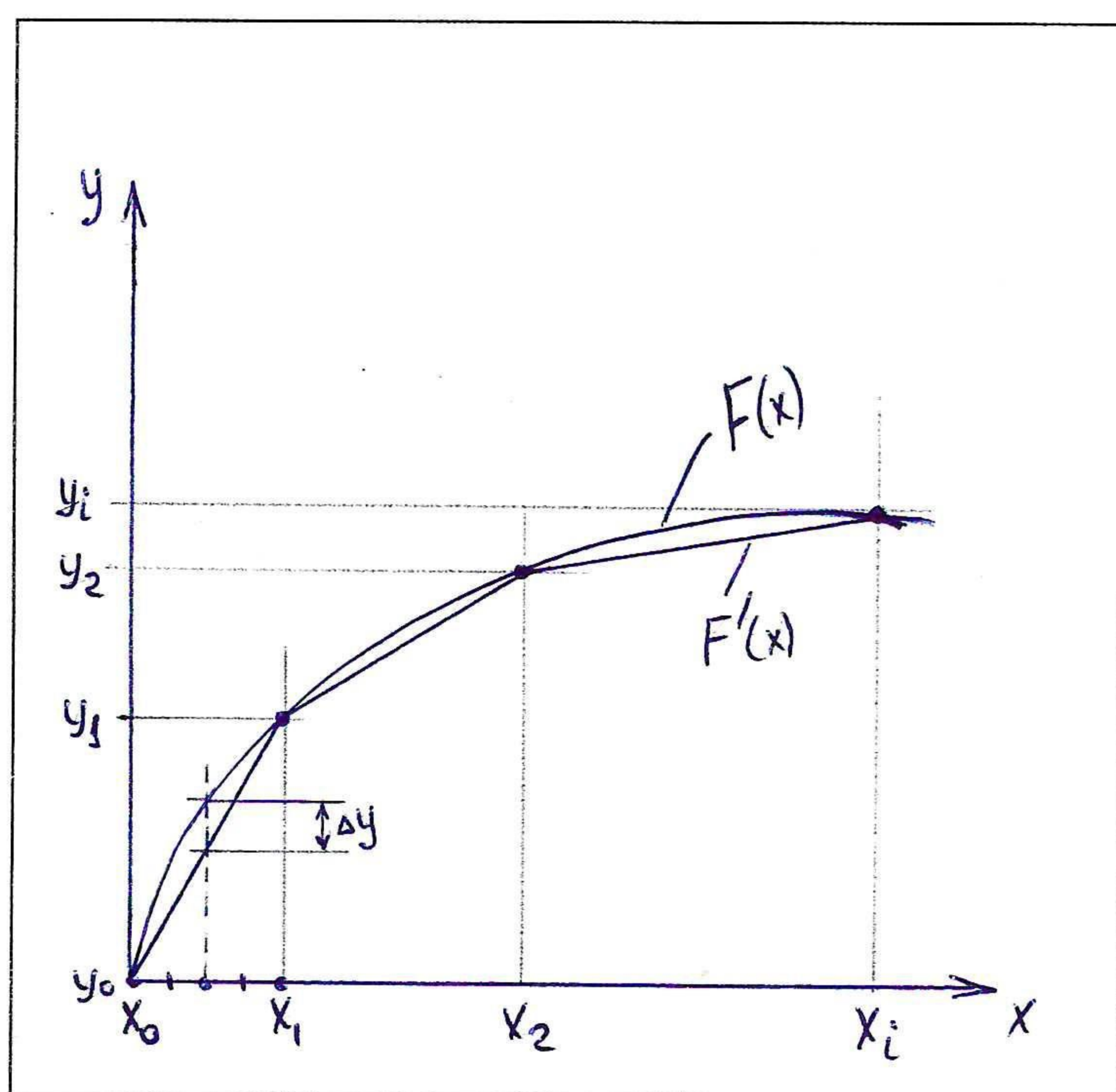


Кусочно-линейные функциональные преобразователи

Для осуществления нелинейных функциональных преобразований аналоговых сигналов широко применяется метод кусочно-линейной аппроксимации амплитудной характеристики четырёхполюсника.

Кусочно-линейная аппроксимация функций

Этот метод широко применяется при аппроксимации функциональных зависимостей, имеющих сложную аналитическую формулу, а также для упрощения аналитической записи функциональных зависимостей. Суть кусочно-линейной аппроксимации состоит в замене нелинейной функции на определённом интервале отрезком прямой или ломанной линией.



Пусть задана функция $y = F(x)$ на заданном интервале изменения аргумента от x_0 до x_m монотонно возрастающая или монотонно убывающая. Разрывные функции плохо поддаются аппроксимации в точках разрыва, при этом погрешность в этих точках может достигать больших значений.

На заданном интервале изменения аргумента функция разбивается на n участков и на каждом из них заменяется отрезком прямой, который на концах участков имеет те же значения, что и функция $F(x)$ (рис. 5).

(*) Наибольшее расхождение с аппроксимируемой функцией отрезок прямой чаще всего имеет в середине интервала аппроксимации между концами отрезка.

Уравнение аппроксимирующей прямой (на заданном интервале) на первом участке может быть задано выражением:

$$F_1'(x) = y_0 + \sqrt{K_1} \cdot (x - x_0) K_1 = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}; \quad x \in [x_0; x_1].$$

На втором участке выражение для аппроксимирующей функции имеет вид:

$$F_2'(x) = y_1 + K_2 \cdot (x - x_1) K_2 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}; \quad x \in [x_1; x_2],$$

аналогично на третьем участке:

$$F_3'(x) = y_2 + K_3 \cdot (x - x_2) K_3 = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2}; \quad x \in [x_2; x_3]$$

а в общем случае для i -го участка:

$$F_i'(x) = y_{i-1} + K_i \cdot (x - x_{i-1}) K_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}; \quad x \in [x_{i-1}; x_i], \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Представленные уравнения – это уравнения прямой, проходящей через заданную точку x_i с заданным угловым коэффициентом K_i .

Относительная ... Погрешность кусочно-линейной аппроксимации внутри интервала может быть найдена по формуле:

$$\delta_i = \left| \frac{F(x) - F_i'(x)}{F(x)} \right|; \quad x \in [x_{i-1}; x_i],$$

где x – значение аргумента внутри интервала аппроксимации, при котором отклонение от заданной функции максимально.

(*) Наибольшее расхождение ...

Кусочно-линейные аппроксиматоры

Кусочно-линейные аппроксиматоры (КЛА) – это электронные функциональные устройства с нелинейной амплитудной характеристикой, сформированной методом кусочно-линейной аппроксимации.

КЛА могут быть пассивными и активными.

Пассивные КЛА работают на принципе управляемых резистивных делителей напряжения, в которых ступенчато, в зависимости от входного или выходного напряжения, изменяется коэффициент деления.

Активные КЛА представляют собой масштабный усилитель, коэффициент передачи которого ступенчато изменяется под действием входного или выходного напряжения.

Поскольку в качестве ключей в КЛА чаще всего используют диоды, то они получили название диодные функциональные преобразователи (ДФП).

Пассивные ДФП просты по принципу работы и дешевы по используемым элементам (диоды и резисторы), но имеют два важных недостатка, о которых в конце скажем!

- выходное напряжение таких ДФП всегда меньше входного;
- наличие сопротивления нагрузки искажает результат преобразования, внося большую погрешность, поэтому удовлетворительная работа возможна только в режиме, близком к холостому ходу.

после закончена!

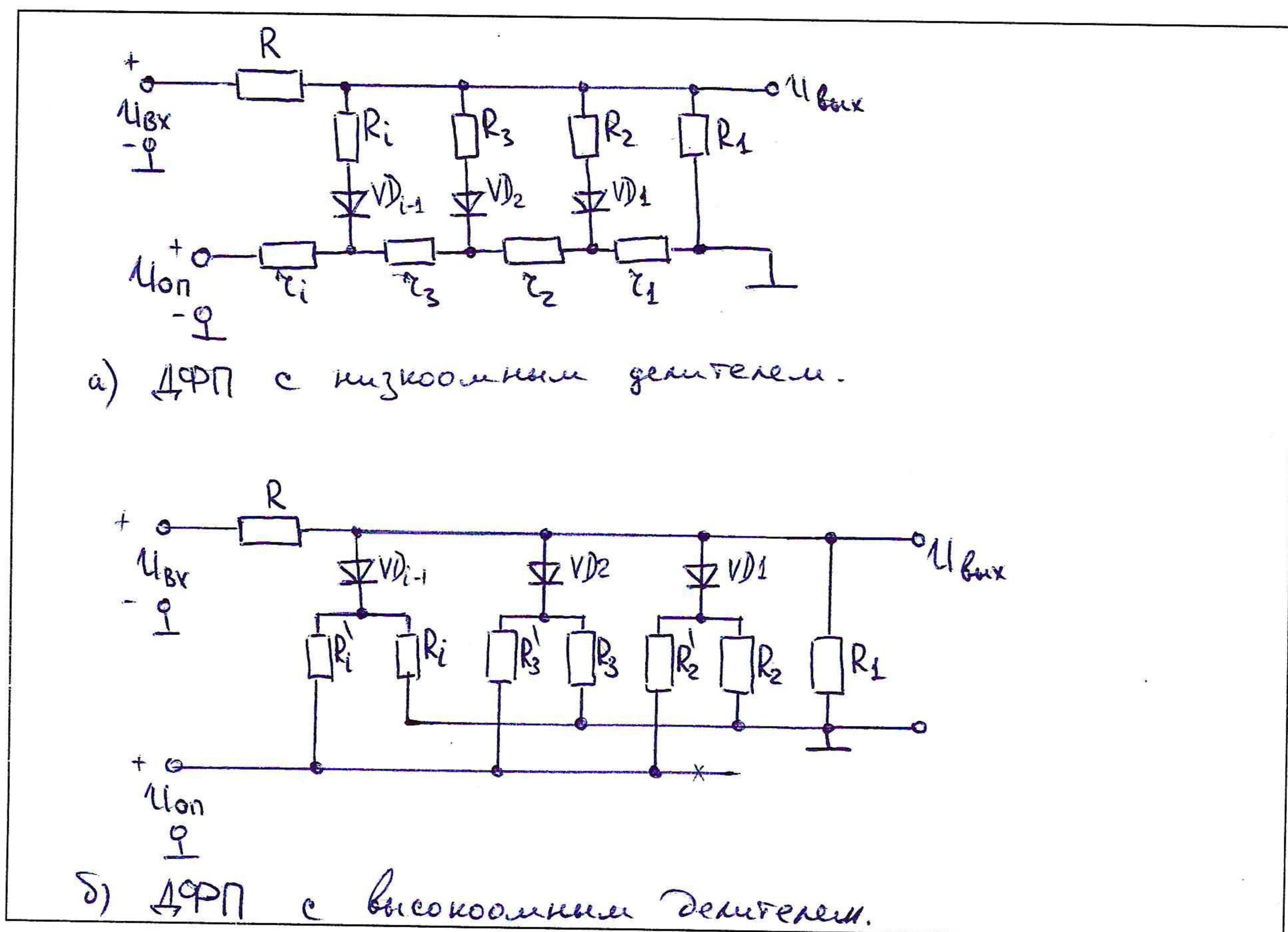
см. ниже.

Пассивные диодные функциональные преобразователи

Электрические принципиальные схемы пассивных ДФП приведены на рис. ↓

Пассивные ДФП делятся на два вида:

- ДФП с низкоомным делителем напряжения для задания порогов переключения;
- ДФП с высокоомным делителем напряжения для задания порогов переключения.



Первый тип преобразователей содержит один относительно низкоомный делитель напряжения, запитываемый от источника опорного напряжения и задающий пороги срабатывания диодов. Пороги определяются выходным напряжением.

Для того, чтобы сопротивление резисторов делителя вносило минимальную погрешность в задание углового коэффициента участка необходимо выполнение условия $R_i \gg r_i$.

Работает схема следующим образом.

При изменении входного напряжения в пределах от 0 до $U_{\text{ш1}}$ все диоды закрыты, и угловой коэффициент наклона первого участка определяется коэффициентом деления делителя:

$$K_1 = R_1 / (R + R_1).$$

Как только выходное напряжение превысит $U_{п1}$, открывается диод VD_1 и параллельно резистору R_1 подключается резистор R_2 . Если не учитывать влияние низкоомного делителя, то новый угловой коэффициент на втором участке будет равен:

$$K_2 = \frac{R_1 \parallel R_2}{R + R_1 \parallel R_2} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R \cdot (R_1 + R_2) + R_1 \cdot R_2} < K_1$$

Затем, при достижении выходным напряжением значения $U_{п2}$ открывается следующий диод VD_2 и параллельно резисторам R_1 и R_2 подключается резистор R_3 , при этом коэффициент передачи K_3 становится ещё меньше и может быть определён по формуле:

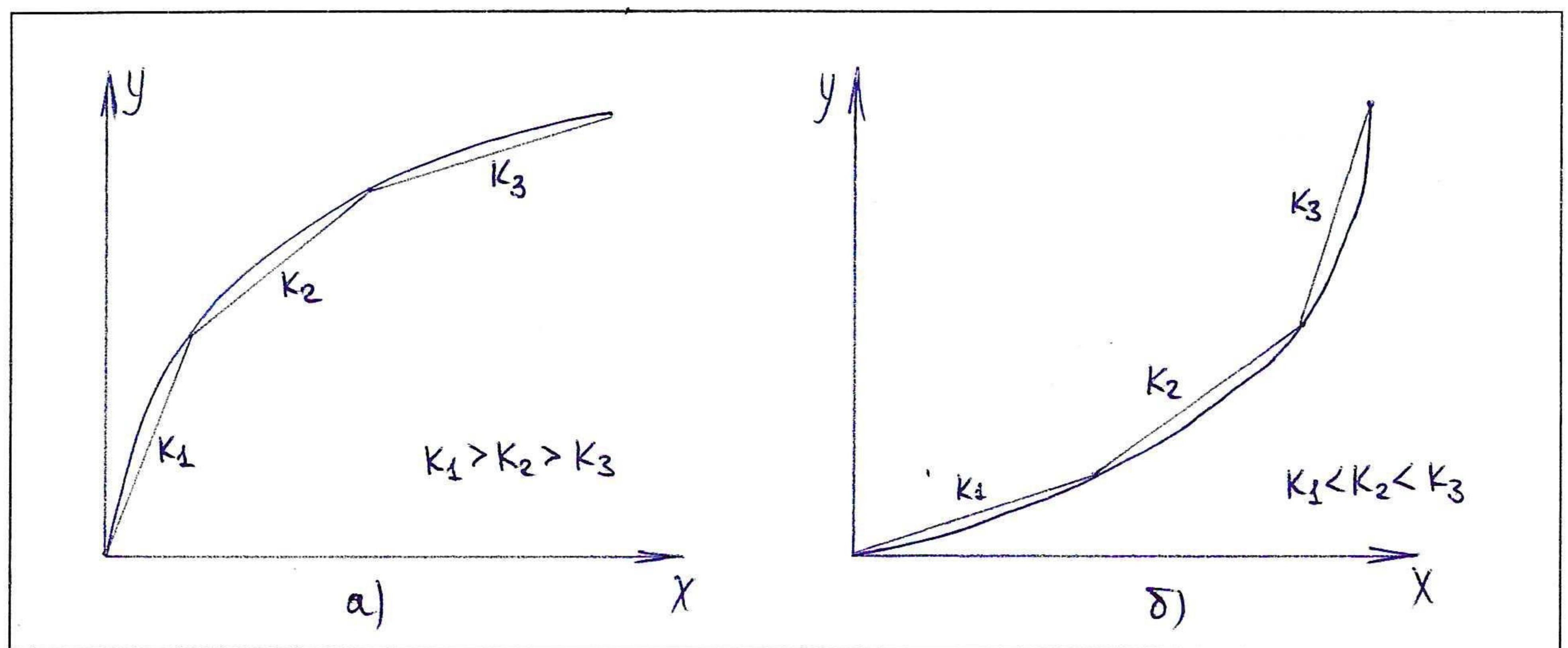
$$K_3 = \frac{R_{\text{ЭКВ3}}}{R + R_{\text{ЭКВ3}}}; \quad \frac{1}{R_{\text{ЭКВ3}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Для любого i -го участка угловой коэффициент наклона может быть рассчитан по формуле:

$$K_i = \frac{R_{\text{ЭКВ}i}}{R + R_{\text{ЭКВ}i}}; \quad \frac{1}{R_{\text{ЭКВ}i}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_i}$$

Рассматриваемая схема ДФП при работе диодов на открывание позволяет аппроксимировать функцию с монотонно падающей скоростью изменения (см. рис. а).

На этой же схеме можно аппроксимировать функции с нарастающей производной, если диоды будут работать на запираение. $\downarrow \delta$ — диоды надо перевернуть.



Порядок расчёта. $\tau \rightarrow R$

ДФП с высокоомным делителем имеет тот же принцип действия и отличается только тем, что порог срабатывания задаётся на каждый диод от отдельного делителя. Эти делители параллельно подключаются к источнику опорного напряжения. Особенность такой схемы включения состоит в том, что один из резисторов R_i задаёт угловой коэффициент наклона участка, а другой резистор R_i' совместно с R_i задаёт порог срабатывания.

Если в схеме с низкоомным делителем сначала рассчитывается делитель τ , затем, зная $K_{1,2,\dots}$, определяются резисторы R (практически не зависит от τ), то в схеме с высокоомным делителем, зная $K_{1,2,\dots}$, рассчитываются резисторы $R_{1,2,\dots}$, а после исходя из треб. знач. порогов сраб-я диодов

Все пассивные ДФП, отличаясь простотой и низкой стоимостью, обладают двумя существенными недостатками; ~~о которых мы уже говорили:~~

- выходное напряжение всегда меньше входного;
- подключение к выходу нагрузки приводит к искажению результатов аппроксимации.

Поэтому гораздо большее распространение получили активные ДФП.

Активные диодные функциональные преобразователи

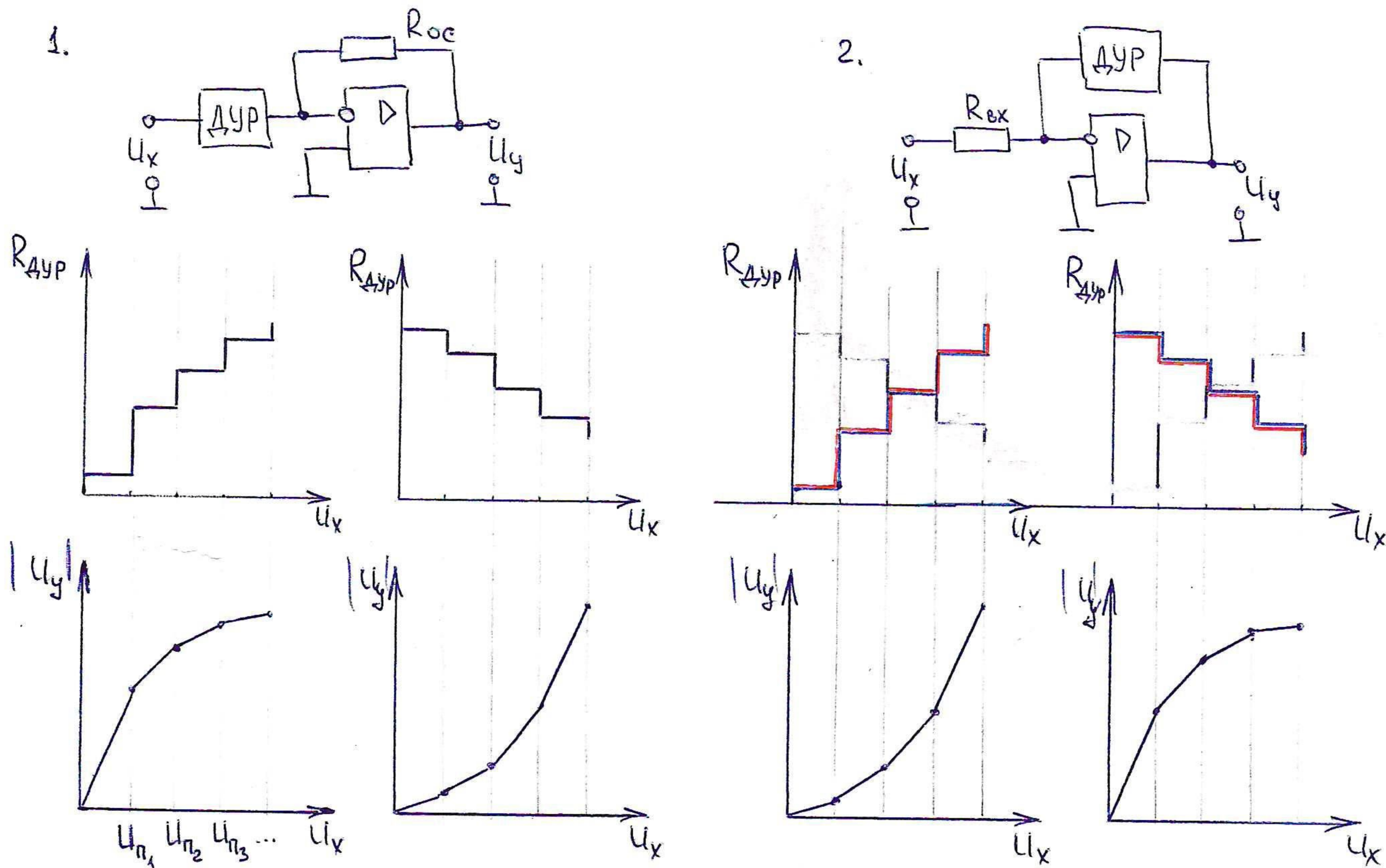
Активные ДФП строятся на основе операционных усилителей по схеме масштабного усилителя с управляемым коэффициентом передачи, который определяет угловой коэффициент наклона $A\chi$.

Возможные схемы активных ДФП приведены на рис. ↓ Либо во входную, либо в цепь обратной связи ОУ включается так называемый диодный управляемый резистор (ДУР). ~~Вместо~~ ^{эквив-е сопр-е} этого резистора изменяется ступенчатый ~~образом~~ в зависимости от входного или выходного напряжений усилителя. Это приводит к ступенчатому изменению коэффициента передачи.

$K_i = R_{oc}/R_i$ при включении ДУР во входную цепь ОУ,

$K_i = R_i/R_{вх}$ при включении ДУР в цепь обратной связи ОУ.

В зависимости от места расположения ДУР, а также от способа изменения его сопротивления, т.е. ступенчатое увеличение R_i (при поочерёдном запираии диодов) или ступенчатое уменьшение R_i (при поочерёдном отпираии диодов), получают вогнутую или выпуклую форму выходного напряжения усилителя.

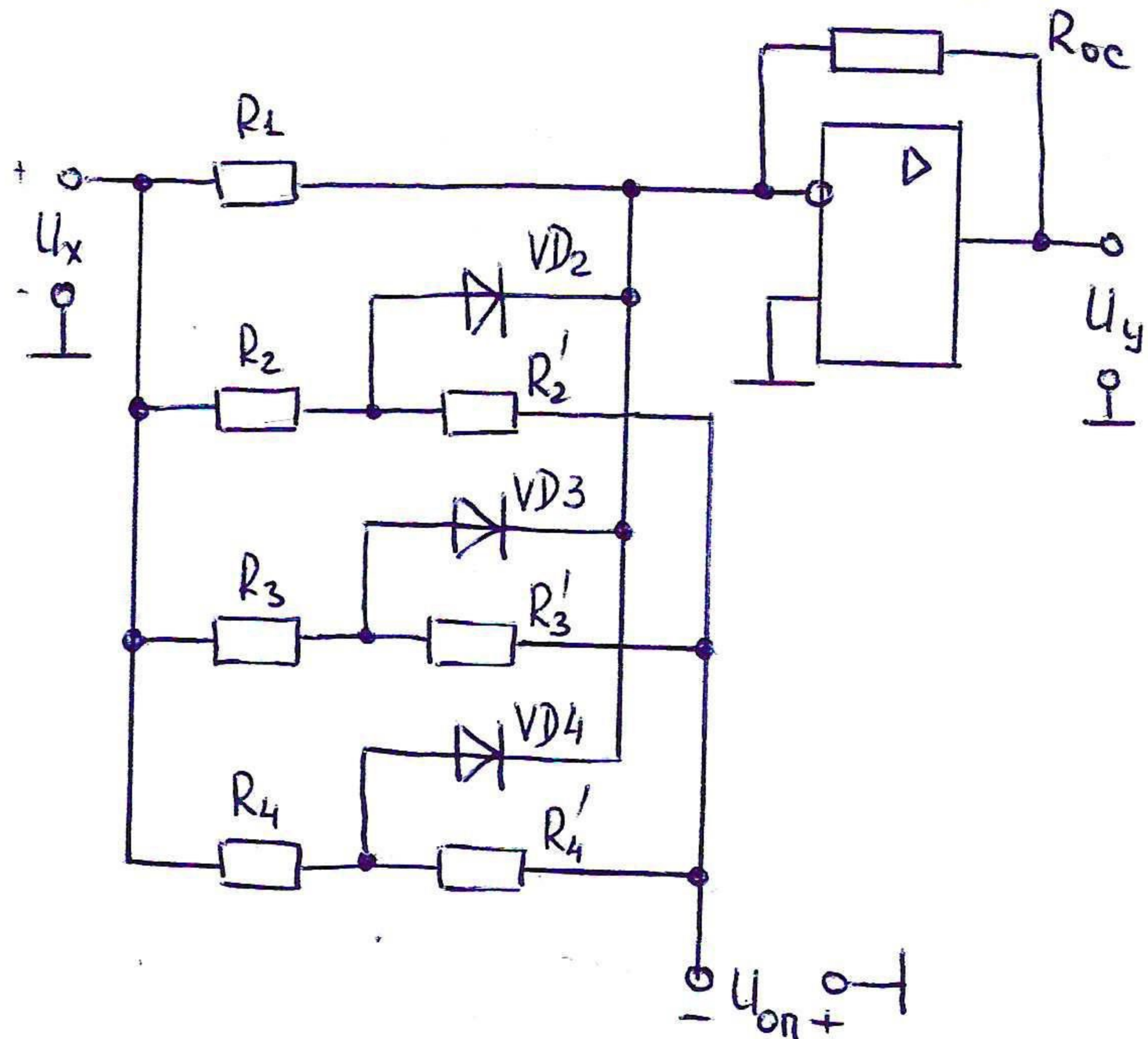


Самое тяжело нарисовать $I_{вх}(U_x)$

ДУР строится аналогично пассивным ДФП.

Наибольшее распространение получили 3 схемы:

1. ДУР с потенциально заземлёнными диодами.



Схему можно построить чтобы диоды работали как на отпирающие, так и на запирающие.

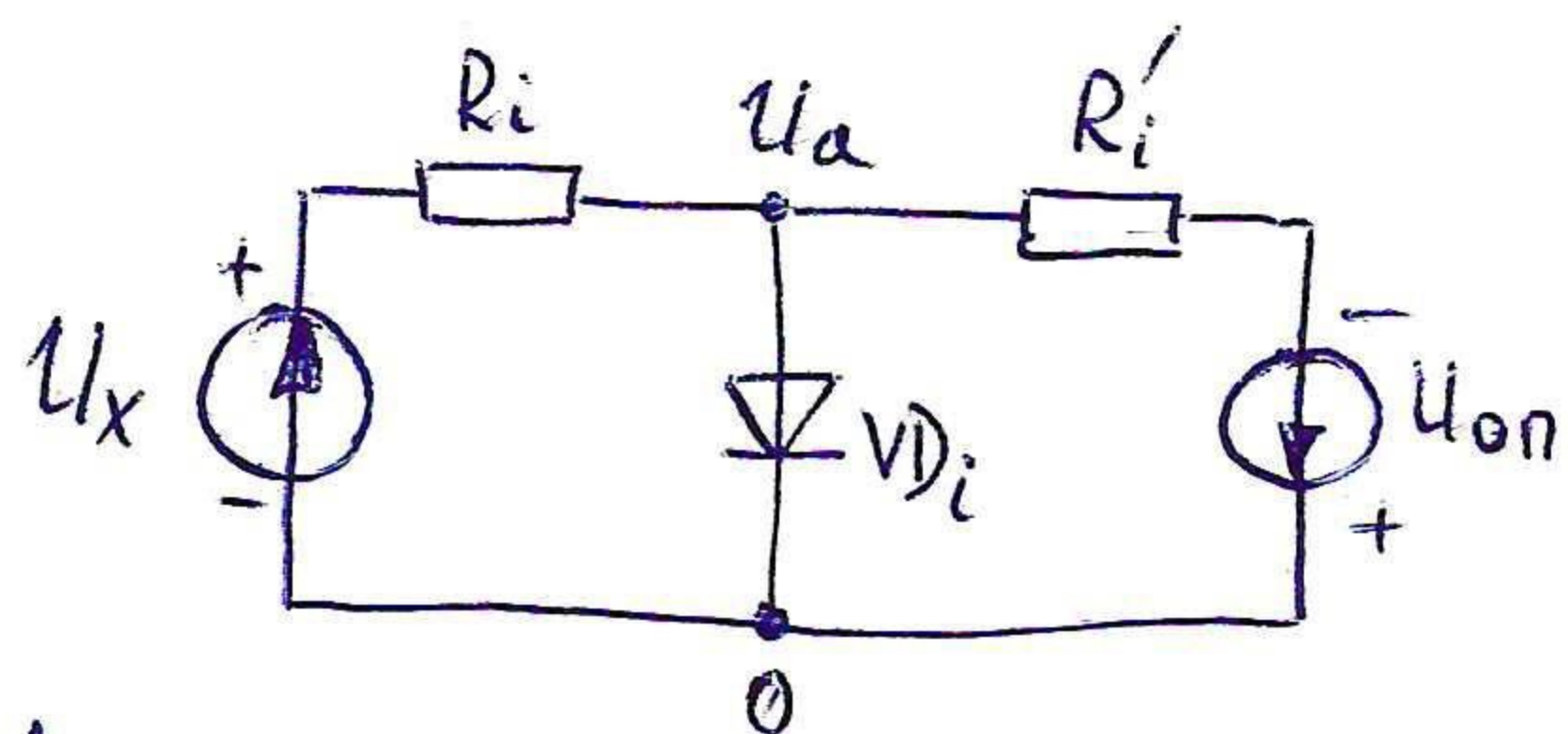
Резисторы R_{0c} и R_1, R_2, R_3, \dots определяют наклоны участков амплитудной характеристики и рассчитываются в первую очередь.

Затем для задания порогов срабатывания рассчитывают резисторы R'_i .

Пусть $U_x > 0$, диоды работают на отпирающие, тогда $U_y < 0$.

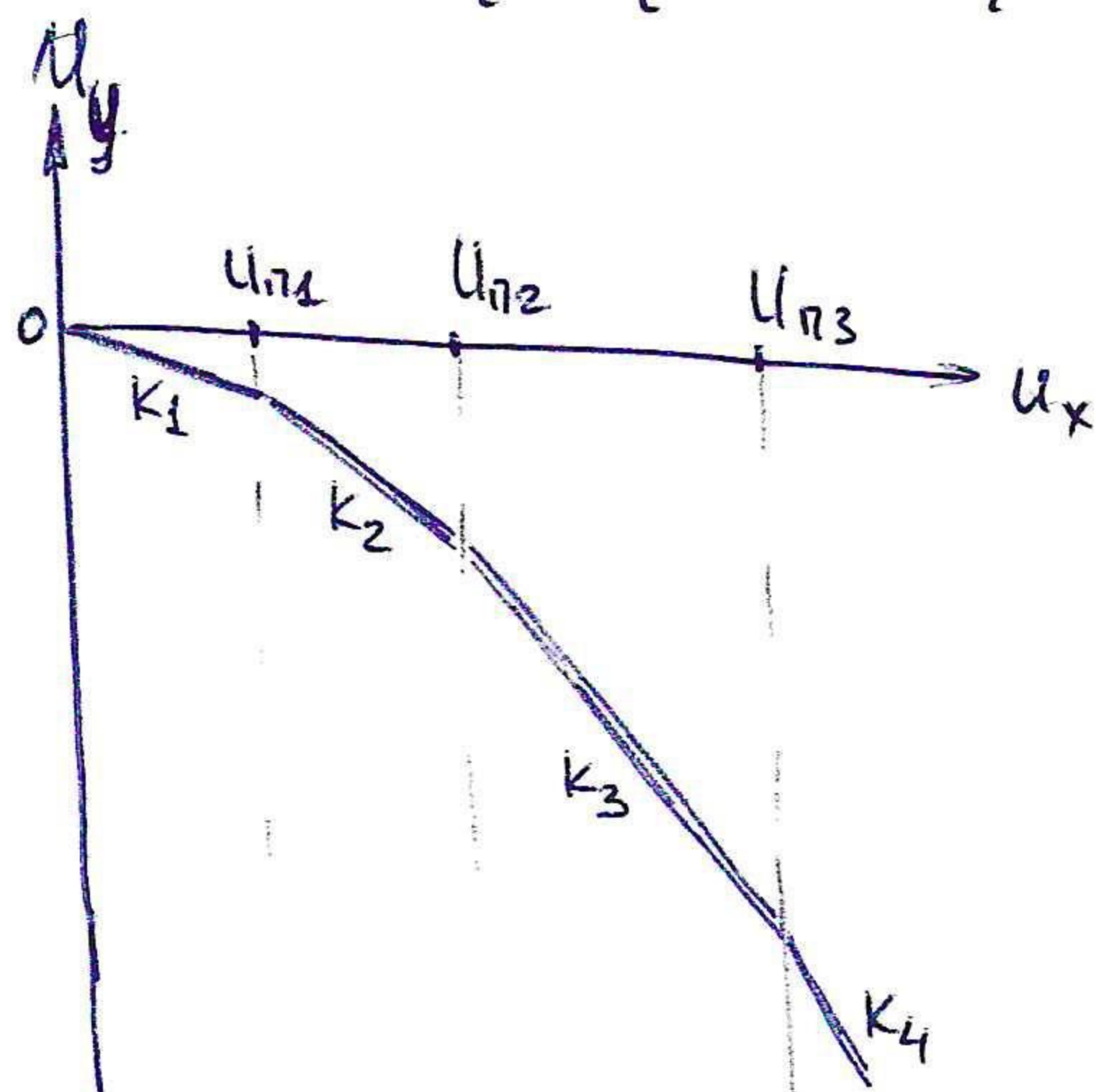
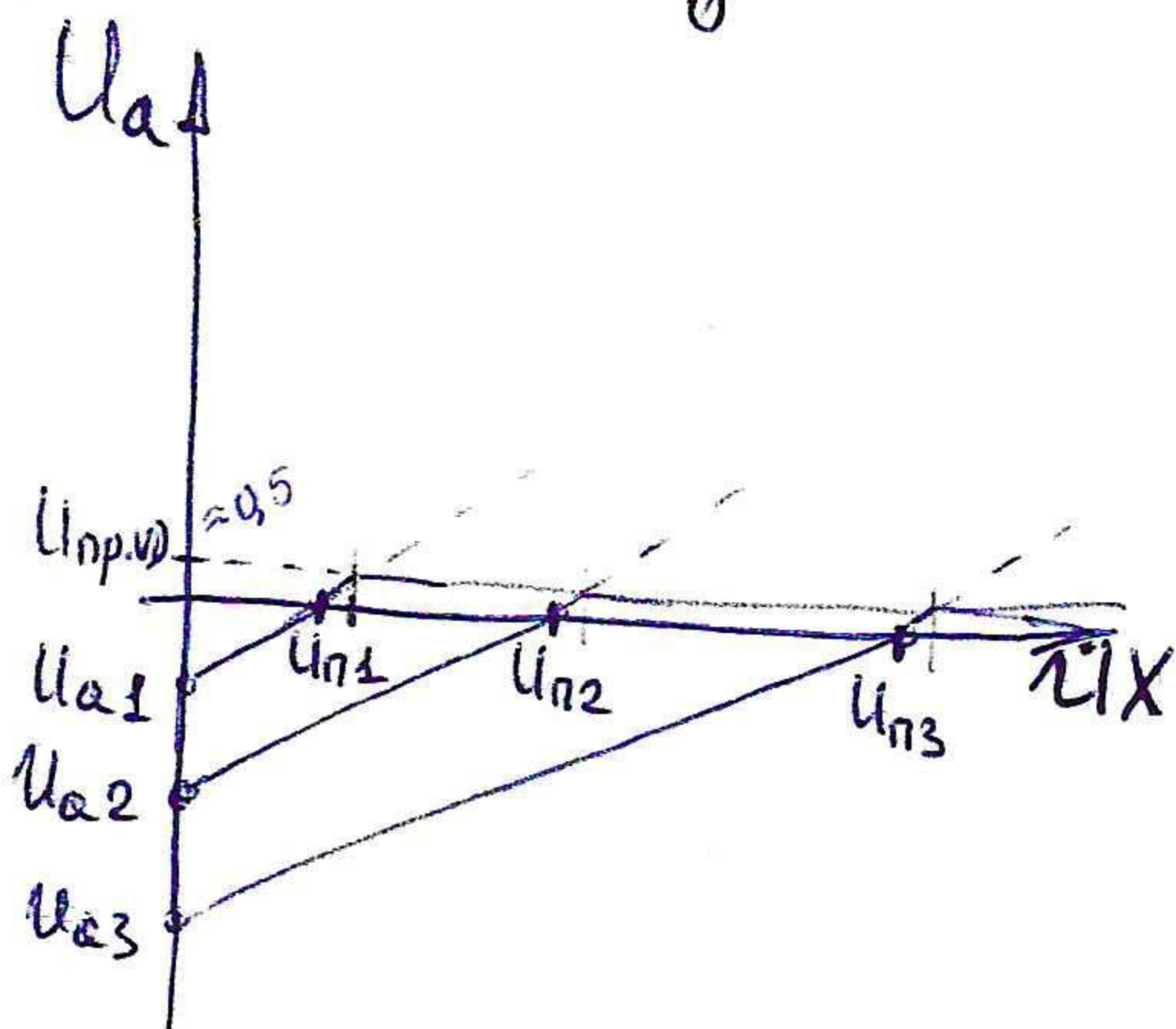
При $U_x = 0$ на аноды диодов подаётся запирающее напряжение $U_{a_i} = -\frac{U_{оп} \cdot R_i}{R_i + R'_i}$;

Эквивалентная схема i -го участка:



при $U_x > 0$,

$$U_a = \frac{U_x \cdot R'_i}{R_i + R'_i} - \frac{U_{оп} \cdot R_i}{R_i + R'_i}$$



$$K_1 = \frac{R_{0c}}{R_1}$$

$$K_2 = \frac{R_{0c}}{R_1 \parallel R_2}$$

$$K_3 = \frac{R_{0c}}{R_1 \parallel R_2 \parallel R_3}$$

⋮

Пороговое сопротивление $R_i' = \frac{(U_{оп} + U_a) \cdot R_i}{U_{пi-1} - U_a}$, если

диоды считать идеальными, то анодное напряжение, при котором диод открывается, равно нулю.

При использовании кремневых диодов принимают

$U_{a\text{откр}} \approx 0,5 \text{ В}$, тогда

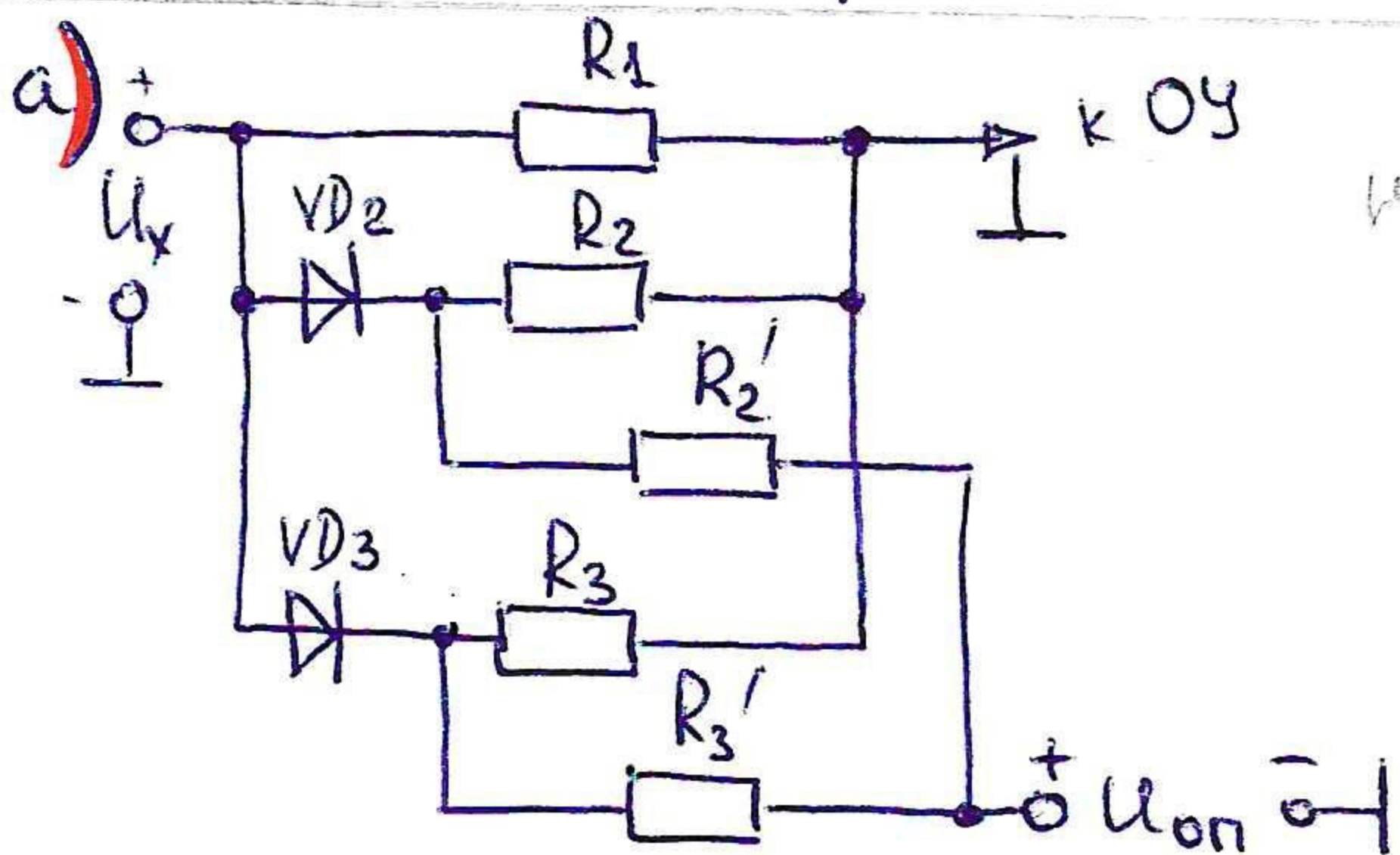
$$R_i' = \frac{(U_{оп} + 0,5) \cdot R_i}{U_{пi-1} - 0,5}$$

Об использо-

вании Ge-х диодов в подобных схемах будет сказано ниже

2. ДУР типа ограничителя.

Существует две схемы:



$U_x > 0$, диоды не открываются!

В данной схеме $U_a = U_x$.
Запирающее напряжение на катодах VD задаётся от $U_{оп}$, которое должно быть положительным.

$$U_{ki} = U_{оп} \frac{R_i}{R_i + R_i'}$$

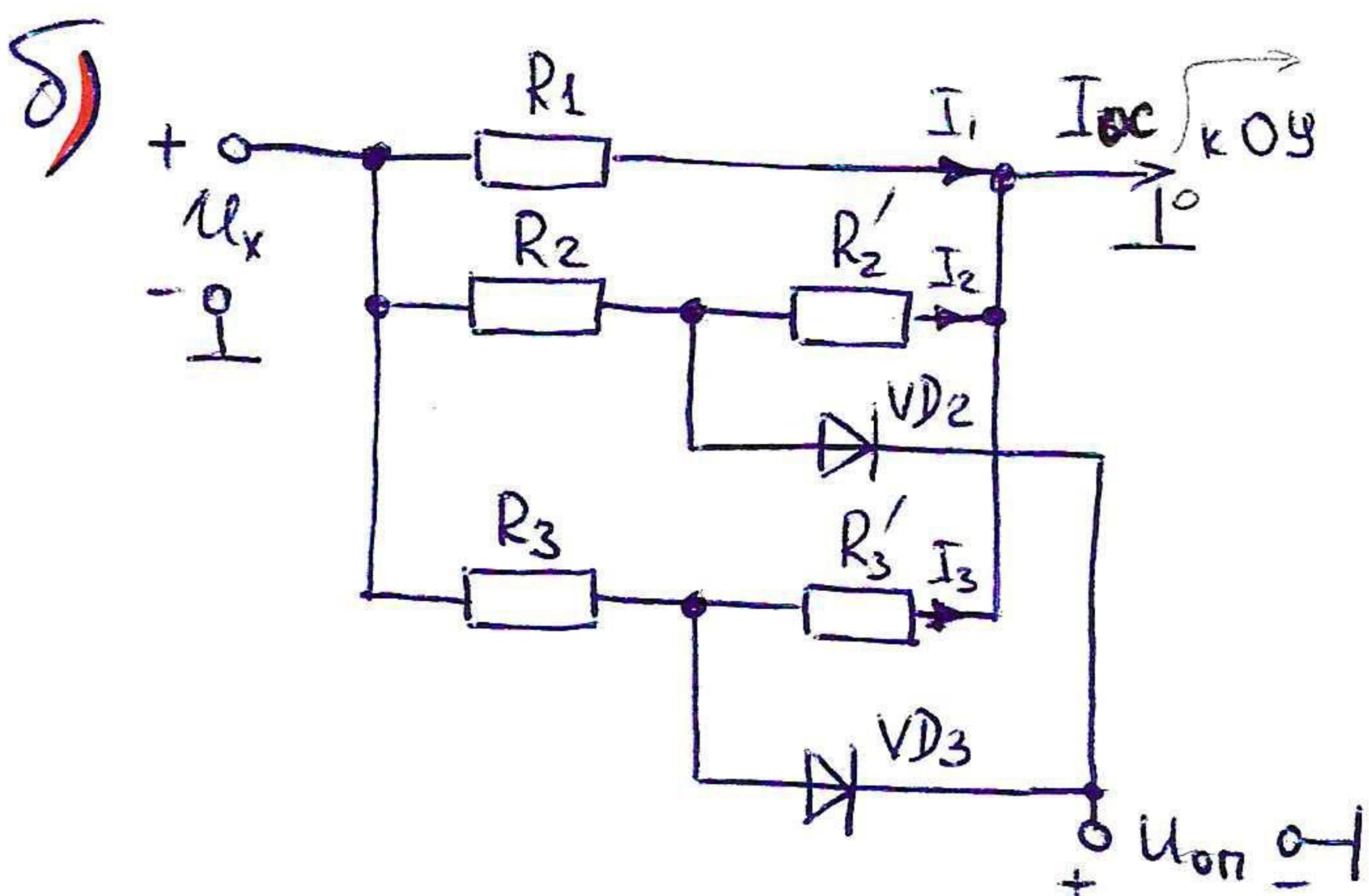
Диод откроется когда $U_x = U_a > U_{ki}$.

$$U_x = U_{оп} \cdot \frac{R_i}{R_i + R_i'} + 0,5 ;$$

0,5 В - прямое падение на Si диоде.

Тогда, если $i = 2, 3, \dots, n$

$$R_i' = \frac{U_{оп} - U_{пi-1} + 0,5}{U_{пi-1} - 0,5} \cdot R_i$$



Если в исходном состоянии все диоды закрыты, то эквивалентное входное сопротивление

$$R_{вх\text{ экв.}} = R_1 \parallel (R_2 + R_2') \parallel (R_3 + R_3') ;$$

$$I_{вх} = I_1 + I_2 + I_3 ;$$

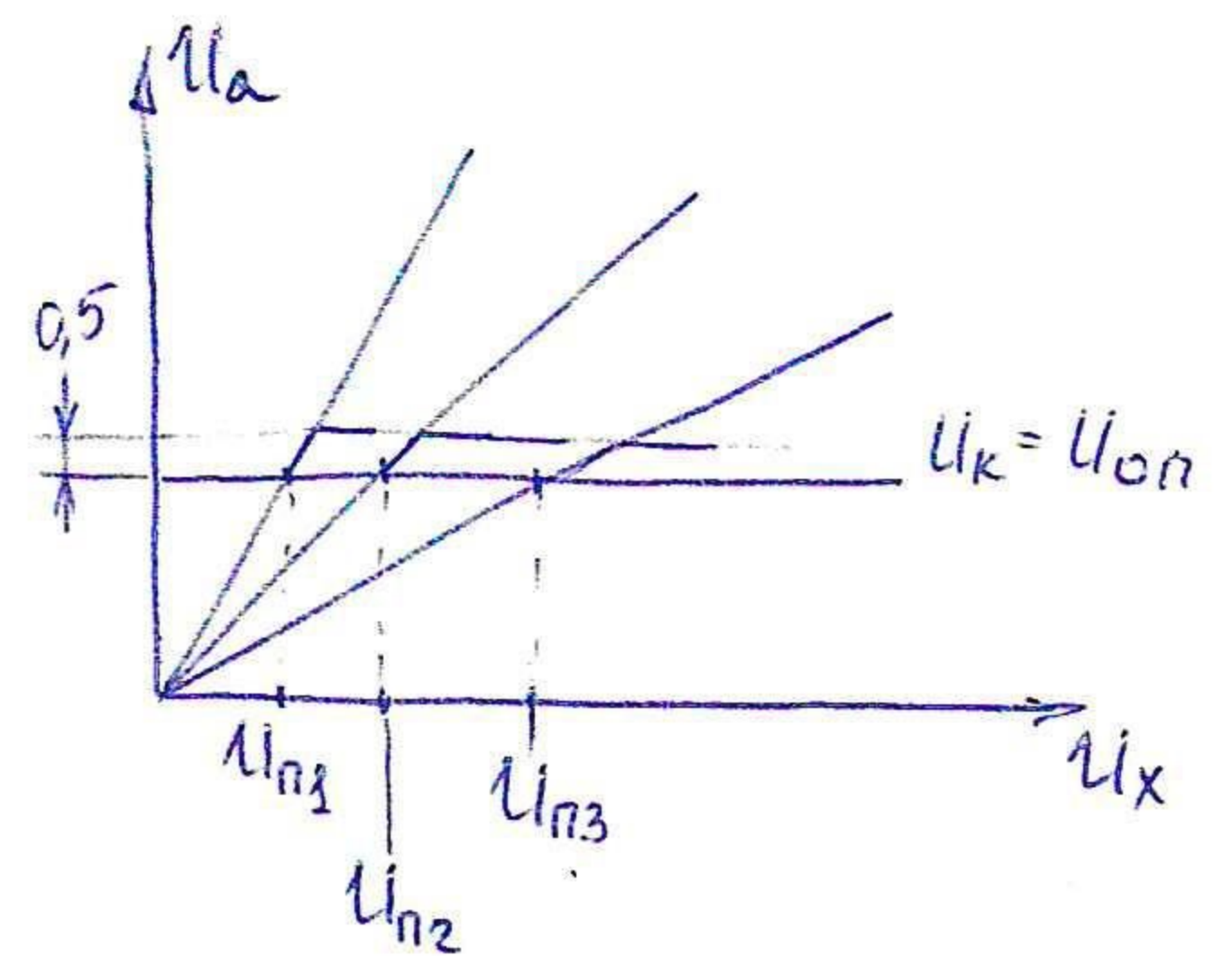
$$I_1 = U_x / R_1 ; \quad I_2 = U_x / (R_2 + R_2') ; \quad I_3 = U_x / (R_3 + R_3') ;$$

При срабатывании диода VD_2 , когда напряжение на его аноде станет больше $U_k = U_{оп}$ на величину прямого падения на диоде, ток $I_2 = \frac{U_{оп} + 0,5}{R_2'}$ и больше не зависит от U_x . Таким образом, в сумме токов I_1 ток I_2 более не растёт при увеличении U_x , следовательно, $I_{ос}$ будет расти медленнее. $U_{вых} = -I_{ос} \cdot R_{ос}$!

$$U_a = U_x \frac{R'}{R+R'} ; \quad U_n \cdot \frac{R'}{R+R'} + 0,5 = U_{оп} + 0,5 ; \quad \frac{U_n}{1 + \frac{R}{R'}} = U_{оп} + 0,5 ;$$

$$\frac{U_n}{U_{оп} + 0,5} - 1 = \frac{R}{R'} ;$$

$$R_i' = \frac{U_{оп} + 0,5}{U_{ni-1} + 0,5 - U_{оп}} \cdot R_i$$



Недостатком рассмотренных схем ДУР является то, что резисторы выполняют две функции одновременно — задают угол наклона АХ и порог срабатывания диодов. При изменении одного резистора при настройке требуется перенастройка всего преобразователя.

Для обеспечения универсальности элементарная ячейка ДУР должна обеспечивать отдельно порог и отдельно наклон АХ.

Погрешности ДФП \rightarrow негативно!

Погрешности ДФП составляют от единиц до нескольких десятков%. Складываются из погрешностей, вносимых ОУ и погрешностей диодов. Погрешность ОУ проявляется в ненулевом входном токе $I_{вхОУ} \neq 0$, к тому же он зависит

Погрешности ДФП

Погрешности ДФП составляют от единиц до нескольких десятков процентов. Складываются из погрешностей, вносимых ОУ, и погрешности, вносимой диодами.

Погрешность ОУ проявляется в наличии входного ^{вх} тока ^{об} ($I_{вх} \neq 0$), причём разность входных токов ($\Delta I_{вх}$ [нА/°С]) зависит от температуры. Необходимо, чтобы $I_{вх} \gg I_{вх\text{ ОУ}}$.

Неидеальность диодов проявляется в наличии обратного тока. При протекании тока через запертые диоды на резисторе обратной связи появляется падение напряжения. Например, при $I_{обр} = 10$ мкА, $n = 10$, $R_{ос} = 100$ кОм получим погрешность выходного напряжения $U_{погр} = -I_{обр} \cdot n \cdot R_{ос} = -10^{-5} \cdot 10 \cdot 10^5 = -10$ В!

Именно поэтому германиевые диоды, имеющие относительно большой $I_{обр}$, **не используют!** Желательно, чтобы $I_{обр} \leq 1$ мкА. Величина $I_{обр}$ зависит от $t, ^\circ\text{С}$.

Наличие прямого сопротивления диодов также вносит погрешность ($r_{пр} \ll R_i$).

Итак, чтобы уменьшить погрешность ДФП необходимо:

- 1) оптимально разделить аппроксимируемую функцию на отрезки (не более 10, но и не менее 5 отрезков);
- 2) выбрать ОУ с малыми входными токами (с полевыми транзисторами на входе);
- 3) использовать кремниевые диоды с малыми обратными токами.