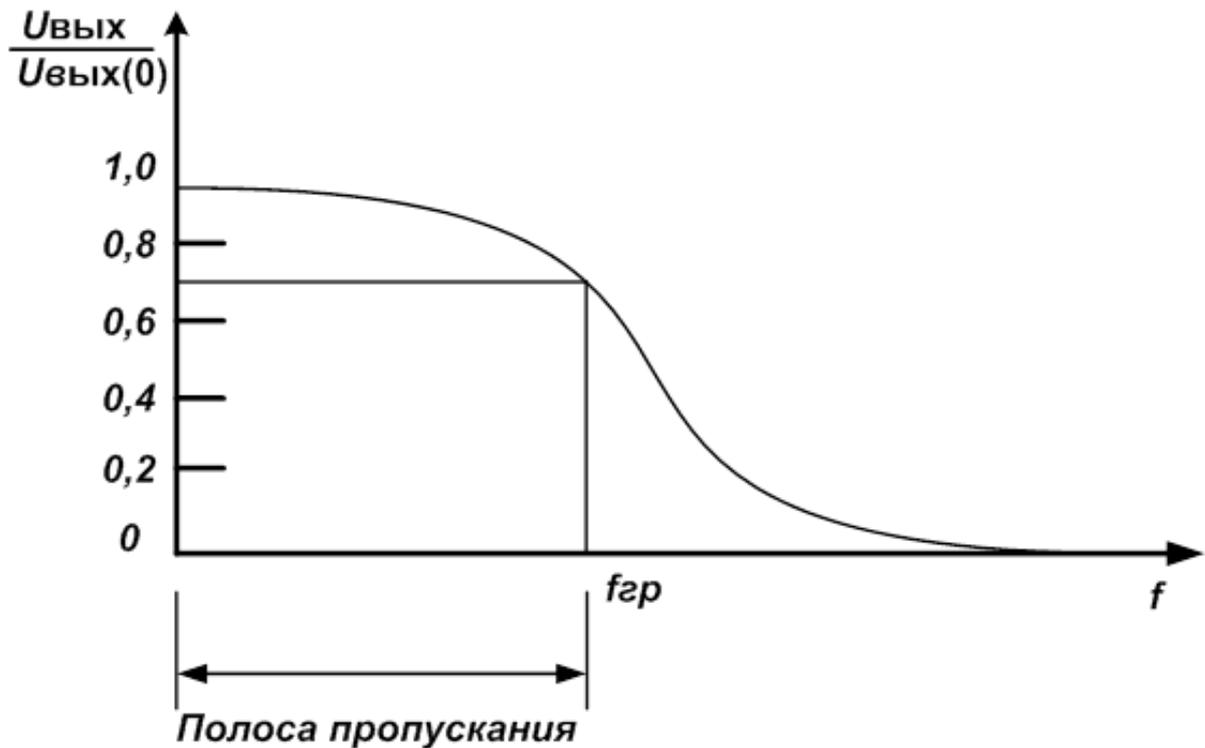
К таким фильтрам относятся фильтры Чебышева, Баттерворта, Бесселя и др.

### 6.1. Схема фильтра низких частот:



Фильтр нижних частот (ФНЧ) с одноконтурной обратной связью предназначен для выделения сигналов, частота которых ниже некоторой заданной частоты, называемой частотой среза фильтра. ФНЧ практически без ослабления пропускает сигналы в полосе частот от постоянного напряжения до частоты среза и ослабляет сигналы, частота которых выше частоты среза.

Амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот первого порядка:



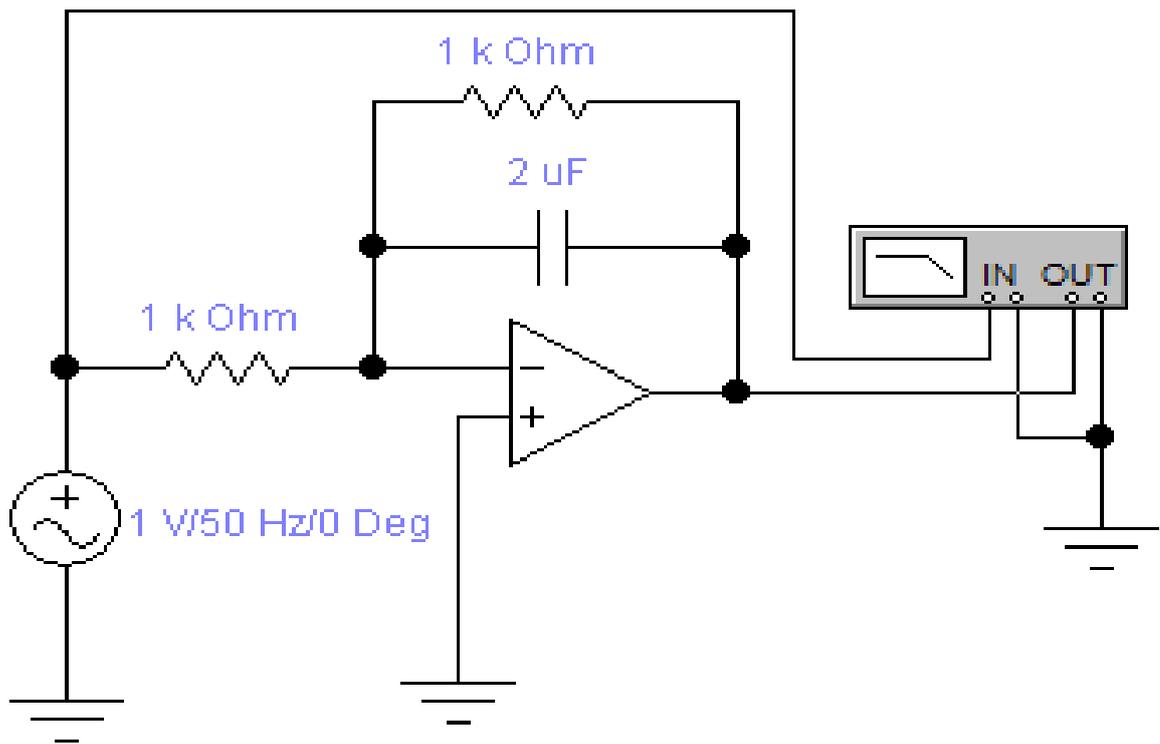
коэффициент передачи для фильтра низких частот (ФНЧ):

$$K(\omega) = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{(\omega C_1 \cdot R_2 + 1)}$$

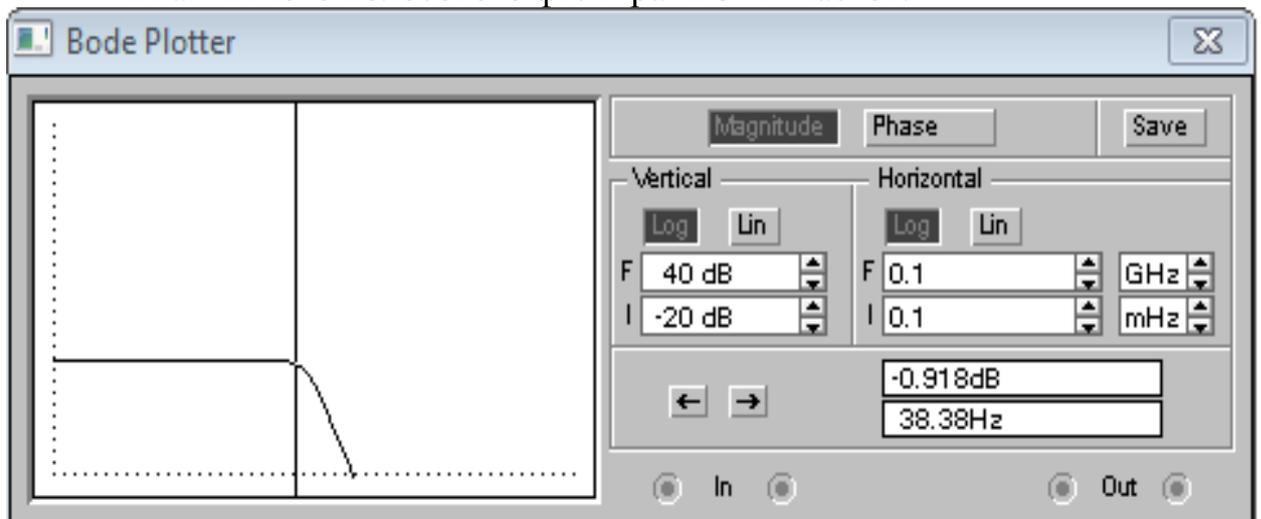
$$K(p) = \frac{R_2 / R_1}{1 + \omega_c \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot p}$$

$$f_{cp} = \frac{\omega_c}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_1}$$

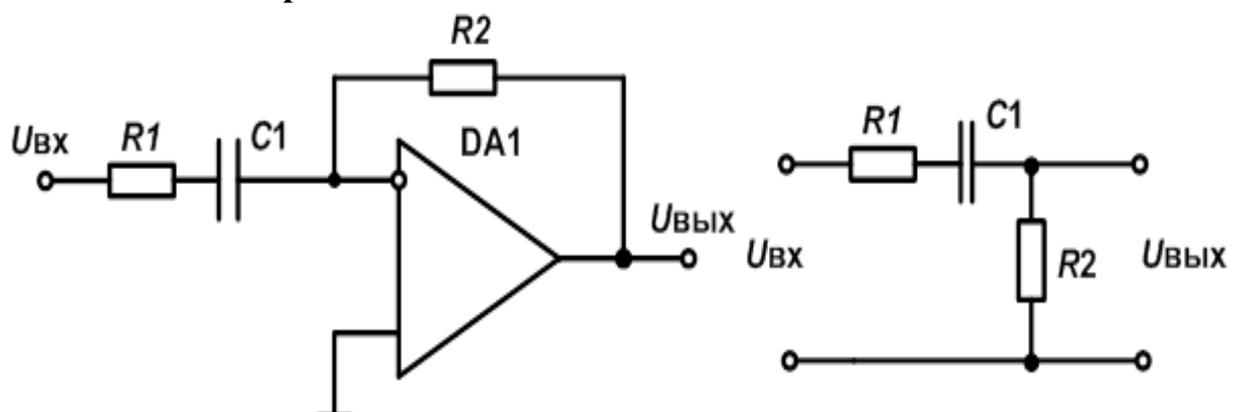
Схема активного фильтра низких частот в среде Electronics Workbench:



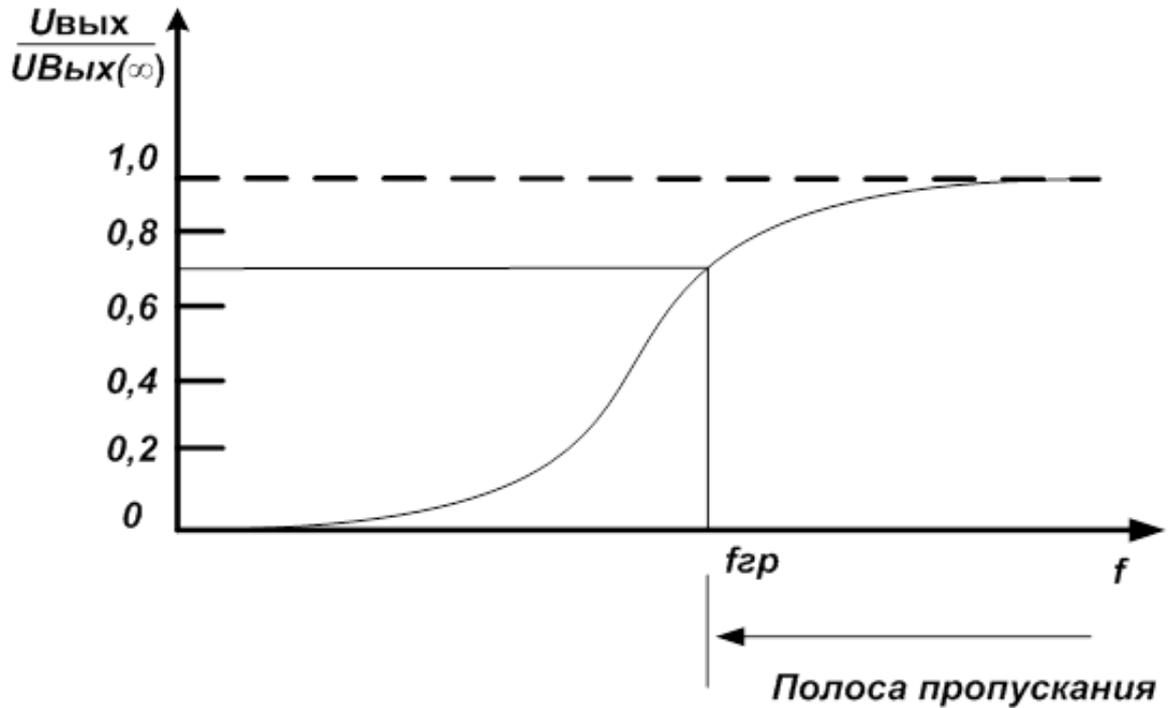
АЧХ активного полосового фильтра низких частот:



## 6.2. Фильтры высоких частот:



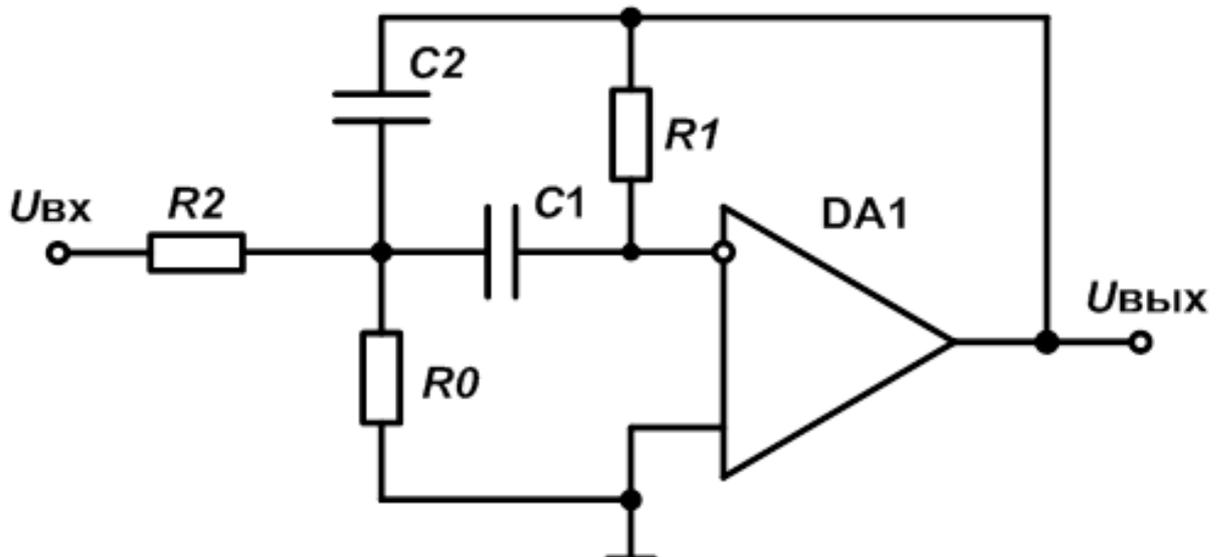
Частотная характеристика активного фильтра верхних частот:



### 6.3. Полосовые фильтры

Предназначены для выделения сигналов, частота которых лежит в пределах некоторой полосы  $\omega_{01} < \omega < \omega_{02}$ . При этом он практически без ослабления пропускает сигналы, лежащие в этой полосе, и ослабляет сигналы, частоты которых лежат за пределами полосы пропускания. Они могут быть широкополосными и узкополосными.

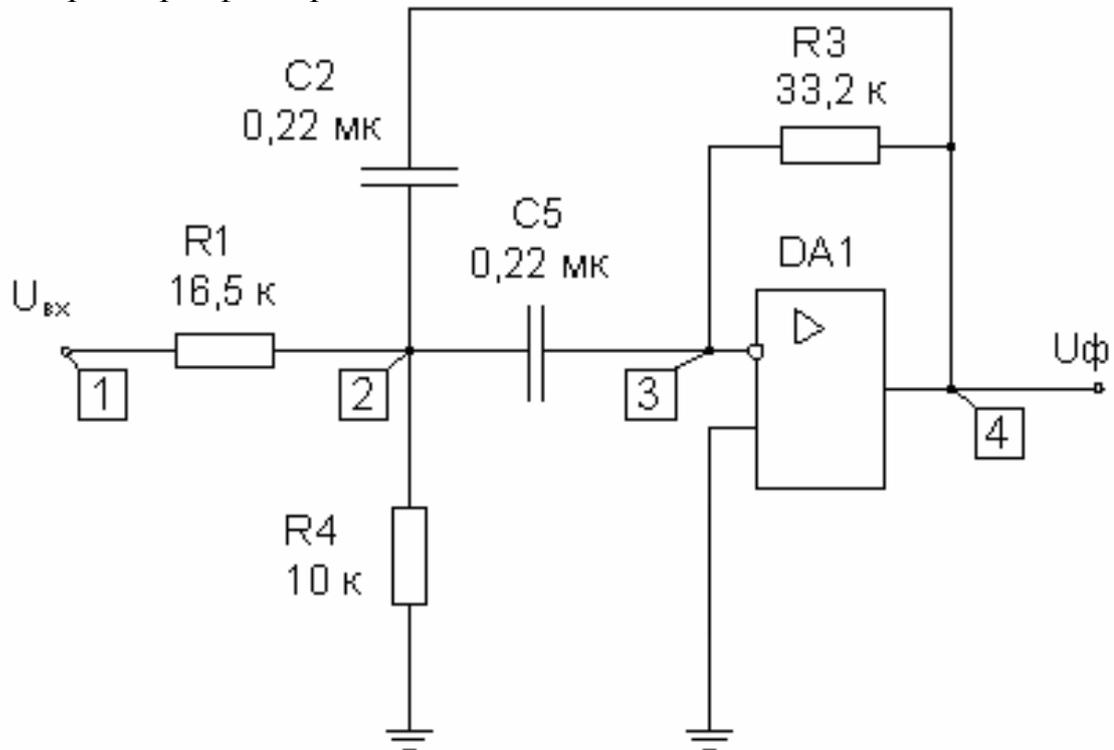
Схема активного полосового фильтра с многопетлевой обратной связью:



Передаточная функция звена

$$W(p) = - \frac{R_2 R_1 C_1 p}{R_2 R_0 R_1 C_2 C_1 p^2 + (R_0 R_2 C_1 + R_0 R_2 C_2) p + R_2 + R_0}$$

Параметры фильтра МТЗ:



Система уравнений, полученная с помощью метода узловых потенциалов:

$$U_{\phi} = C2 \int I2 * dt + U2;$$

$$U2 = C5 \int I5 * dt ;$$

$$I5 = -I3 = -\frac{U_{\phi}}{R3};$$

$$I2 = -I1 + I4 + I5;$$

$$I1 = \frac{U_{BX} - U2}{R1};$$

$$I4 = \frac{U2}{R4}.$$

## 7. Логические интегральные схемы

### Серия КР1554

Быстродействующие цифровые логические КМОП микросхемы серии КР1554 предназначены для использования в высокопроизводительных системах обработки информации широкого применения. Высокое быстродействие в сочетании с низкой потребляемой мощностью и большой нагрузочной способностью, широкий набор интерфейсных микросхем серии КР1554 позволяют создавать вычислительные устройства и устройства цифровой автоматики с качественно новыми характеристиками и высокими технико-экономическими показателями.

Микросхемы изготавливаются по КМОП технологии с окисной изоляцией, двухуровневой металлизацией, поликремниевым затвором шириной 1,4 мкм. Конструктивно микросхемы оформлены в пластмассовые корпуса типа DIP с шагом 2,5 мм, с количеством выводов от 14 до 24 и стандартным расположением выводов "питание", "земля".

Зарубежный аналог — серия 74АСxxx "FAST" фирмы "NATIONAL" (США).

### Технические характеристики

Стандартные КМОП входные и выходные уровни сигналов

Диапазон напряжений питания  
2В — 6В КМОП

Задержка на вентиль 3,5 нс

Тактовая частота до 150 МГц

Большой выходной ток нагрузки  
низкого и высокого уровней 24 мА

Гарантированные характеристики  
в диапазоне температур от -45°C до +85°C и напряжений питания  $5В \pm 10\%$ ,  $3,3 \pm 0,3В$

Высокая устойчивость к статическому электричеству и защелкиванию

Возможность работы на нагрузку  
50 Ом

## 7.1. КР1554ЛН1 – 6 логических элементов НЕ

Расположение выводов

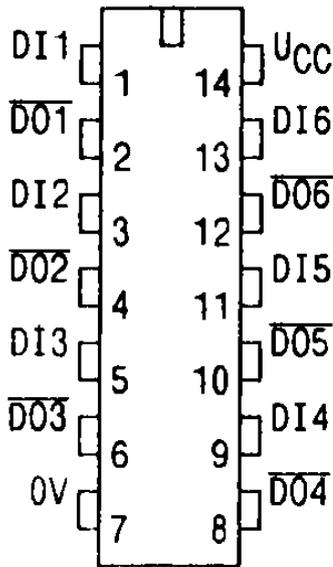


Таблица назначения выводов

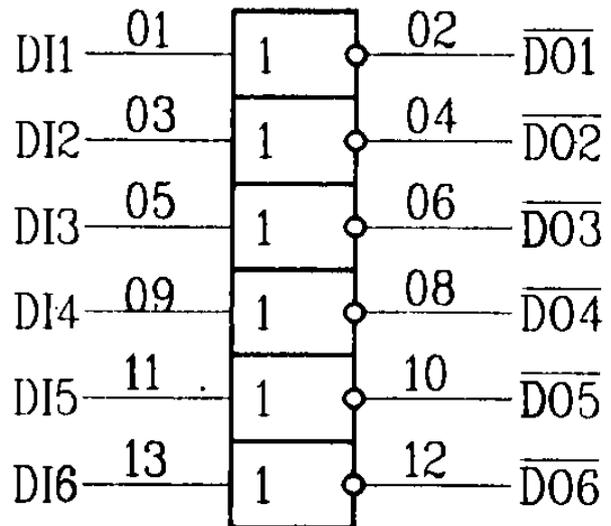
1	DI1	Вход информационный
2	D01	Выход информационный
3	DI2	Вход информационный
4	D02	Выход информационный
5	DI3	Вход информационный
6	D03	Выход информационный
7	0V	Общий вывод
8	D04	Выход информационный
9	DI4	Вход информационный
10	D05	Выход информационный
11	DI5	Вход информационный
12	D06	Выход информационный
13	DI6	Вход информационный
14	UCC	Напряжение питания

Таблица истинности

Входы	Выходы
DI <sub>n</sub>	$\overline{D0n}$
H	L
L	H

H – высокий уровень напряжения  
L – низкий уровень напряжения

Условно-графическое обозначение



Статические характеристики КР1554ЛН1

Обозначение	Параметр	Режим измерения	UCC*	T=25°C C <sub>L</sub> =50пФ		T <sub>a</sub> =-45+85°C C <sub>L</sub> =50пФ		Ед. изм.
				Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	
U <sub>IH</sub>	Входное напряжение высокого уровня		3,0 4,5 5,5	2,1 3,15 3,85		2,1 3,15 3,85		В

Обозначение	Параметр	Режим измерения	U <sub>CC</sub> *	T=25°C C <sub>L</sub> =50пФ		T <sub>a</sub> =-45+85°C C <sub>L</sub> =50пФ		Ед. изм.
				Мин.	Макс.	Мин.	Макс.	
U <sub>IL</sub>	Входное напряжение низкого уровня		3.0 4.5 5.5		0.9 1.35 1.65		0.9 1.35 1.65	В
U <sub>OH</sub>	Выходное напряжение высокого уровня	U <sub>I</sub> =U <sub>IH</sub> или U <sub>IL</sub>	I <sub>OH</sub> =-50мкА	3.0	2.9		2.9	В
				4.5	4.4		4.4	
				5.5	5.4		5.4	
				3.0	2.56		2.4	
				4.5	3.86		3.7	
				5.5	4.86		4.7	
U <sub>OL</sub>	Выходное напряжение низкого уровня	U <sub>I</sub> =U <sub>IL</sub>	I <sub>OH</sub> =-50мкА	3.0		0.1	0.1	В
				4.5		0.1	0.1	
				5.5		0.1	0.1	
				3.0		0.32	0.4	
				4.5		0.32	0.4	
				5.5		0.32	0.4	
I <sub>I</sub>	Входной ток	U <sub>I</sub> =U <sub>CC</sub> или GND	5.5		±0.1		±1.0	мкА
I <sub>CC</sub>	Ток потребления	U <sub>I</sub> =U <sub>CC</sub> или GND	5.5		4.0		40	мкА
I <sub>OL</sub>	Выходные токи **	U <sub>OL</sub> =1, 1В	5.5			86		мА
I <sub>OH</sub>		U <sub>OH</sub> =3, 85В	5.5			-75		

Примечания: \* - диапазон напряжений питания 3,3В±0,3В; 5,0В±0,5В  
 \*\* - длительность воздействия режима не более 20 мс

### Динамические характеристики КР1554ЛН1

Обозначение	Параметр	U <sub>CC</sub> *	T=25°C C <sub>L</sub> =50пФ	T <sub>a</sub> =-45+85°C C <sub>L</sub> =50пФ	Ед. изм.
			Макс.	Макс.	
t <sub>pHL</sub>	Время задержки распространения сигнала при включении	3.0 4.5	8.5 6.5	9.5 7.0	нс
t <sub>pLH</sub>	Время задержки распространения сигнала при выключении	3.0 4.5	9.0 7.0	10.0 7.5	нс

Примечание: \* - диапазон напряжений питания 3,3В±0,3В; 5,0В±0,5В

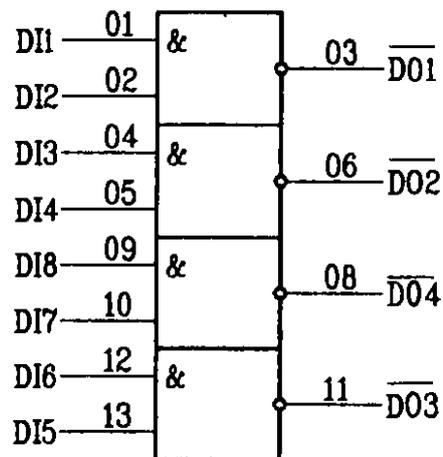
## 7.2. КР1554ЛА3 – 4 логических элементов 2И-НЕ

Таблица истинности

Входы		Выходы
D1X	D1Y	$\overline{D\emptyset}$
L	L	H
L	H	H
H	L	H
H	H	L

H – высокий уровень напряжения  
L – низкий уровень напряжения

Условно-графическое обозначение



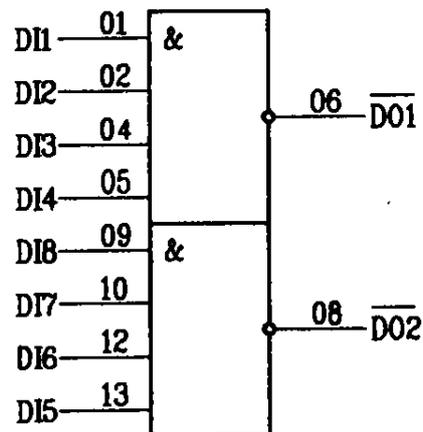
## 7.3. КР1554ЛА1 – 2 логических элемента 4И-НЕ

Таблица истинности

Входы				Выходы
D1A	D1B	D1C	D1D	$\overline{D\emptyset}$
L	X	X	X	H
X	L	X	X	H
X	X	L	X	H
X	X	X	L	H
H	H	H	H	L

H – высокий уровень напряжения  
L – низкий уровень напряжений

Условно-графическое обозначение



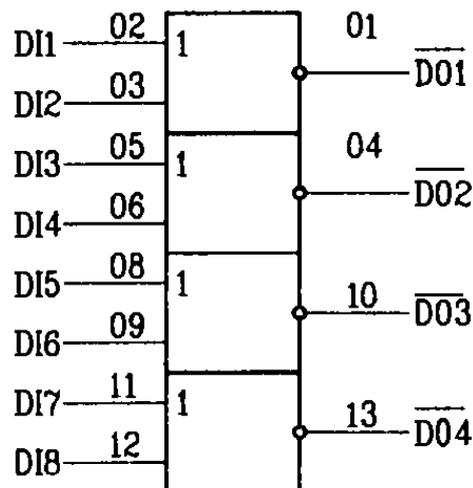
### 7.4. КР1554ЛЕ1 – 4 x 2ИЛИ-НЕ

Таблица истинности

Входы		Выходы
Дп.1	Дп.2	$\overline{Дп}$
L	L	H
L	H	L
H	L	L
H	H	L

H – высокий уровень  
напряжения  
L – низкий уровень  
напряжения

Условно-графическое обозначение



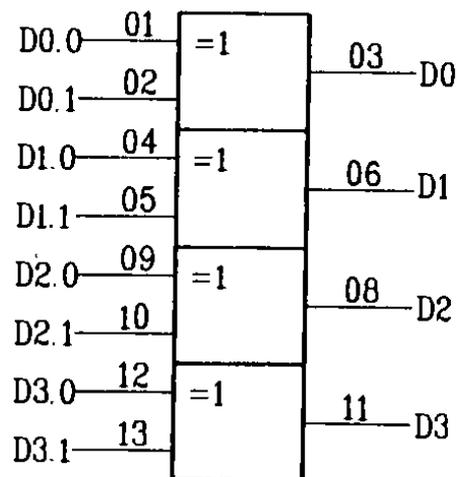
### 7.5. КР1554ЛП5 – 4 x Исключающее ИЛИ

Таблица истинности

Входы		Выходы
Дп.0	Дп.1	Дп
H	H	L
L	H	H
H	L	H
L	L	L

H – высокий уровень  
напряжения  
L – низкий уровень  
напряжения

Условно-графическое обозначение



## 7.6. КР1554АТВ9 – 2 х JK-триггера с управляемым отрицательным фронтом с входами сброса и установки

Таблица истинности

Вход					Выход	
$\bar{S}$	$\bar{R}$	$\bar{C}$	J	K	D	$\bar{D}$
L	H	X	X	X	H	L
H	L	X	X	X	L	H
L	L	X	X	X	Запрещено	
H	H	↓	L	L	D0	$\bar{D}0$
H	H	↓	H	L	H	L
H	H	↓	L	H	L	H
H	H	↓	H	H	Счетный режим	
H	H	H	X	X	D0	$\bar{D}0$

H – высокий уровень напряжения  
 L – низкий уровень напряжения  
 X – неопределенное состояние (H или L)  
 ↓ – перепад входного напряжения (H → L)

Условно-графическое обозначение

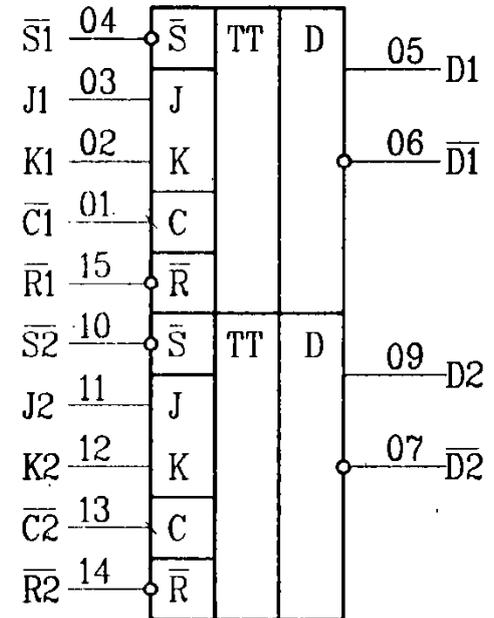
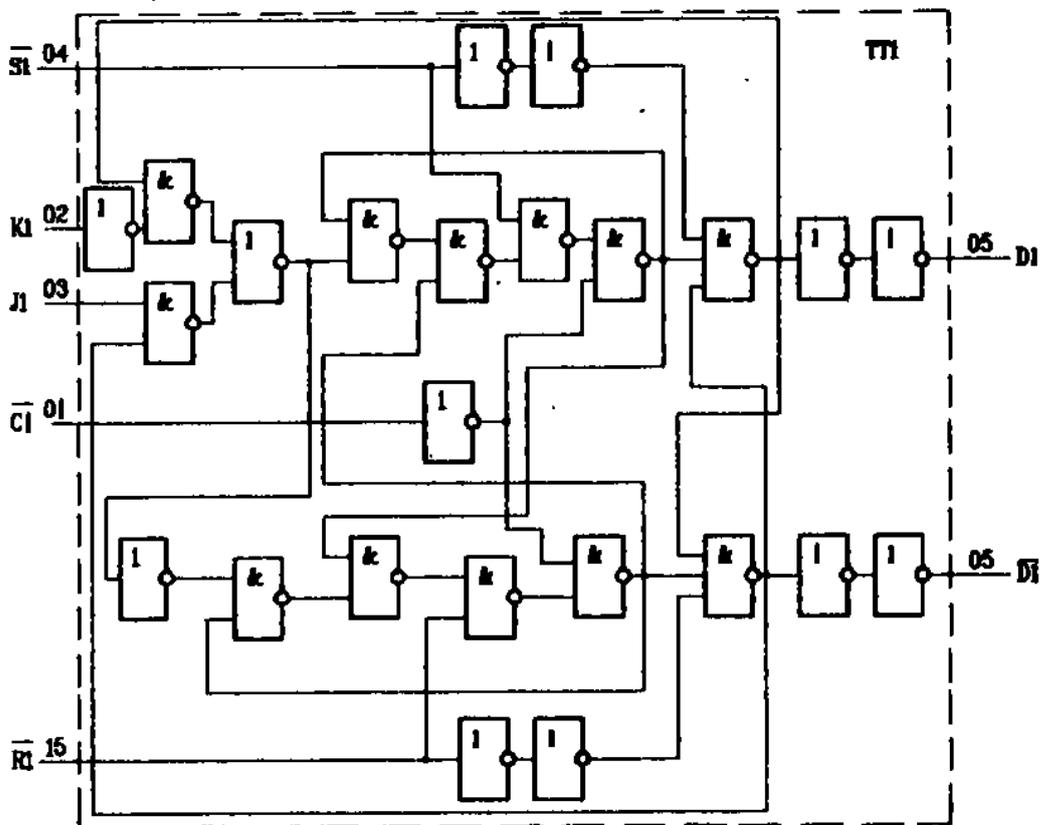


Схема электрическая функциональная

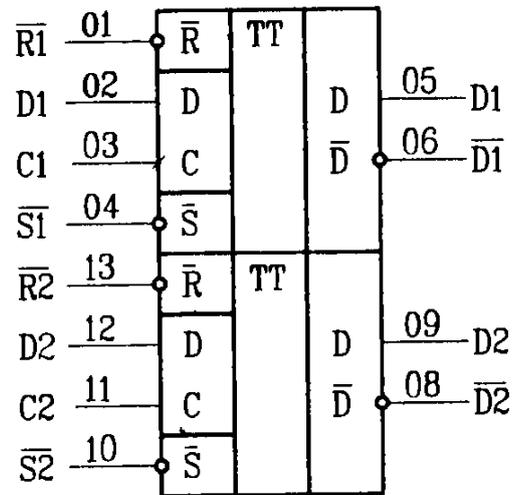


### 7.7. КР1554ТМ2 – 2 х D-триггера с управляемым положительным фронтом с входами сброса и установки

Таблица истинности

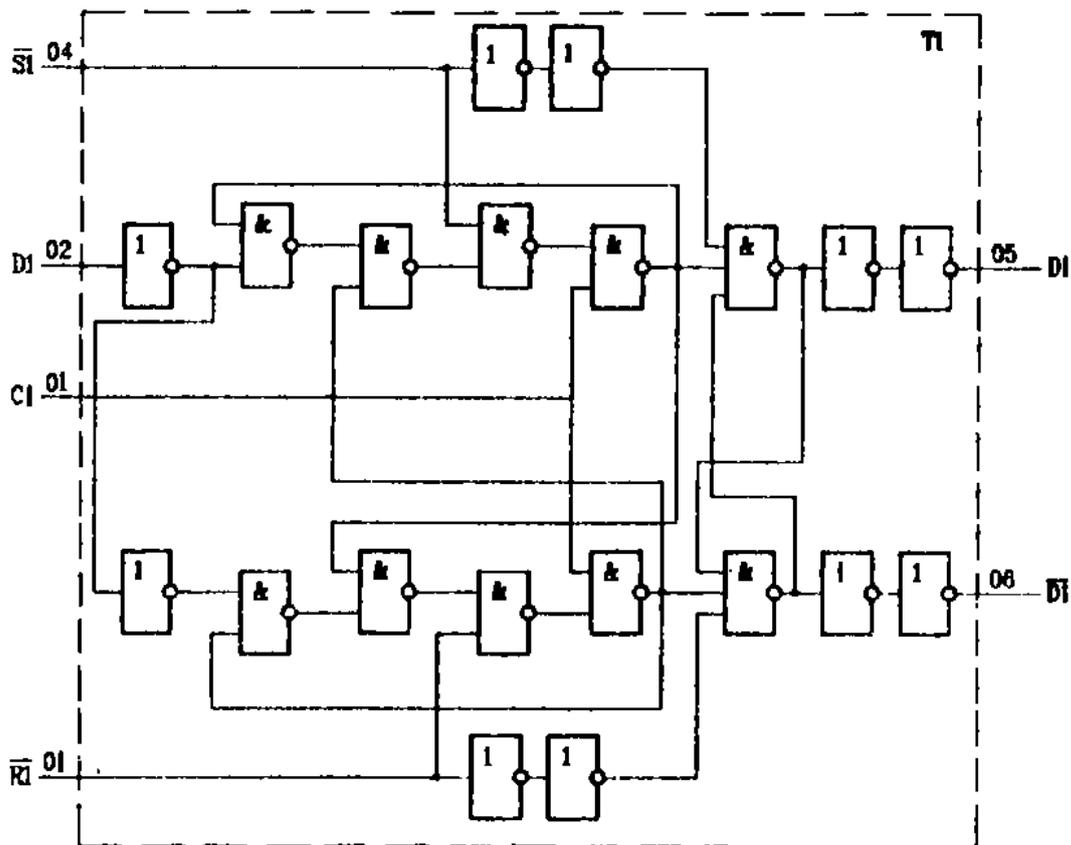
Вход				Выход	
$\bar{S}$	$\bar{R}$	C	D	D	$\bar{D}$
L	H	X	X	H	L
H	L	X	X	L	H
L	L	X	X	Запрещено	
H	H	$\lceil$	H	H	L
H	H	$\lceil$	L	L	H
H	H	L	X	D0	$\bar{D}0$

Условно-графическое обозначение



- H - высокий уровень напряжения
- L - низкий уровень напряжения
- X - неопределенное состояние (H или L)
- $\lceil$  - перепад входного напряжения (L → H)

Схема электрическая функциональная



## 7.8. КР1554ИР22 – 8-ми разрядный регистр

Таблица истинности

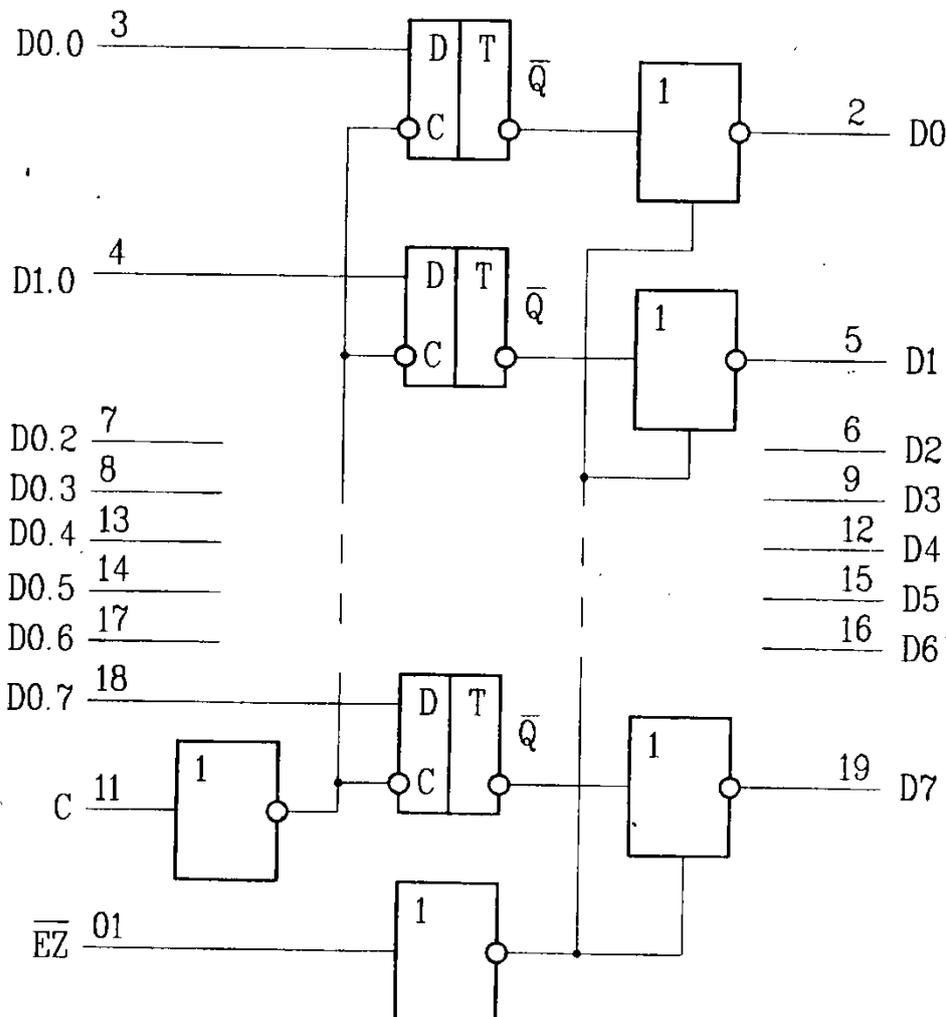
Режим	Входы			Выход
	EZ	C	D0	D
Запись	L	H	H	H
Запись	L	H	L	L
Хранение	L	L	X	D0
Состояние высокого импеданса выхода	H	X	X	Z

H - высокий уровень напряжения  
 L - низкий уровень напряжения  
 X - неопределенное состояние (H или L)  
 Z - состояние высокого импеданса

Условно-графическое обозначение

D0.0	03	0	RG	D	0	02	D0
D0.1	04	1		1	1	05	D1
D0.2	07	2		2	2	06	D2
D0.3	08	3		3	3	09	D3
D0.4	13	4		4	4	12	D4
D0.5	14	5		5	5	15	D5
D0.6	17	6		6	6	16	D6
D0.7	18	7		7	7	19	D7
C	11	C		U	20	U	
EZ	01	EZ		0V	10	0V	

Схема электрическая функциональная



## 7.9. КР1554ИР51 – 4-х разрядный последовательно-параллельный регистр

Таблица истинности по последовательному входу

С	Входы			Выход D	
	J	K	R	$t_{n-1}$	$t_n$
	L	L	L	X	L
	H	H	L	X	H
	L	H	L	X	без изменений
	H	L	L	D	$\bar{D}$
X	X	X	L	L	без изменений
X	X	X	H	L	L

Условно-графическое обозначение

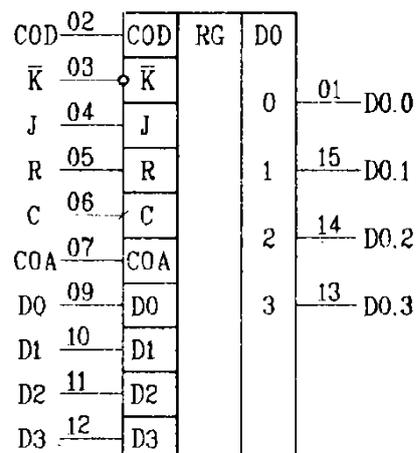


Таблица истинности для параллельных входов

С	Входы				Выходы			
	D0	D1	D2	D3	D0.0	D0.1	D0.2	D0.3
	H	H	H	H	H	H	H	H
	L	L	L	L	L	L	L	L
	X	X	X	X	без изменений			

Примечания: COA=1 разрешение параллельной записи числа  
 COA=0 разрешение последовательной записи числа  
 COD=1 прямой выход числа  
 COD=0 инверсный выход числа  
 H – высокий уровень напряжения  
 L – низкий уровень напряжения  
 X – неопределенное состояние (H или L)

– перепад входного напряжения (H → L)

– перепад входного напряжения (L → H)



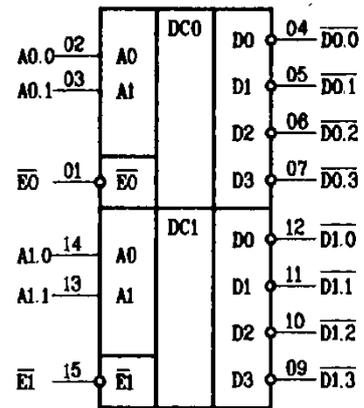
### 7.11. КР1554ИД14 – 2 дешифратора с инверсными выходами

Таблица истинности

Входы			Выходы			
Еп	Ап. 0	Ап. 1	Дп. 0	Дп. 1	Дп. 2	Дп. 3
H	X	X	H	H	H	H
L	L	L	L	H	H	H
L	H	L	H	L	H	H
L	L	H	H	H	L	H
L	H	H	H	H	H	L

H – высокий уровень напряжения  
L – низкий уровень напряжения  
X – неопределенное состояние (H или L)

Условно-графическое обозначение



### 7.12. КР1554АП20 – 8-ми разрядный приемопередатчик с регистром и тремя состояниями на выходе

Таблица истинности

Входы						Назначение вход/выход		Режимы работы
OE	COD	CVA	CAB	SAB	SVA	A0–A7	B0–B7	
H	X	X	X	X	X	Вход	Вход	Состояние "выключено"
H	X	┘	┘	X	X	Вход	Вход	Хранение данных A и B
L	L	X	X	X	L	Выход	Вход	Передача данных B на шину A
L	L	X	X	X	H	Выход	Вход	Передача хранимых данных на шину A
L	H	X	X	L	X	Вход	Выход	Передача данных A на шину B
L	H	X	X	H	X	Вход	Выход	Передача хранимых данных на шину B

H – высокий уровень напряжения  
L – низкий уровень напряжения  
X – неопределенное (H или L) состояние  
┘ – перепад входного напряжения (H → L)

Режимы работы микросхемы



Рис. А

Запись данных шин A и B в регистры

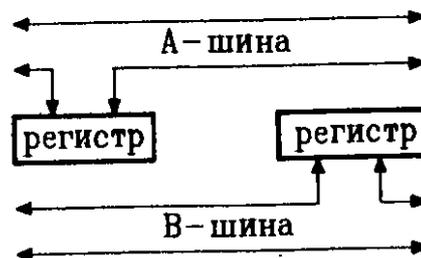


Рис. В

Передача данных шины B на шину A

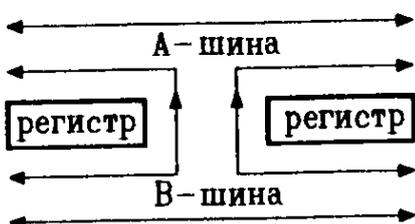


Рис. Б

Передача данных, хранимых в регистрах, на шины A и B

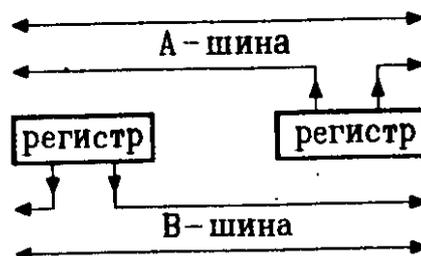
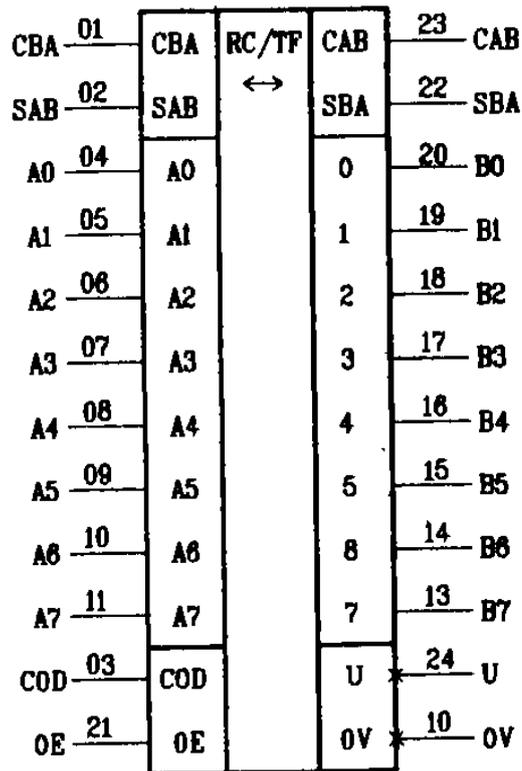


Рис. Г

### Условно-графическое обозначение



### 7.13. КР1554ИЕ6 – 4-х разрядный реверсивный двоично-десятичный счетчик

Расположение выводов

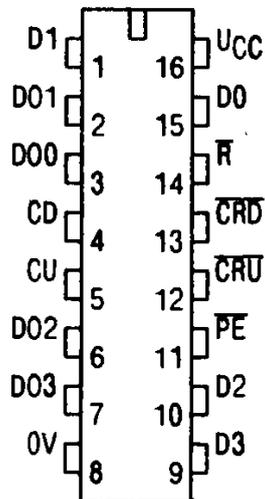


Таблица назначения выводов

1	D1	Вход данных
2	D01	Выход данных
3	D00	Выход данных
4	CD	Вход тактовый счета на уменьшение
5	CU	Вход тактовый счета на увеличение
6	D02	Выход данных
7	D03	Выход данных
8	OV	Общий вывод
9	D3	Вход данных
10	D2	Вход данных
11	PE	Вход разрешения параллельной загрузки
12	CRU	Выход прямого переноса
13	CRD	Выход обратного переноса
14	R	Вход установки в состояние "логический 0"
15	D0	Вход данных
16	UCC	Напряжение питания

Таблица истинности

Вход				Режим
R	$\overline{PE}$	CD	CU	
H	X	X	X	Установка в состояние "логический 0"
L	L	X	X	Запись данных
L	H	H	H	Неактивное состояние
L	H	H	$\uparrow$	Счет на увеличение
L	H	$\downarrow$	H	Счет на уменьшение

H - высокий уровень напряжения  
 L - низкий уровень напряжения  
 X - неопределенное состояние (H или L)  
 $\uparrow$  - перепад входного напряжения (H  $\rightarrow$  L)

Условно-графическое обозначение

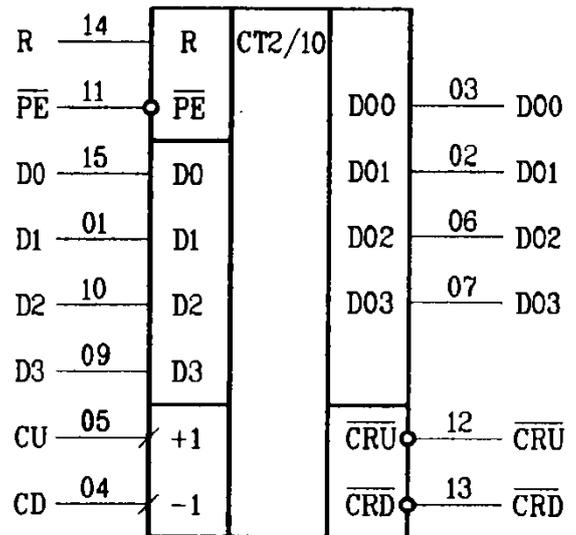
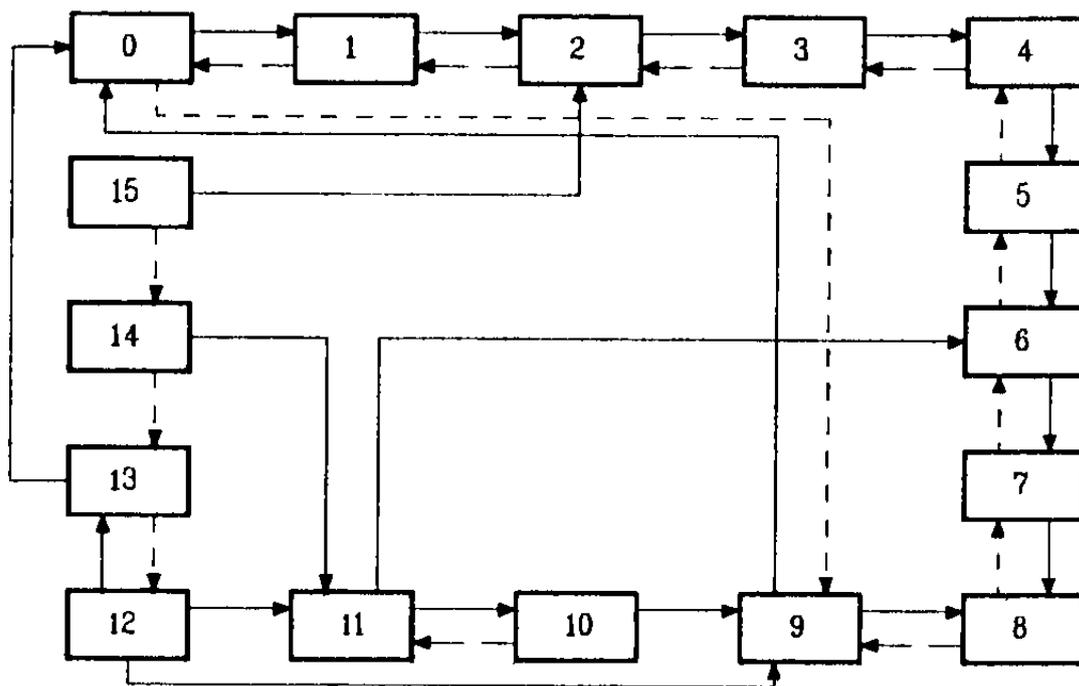
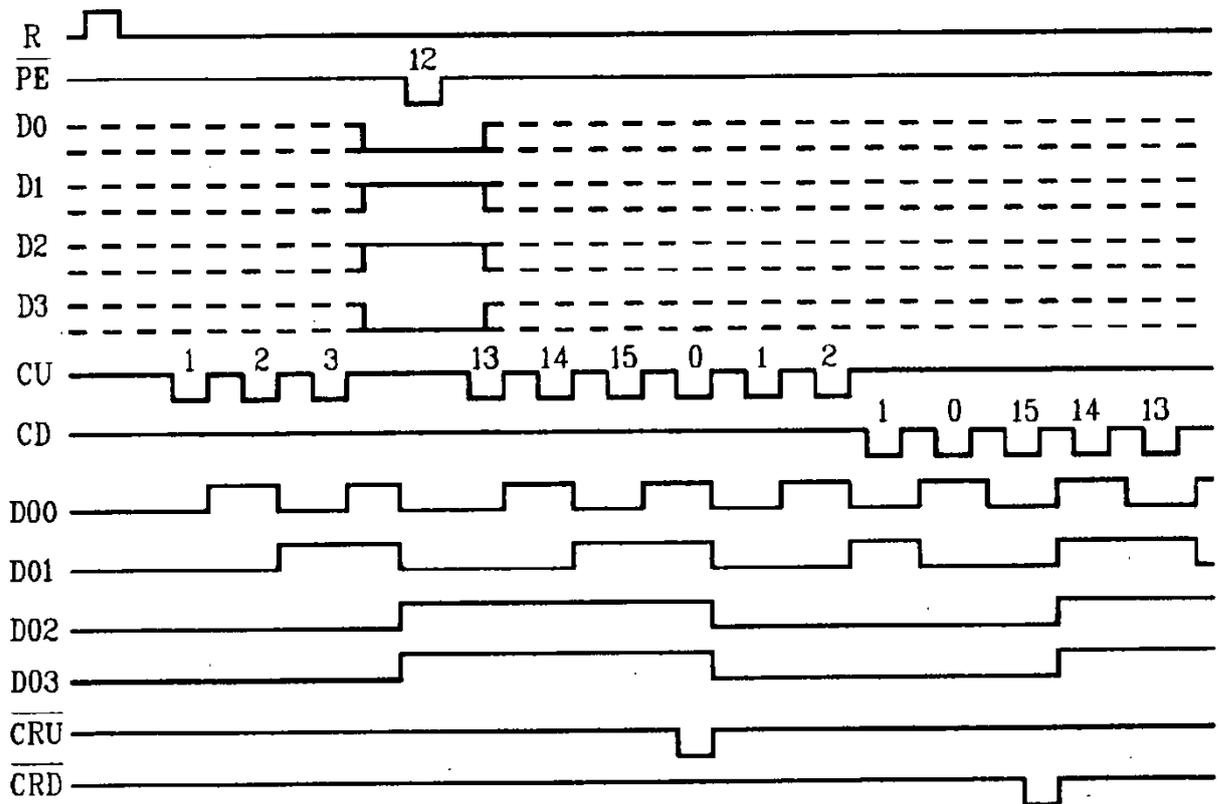


Диаграмма переходов



$\longrightarrow$  счет на увеличение  
 $\longleftarrow$  счет на уменьшение

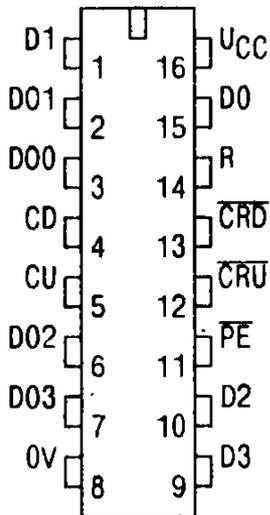
## Временные диаграммы работы



### 7.14. KP1554IE7 – 4-х разрядный реверсивный двоичный счетчик

Расположение выводов

Таблица назначения выводов



1	D1	Вход данных
2	D01	Выход данных
3	D00	Выход данных
4	CD	Вход тактовый счета на уменьшение
5	CU	Вход тактовый счета на увеличение
6	D02	Выход данных
7	D03	Выход данных
8	0V	Общий вывод
9	D3	Вход данных
10	D2	Вход данных
11	PE	Вход разрешения параллельной загрузки
12	CRU	Выход прямого переноса
13	CRD	Выход обратного переноса
14	R	Вход установки в состояние "логический 0"
15	D0	Вход данных
16	UCC	Напряжение питания

Таблица истинности

Вход				Режим
R	$\overline{PE}$	CD	CU	
H	X	X	X	Установка в состояние "логический 0"
L	L	X	X	Запись данных
L	H	H	H	Неактивное состояние
L	H	H	$\downarrow$	Счет на увеличение
L	H	$\downarrow$	H	Счет на уменьшение

H - высокий уровень напряжения  
 L - низкий уровень напряжения  
 X - неопределенное состояние (H или L)  
 $\downarrow$  - перепад входного напряжения (H → L)

Условно-графическое обозначение

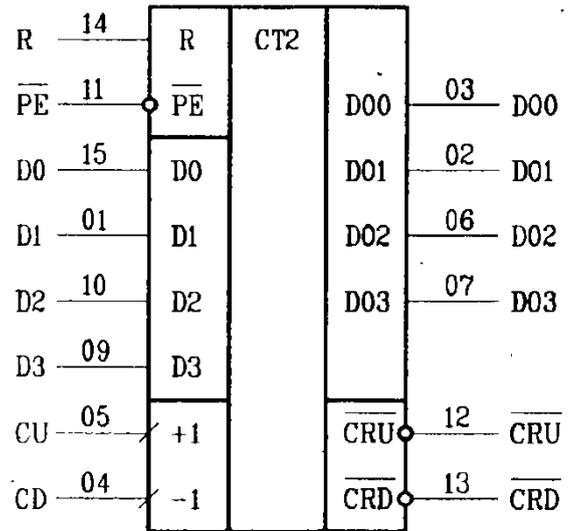
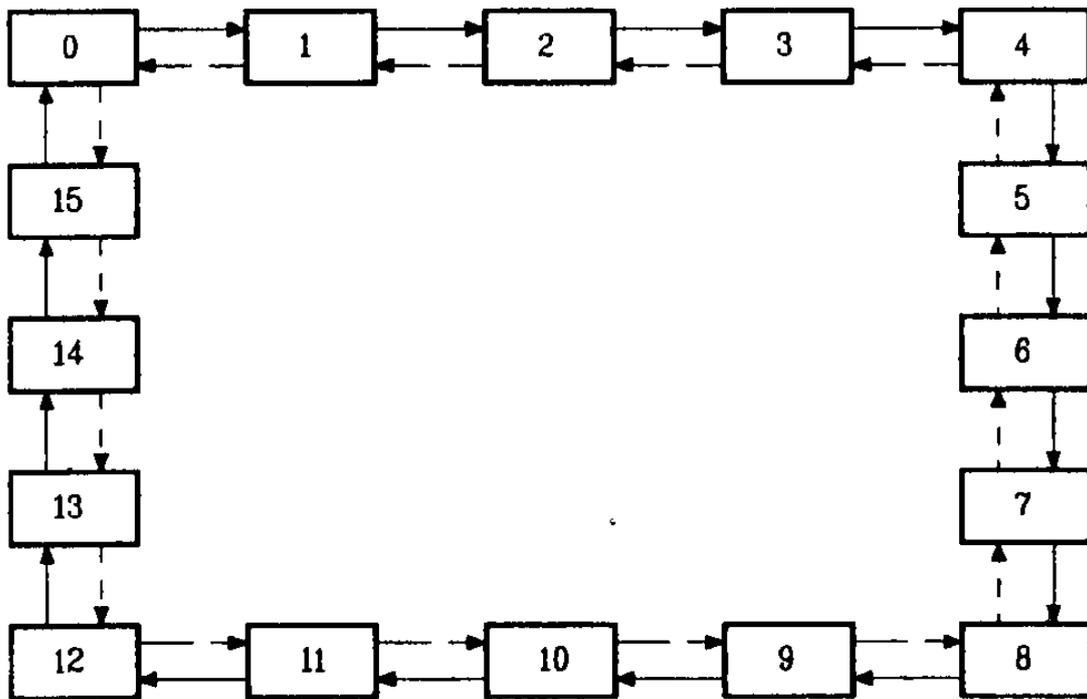
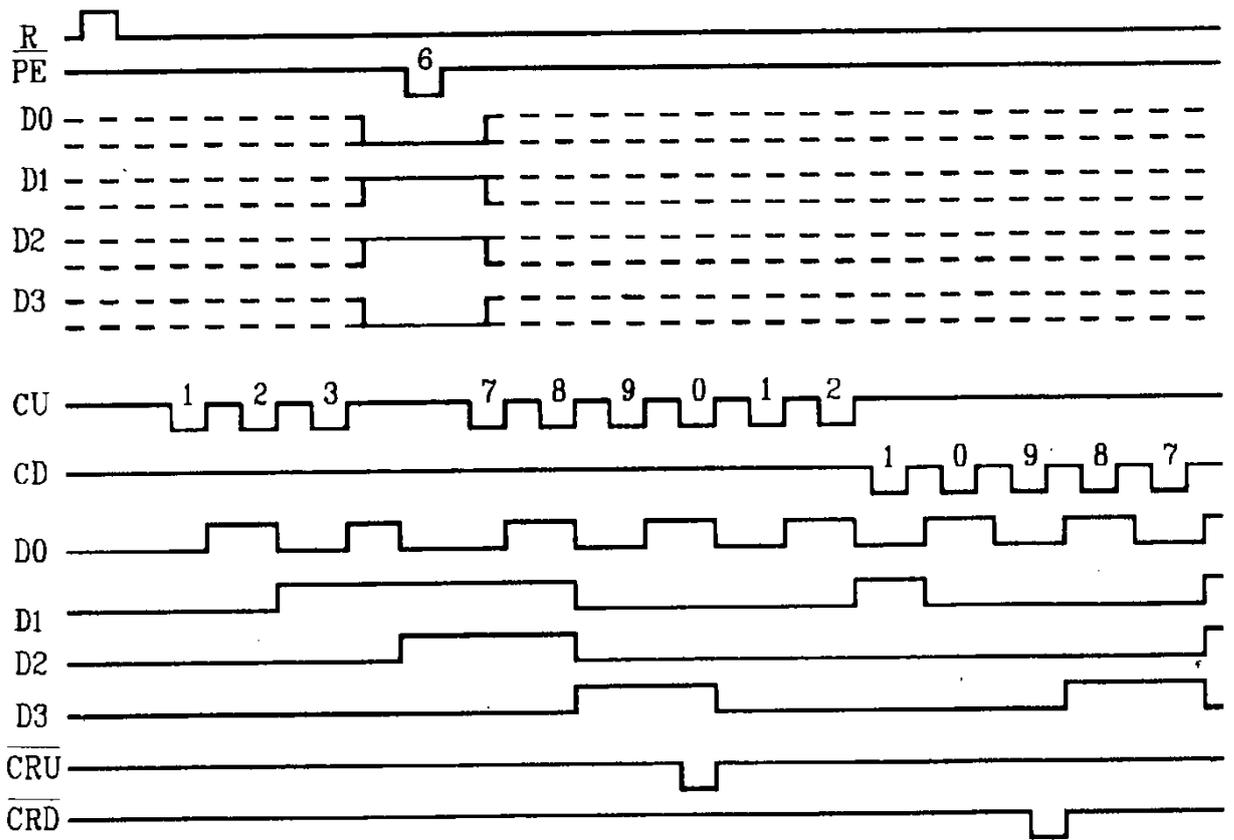


Диаграмма переходов



→ счет на увеличение  
 ← счет на уменьшение

Временные диаграммы работы



## 8. Микроконтроллеры AT91SAM7

Микроконтроллеры семейства AT91SAM7 имеют следующие основные особенности (на примере МК AT91SAM7X256/128).

- Процессорное ядро ARM7TDMI ARM Thumb, которое обеспечивает:
  - высокоэффективную 32-битную RISC-архитектуру;
  - 16-битную систему команд высокой плотности (режим Thumb);
  - наилучшее соотношение производительности и потребляемой мощности (MIPS/Вт);
  - возможность внутрисхемной эмуляции EmbeddedICE™;
  - поддержку коммуникационного канала отладки.
- Встроенная высокоскоростная флэш-память:
  - 256 КБ (AT91SAM7X256), организована как 1024 страницы по 256 байт;
  - 128 КБ (AT91SAM7X128), организована как 512 страниц по 256 байт;
  - доступ за один цикл при тактовой частоте до 30 МГц для самых плохих условий;
  - буфер выборки с упреждением для оптимизации выполнения команды Thumb при максимальной скорости выполнения;
  - время программирования страницы флэш-памяти (включая автоматическое стирание страницы) . . . . . 6 мс;
  - время стирания всей флэш-памяти . . . . . 15 мс;
  - ресурс флэш-памяти — 10000 циклов записи; время хранения данных — 10 лет;
  - возможность блокировки сектора, перепрограммируемый бит защиты;
  - интерфейс быстрого программирования флэш-памяти (FFPI) для программирования большого объема устройств в партии.
- Встроенная высокоскоростная оперативная память SRAM с доступом за один цикл при максимальной тактовой частоте:
  - 64 КБ (AT91SAM7X256);
  - 32 КБ (AT91SAM7X128).
- Контроллер памяти (MC): встроенный контроллер флэш-памяти. Обеспечивает обнаружение состояний аварийного останова и нарушения границ доступа к памяти.
- Контроллер сброса (RSTC) обеспечивает:
  - организацию сброса при включении питания и наличие детектора провалов и понижения напряжения питания с заводской калибровкой;

- приём внешнего сигнала сброса и оценку состояния источников сброса.
- Тактовый генератор (CKGR): встроенный RC-генератор с низким энергопотреблением, внешний кварцевый резонатор 3...20 МГц и один модуль ФАПЧ (PLL).
- Контроллер управления питанием (PMC) обеспечивает:
  - возможности оптимизации потребляемой мощности, включение режима медленного тактирования (менее 500 Гц) и режим ожидания (Idle Mode);
  - четыре программируемых внешних источника синхросигнала.
- Расширенный контроллер прерывания (AIC):
  - индивидуально маскируемые, векторизованные источники прерываний с восемью уровнями приоритета;
  - два источника внешних прерываний и один источник быстрого прерывания, защита от ложных прерываний.
- Модуль отладки (DBGU) обеспечивает:
  - двухпроводной отладочный порт UART и поддержку прерывания от коммуникационного канала отладки;
  - программируемое предотвращение доступа (ICE).
- Периодический интервальный таймер (PIT): программируемый 20-битный счётчик и 12-битный интервальный счётчик.
- Сторожевой таймер (WDT):
  - защищённый ключом 12-битный программируемый счётчик;
  - генерация системного сброса или сигнала системного прерывания;
  - возможность останова счётчика, когда МК находится в режиме отладки (Debug State) или в режиме ожидания (Idle Mode).
- Таймер реального времени (RTT):
  - 32-битный счётчик свободного доступа с механизмом тревоги;
  - тактирование от внутреннего RC-генератора.
- Два контроллера параллельного ввода/вывода (PIO):
  - 62 программируемые линии ввода/вывода, каждая из которых мультиплексируется с 2 и менее линиями от периферийных устройств;
  - возможность генерации прерывания при изменении внешнего сигнала на каждой линии ввода/вывода;
  - индивидуальное программирование линии ввода/вывода как выхода с открытым стоком, синхронного выхода или включение подтягивающего к «плюсу» питания резистора.
- Тринадцать каналов периферийного контроллера прямого доступа к памяти DMA (PDC).
- Один порт полноскоростного (Full Speed) устройства USB 2.0 (12 Мбит/с): приёмопередатчик на кристалле, 1352-байтовые буферы FIFO с программируемой конфигурацией.
- Один интерфейс Ethernet MAC 10/100 base-T:
  - MII/RMII-интерфейс;
  - интегрированные 28-байтовые буферы FIFO и выделенные каналы DMA для передачи и приёма.

- Один 2.0А и 2.0В-совместимый CAN-контроллер: восемь полностью программируемых почтовых ящиков сообщений объектов, 16-битный счётчик временных меток.
- Один синхронный последовательный контроллер (SSC), который обеспечивает:
  - независимые синхронизацию и синхросигналы фрейма для каждого приёмника и передатчика;
  - поддержку аналогового интерфейса I<sup>2</sup>S, поддержку режима мультиплексного разделения времени;
  - возможность организации непрерывного высокоскоростного потока передачи 32-битных данных.
- Два универсальных синхронно-асинхронных приёмопередатчика (USART):
  - индивидуальный генератор скорости обмена, аппаратная модуляция/демодуляция IrDA;
  - поддержка ISO7816 T0/T1 интерфейса Smart-карт, аппаратная реализация процедуры установления связи, поддержка интерфейса RS-485;
  - поддержка полного модемного интерфейса линий USART1.
- Два ведущих/ведомых последовательных периферийных интерфейса (SPI):
  - программируемая (8...16)-битная передача данных;
  - 4 линии выбора ведомых устройств.
- Один трёхканальный 16-битный таймер/счётчик (TC):
  - три внешних входа тактирования, две ножки ввода/вывода общего назначения на канал;
  - двойной генератор ШИМ (PWM), режим сравнения/захвата, возможность счёта на возрастание/убывание.
- Один четырёхканальный 16-битный контроллер ШИМ (PWMC).
- Один двухпроводной (Two-wire) интерфейс (TWI):
  - поддержка только режима ведущего;
  - поддержка всех Two-wire-EEPROM фирмы Atmel.
- Один восьмиканальный 10-битный аналого-цифровой преобразователь, четыре канала которого мультиплексированы с цифровыми линиями ввода/вывода.
- Стартовый загрузчик SAM-BA™:
  - запрограммированная при изготовлении стартовая программа (Boot);
  - графический пользовательский интерфейс SAM-BA.
- Интерфейс граничного сканирования IEEE 1149.1 JTAG на всех цифровых выводах.
- Толерантные к напряжению 5 В линии ввода/вывода, включая четыре линии ввода/вывода с высокой нагрузочной способностью (до 16 мА каждый).
- Подсистема питания:
  - встроенный стабилизатор напряжения 1.8 В, обеспечивающий ток нагрузки до 100 мА, для питания ядра и внешних компонентов;
  - вывод VDDIO для подачи напряжения 3.3 В, используемого для питания линий ввода/вывода;

- вывод VDDFLASH для подачи напряжения 3.3 В на независимый источник питания флэш-памяти;
- вывод VDDCORE для подачи напряжения 1.8 В на основной источник питания с детектором провалов напряжения питания.
- Полностью статическая конфигурация: тактовая частота ядра — до 55 МГц при напряжении питания ядра 1.65 В и температуре +85°C (самые плохие условия).
- Исполнение в корпусе LQFP со 100 выводами.

Сводный перечень МК AT91SAM7 представлен в Табл. 4.1. Как можно видеть из таблицы, микросхемы AT91SAM7 представлены большим модельным рядом и имеют весьма насыщенную периферию.

Для получения оригинальной информации производителя по микроконтроллерам AT91SAM7 помимо этой книги рекомендуется обратиться к источнику [4].

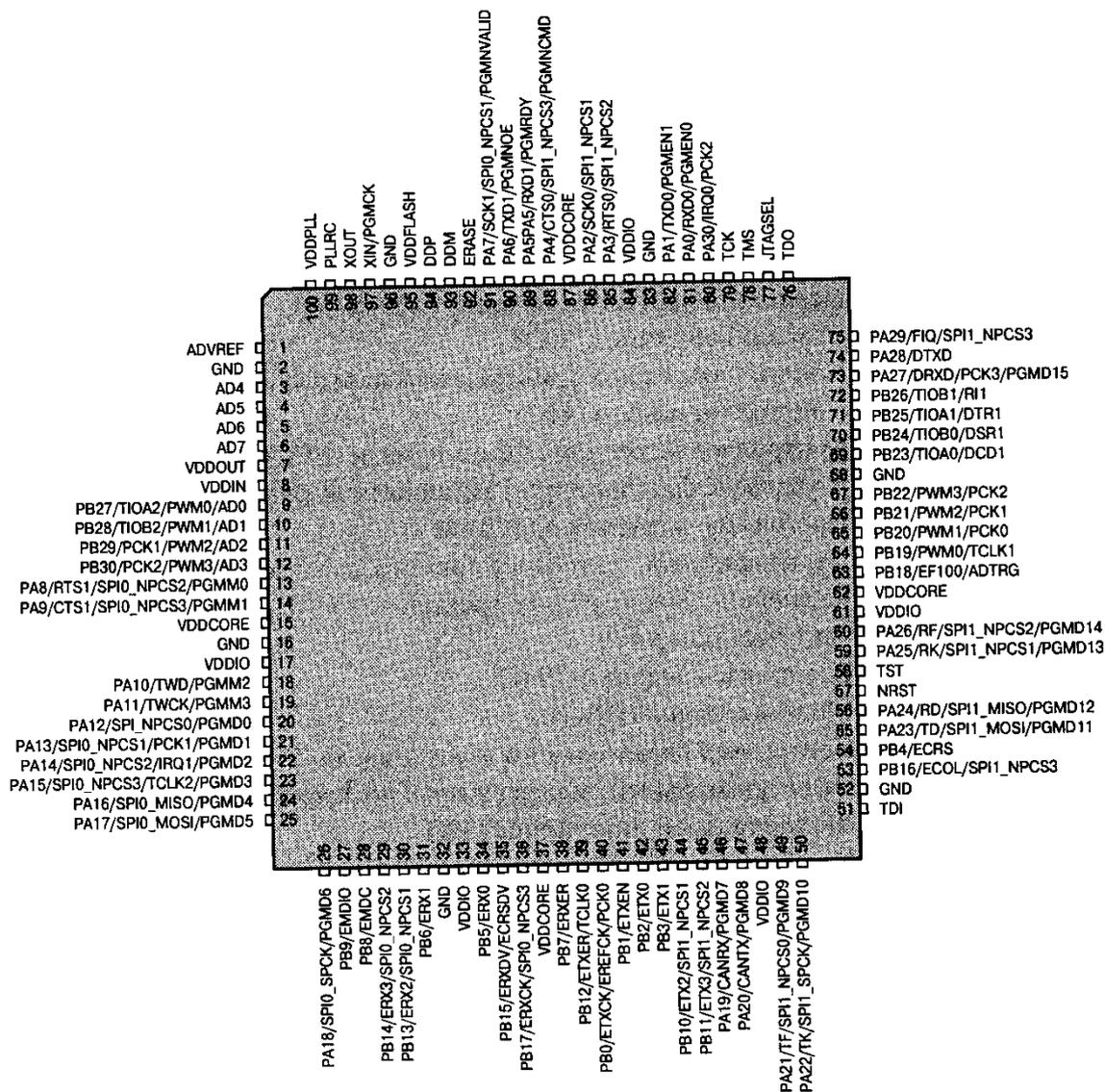


Рис. 5.1. Топологическая схема корпуса AT91SAM7X256/128.

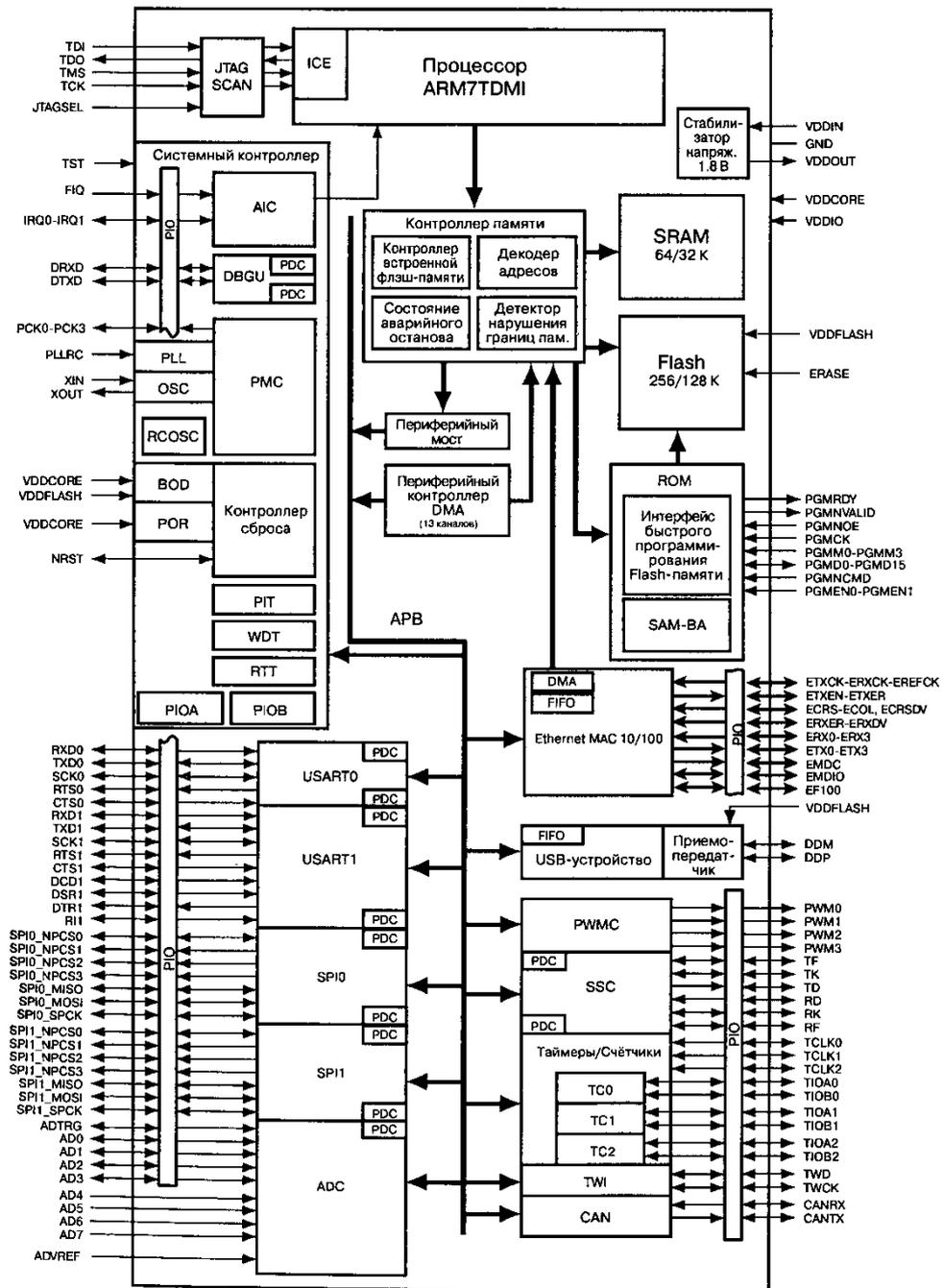


Рис. 5.2. Блок-схема микроконтроллера AT91SAM7X256/128.

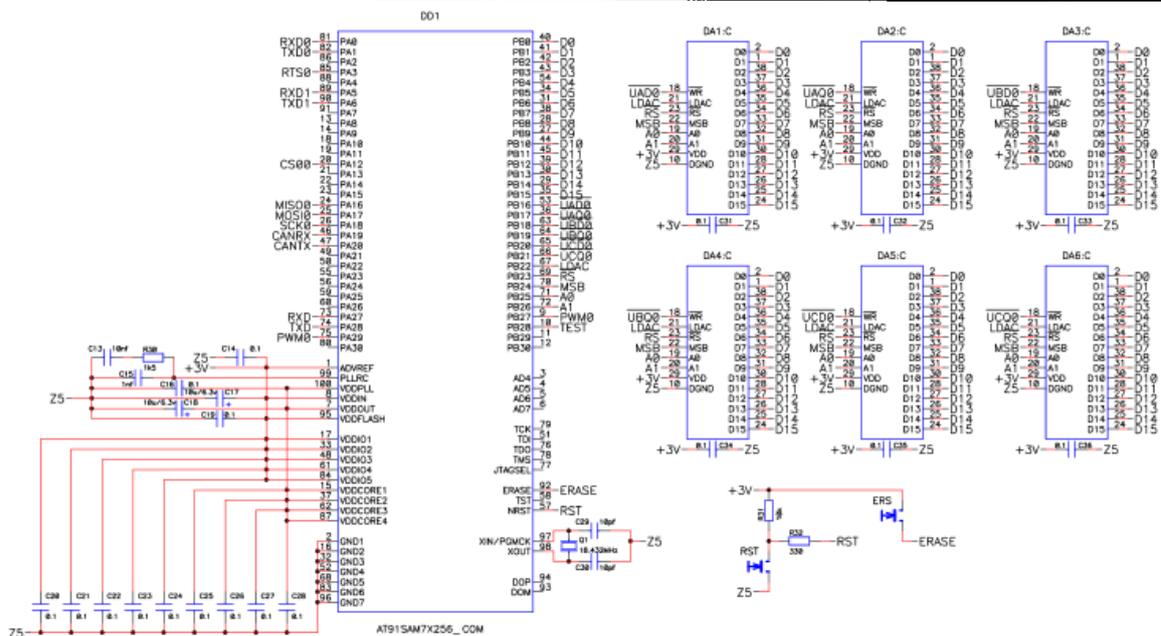
**Таблица 5.1. Описание выводов МК AT91SAM7X256/128**

Название вывода (сигнала)	Номер вывода	Функция	Тип	Активный уровень	Комментарий
<b>Питание</b>					
VDDIN	8	Вход стабилизатора напряжения и питание АЦП	Питание		3...3.6 В
VDDOUT	7	Выход стабилизатора напряжения	Питание		1.85 В
VDDFLASH	95	Питание флэш-памяти и USB	Питание		3...3.6 В
VDDIO		Питание линий ввода/вывода	Питание		3...3.6 В
VDDCORE		Питание ядра	Питание		1.65...1.95 В
VDDPLL	100	Питание PLL (ФАПЧ)	Питание		1.65...1.95 В
GND		Общий провод	Заземление		
<b>Синхронизация, генераторы и ФАПЧ</b>					
XIN	97	Вход основного генератора	Вход		
XOUT	98	Выход основного генератора	Выход		
PLLRC	99	Фильтр PLL	Вход		
PCK0...PCK3		Программируемые выходы синхронизации	Выход		
<b>ICE и JTAG</b>					
TCK	79	Тестовая синхронизация	Вход		Отсутствует подтягивающий к «плюсу» питания резистор
TDI	51	Вход тестирования данных	Вход		Отсутствует подтягивающий к «плюсу» питания резистор
TDO	76	Выход тестирования данных	Выход		
TMS	78	Выбор режима тестирования	Вход		Отсутствует подтягивающий к «плюсу» питания резистор
JTAGSEL	77	Выбор JTAG	Вход		Подтягивающий к общему проводу резистор
<b>Флэш-память</b>					
ERASE	92	Команда стирания флэш-памяти и конфигурационных битов NVM	Вход	Высокий	Подтягивающий к общему проводу резистор
<b>Сброс/тестирование</b>					
NRST	57	Сброс МК	Вход/выход	Низкий	Подтягивающий к «плюсу» питания резистор, выход с открытым стоком

Название вывода (сигнала)	Номер вывода	Функция	Тип	Активный уровень	Комментарий
TST	58	Выбор режима тестирования	Вход	Высокий	Подтягивающий к общему проводу резистор
<b>Модуль отладки</b>					
DRXD	73	Приём данных отладки	Вход		
DTXD	74	Передача данных отладки	Выход		
<b>AIC</b>					
IRQ0, IRQ1	80, 22	Входы внешних прерываний	Вход		
FIQ	75	Вход быстрого прерывания	Вход		
<b>PIO</b>					
PA0...PA30		Контроллер А параллельного ввода/вывода	Вход/выход		Подтягивающий к «плюсу» питания резистор при сбросе
PB0...PB30		Контроллер В параллельного ввода/вывода	Вход/выход		Подтягивающий к «плюсу» питания резистор при сбросе
<b>Порт USB-устройства</b>					
DDM	93	Данные порта USB устройства –	Аналоговый		
DDP	94	Данные порта USB устройства +	Аналоговый		
<b>USART</b>					
SCK0, SCK1	86, 91	Последовательная синхронизация	Вход/выход		
TXD0, TXD1	82, 90	Передаваемые данные	Вход/выход		
RXD0, RXD1	81, 89	Принимаемые данные	Вход		
RTS0, RTS1	85, 13	Запрос передачи	Выход		
CTS0, CTS1	88, 14	Сброс передачи	Вход		
DCD1	69	Обнаружение несущей	Вход		
DTR1		Готовность терминала	Выход		
DSR1		Готовность данных	Вход		
RI1	72	Индикация вызова	Вход		
<b>Синхронный последовательный контроллер</b>					
TD	55	Передача данных	Выход		
RD	56	Приём данных	Вход		
TK	50	Синхронизация передачи	Вход/выход		
RK	59	Синхронизация приёма	Вход/выход		
TF	49	Синхронизация передачи фрейма	Вход/выход		
RF	60	Синхронизация приёма фрейма	Вход/выход		

Название вывода (сигнала)	Номер вывода	Функция	Тип	Активный уровень	Комментарий
<b>Таймер/счётчик</b>					
TCLK0...TCLK2	39, 64, 23	Внешние тактовые входы	Вход		
TIOA0...TIOA2	69, 71, 9	Линии ввода/вывода А	Вход/выход		
TIOB0...TIOB2		Линии ввода/вывода В	Вход/выход		
<b>ШИМ-контроллер</b>					
PWM0...PWM3		Выходы каналов ШИМ	Выход		
<b>Последовательный периферийный интерфейс — SPIx</b>					
SPIx_MISO	24	Вход ведущего — выход ведомого	Вход/выход		
SPIx_MOSI	25	Выход ведущего -- вход ведомого	Вход/выход		
SPIx_SPCK	50	Последовательная синхронизация SPI	Вход/выход		
SPIx_NPCS0	49	Выбор периферийной микросхемы 0 SPI	Вход/выход	Низкий	
SPIx_NPCS1, 2, 3		Выбор периферийных микросхем 1...3 SPI	Выход	Низкий	
<b>Двухпроводной интерфейс</b>					
TWD	18	Последовательные данные двухпроводного интерфейса	Вход/выход		
TWCK	19	Последовательная синхронизация двухпроводного интерфейса	Вход/выход		
<b>Аналого-цифровой преобразователь</b>					
AD0...AD3	9...12	Аналоговые входы	Аналоговый		Цифровые входы с подтянутыми к «плюсу» питания резисторами при сбросе
AD4...AD7	3...6	Аналоговые входы	Аналоговый		Аналоговые входы
ADTRG	63	Триггер АЦП	Вход		
ADVREF	1	Опорное напряжение АЦП	Аналоговый		
<b>Интерфейс быстрого программирования флэш-памяти</b>					
PGMEN0, PGMEN1	81, 82	Разрешение программирования	Вход		
PGMM0...PGM M3	13, 14, 18, 19	Режим программирования	Вход		
PGMD0...PGMD 15		Данные программирования	Вход/выход		
PGMRDY	89	Готовность программирования	Выход	Высокий	
PGMINVALID	91	Направление данных	Выход	Низкий	

Название вывода (сигнала)	Номер вывода	Функция	Тип	Активный уровень	Комментарий
PGMNOE	90	Программирование чтения	Вход	Низкий	
PGMCK	97	Программирование синхронизации	Вход		
PGMNCMD	88	Программирование команд	Вход	Низкий	
<b>Ethernet MAC 10/100</b>					
EREFCK	40	Опорный синхросигнал	Вход		Только RMII
ETXCK	40	Синхросигнал передачи	Вход		Только MII
ERXCK	36	Синхросигнал приёма	Вход		Только MII
ETXEN	41	Разрешение передачи	Выход		
ETX0...ETX3	42...45	Передаваемые данные	Выход		ETX0 — ETX1 только в RMII
ETXER	38	Ошибка кодирования передачи	Выход		Только MII
ERXDV	35	Принятые данные истинные	Вход		Только MII
ECRSDV	35	Опрос несущей и истинные данные	Вход		Только RMII
ERX0...ERX3	34, 31, 30, 29	Принимаемые данные	Вход		ERX0 — ERX1 только в RMII
ERXER	38	Ошибка приёма	Вход		
ECRS	54	Опрос несущей	Вход		Только MII
ECOL	53	Обнаружение коллизий	Вход		Только MII
EMDC	28	Тактирование управления данными	Выход		
EMDIO	27	Вход/выход управления данными	Вход/выход		
EF100	63	Ускорение до 100 Мбит/с	Выход	Высокий	Только RMII



Пример схемы с использованием микроконтроллера