

Введение.  
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОБРАБОТКИ  
АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ  
*Измерение физических величин*

«СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ 2»

© Школа Н.Ф.

*Лекция №1 2017 г.*

# Измерение физических величин

Под измерением понимается последовательность операций, выполняемых над физическим объектом или системой (объект измерения), согласно установленному и задокументированному правилу (**методу, стратегии измерений**) с применением технических средств (**измерительной системы**) с целью определения тех или иных физических свойств объекта или системы.

**Измерение** можно также рассматривать как осуществляемое с помощью технических средств **получение информации** (метрической и/или структурной) о физических свойствах объекта.

Информация, накопленная человечеством на протяжении веков, образует в совокупности наше «представление» о мире. Это представление о мире, или его образ, находит свое отражение в гипотезах, теоремах и законах природы. Поэтому **измерения служат источником нашего научного знания**. Другими словами: «В физике существует только то, что можно измерить» (Макс Планк).

**Информация**, получаемая нами в результате измерения, может содержаться в объекте измерения в двух формах: пассивной или активной.

**Пассивной информацией** называют совокупность сведений, заключенных в том, как устроен объект; такой, например, является информация, содержащаяся в фотографии или перфокарте, а также значение сопротивления резистора.

**Информация** является **активной**, когда она имеет **форму энергетической характеристики** того или иного явления. Такие информационные энергетические явления называются **сигналами**.

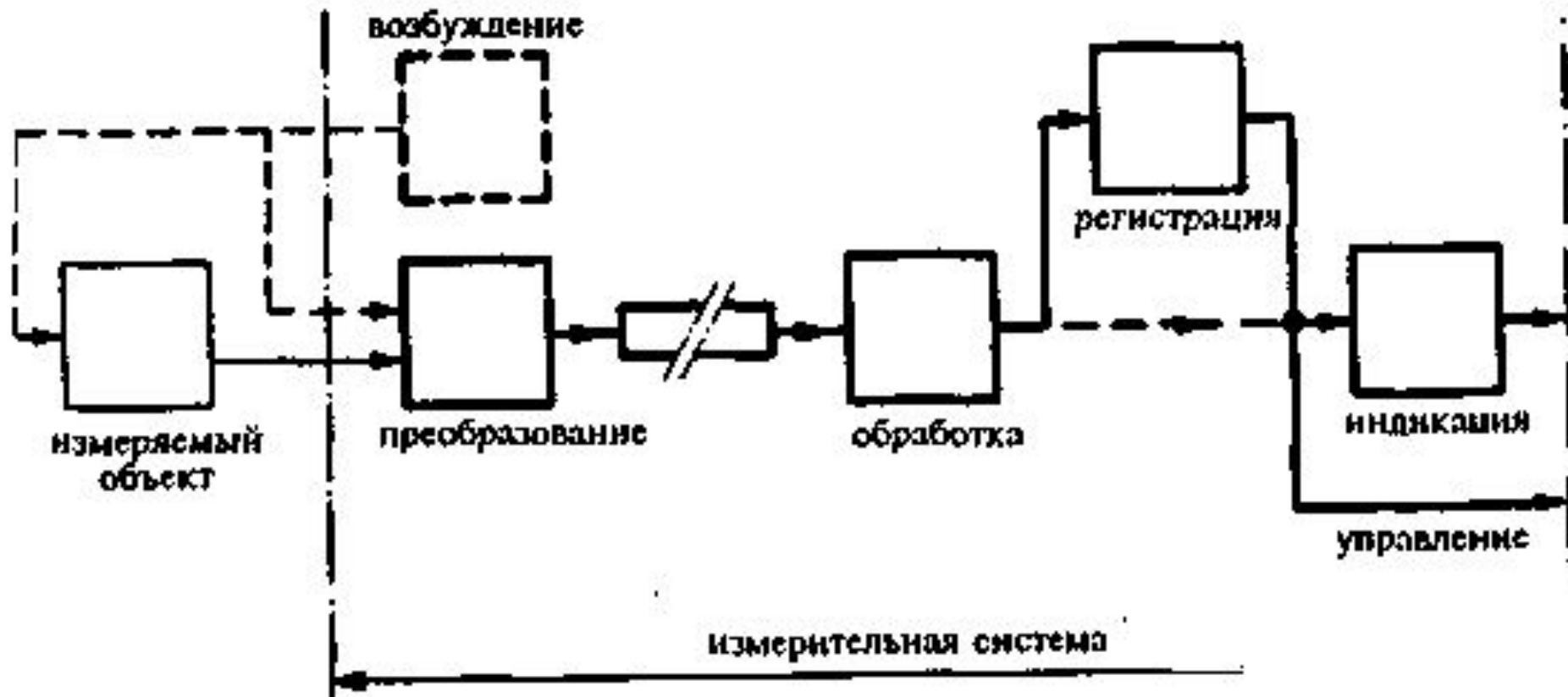
Примерами сигналов служат электрические, оптические и акустические явления, используемые для передачи информации.

# Измерительная система

Часто параметр или переменная величина, которую мы хотим измерить, имеет **электрическую** природу.

Когда нужно измерить неэлектрические параметры или переменные, такие как жесткость, тепловое сопротивление, смещение и т. д., чаще всего применяется того или иного рода **датчик** или **преобразователь**, и система в целом не остается чисто механической или тепловой измерительной системой.

# Обобщенная структура измерительной системы



В датчике входной параметр или переменная **трансформируются** в **электрический выходной сигнал**, который несет информацию об исходной измеряемой величине.

Большим достоинством такого преобразования в электрический сигнал является тот факт, что оно дает нам возможность в дальнейшем **обрабатывать информацию с помощью электроники**, а это совсем не дорогой и гибкий способ обработки. Например, в таком виде информацию легко передавать на большие расстояния при минимальном мешающем действии окружающей среды.

**Передавая** измерительную информацию, мы можем осуществлять измерения на расстоянии (это называют **телеметрией**). Особенно полезно это для измерений в недоступных местах или в агрессивной среде, в атмосфере или при измерении большого числа объектов, которые разнесены далеко друг от друга

Как правило, электрический сигнал на выходе датчика не пригоден для того, чтобы быть непосредственно представленным наблюдателю. Часто бывает необходимо сначала подвергнуть его **обработке** того или иного вида (усилению, фильтрации, коррекции нелинейности датчика и др.).

После такой обработки сигнал может быть представлен наблюдателю. Мы можем **показать результат человеку-наблюдателю** или **управлять** посредством результирующего выходного сигнала механическим **наблюдателем** (автоматом).

Выходной сигнал можно также временно сохранить в памяти и воспользоваться им позднее. В этом случае говорят о **регистрации** результата измерения.

# Датчики

Чтобы обеспечить перенос информации из одной физической области в другую, должна существовать возможность отображать сигналы из одной физической области на сигналы из другой области. Такое отображение осуществляют «преобразователи», которые способны энергетическое физическое явление одного рода (из одной области) преобразовывать в явление другого рода (в другой области). При преобразовании должна сохраняться информация, содержащаяся в исходном энергетическом явлении. Такие сохраняющие информацию энергетические преобразователи называют *измерительными датчиками*.

Кроме отображения сигналов, принадлежащих различным областям, друг на друга, необходимо также иметь возможность отображать друг на друга сигналы из одной и той же области. В этом случае энергетическое явление преобразуется в подобное ему энергетическое явление с сохранением соответствующей информации, содержащейся в исходном явлении. Может понадобиться увеличить мощность явления (усиление мощности), или опустить какую-то ненужную информацию (фильтрация).



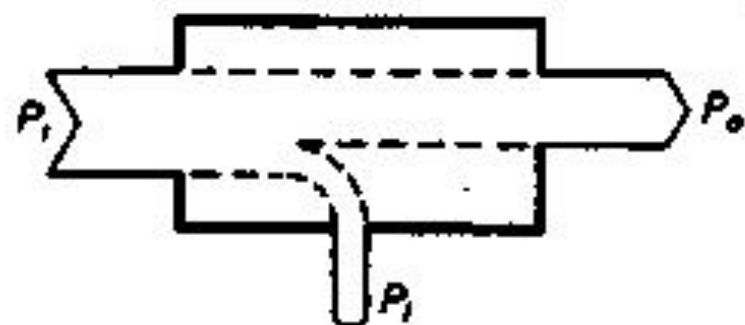
Происходящие в веществе **физические эффекты**, используемые для отображения сигналов из различных областей называют эффектами **переноса**, тогда как для отображения сигналов в пределах одной области используются происходящие в веществе эффекты, называемые **прямыми**.

Вот примеры эффектов **переноса**: из электрической области в тепловую — **эффект Пельтье**; из тепловой области в электрическую — **эффект Зеебека**; из магнитной области в электрическую — **эффект Холла**. Примеры **прямых** эффектов, происходящих в веществе: в электрической области — электрическое сопротивление; в механической области —

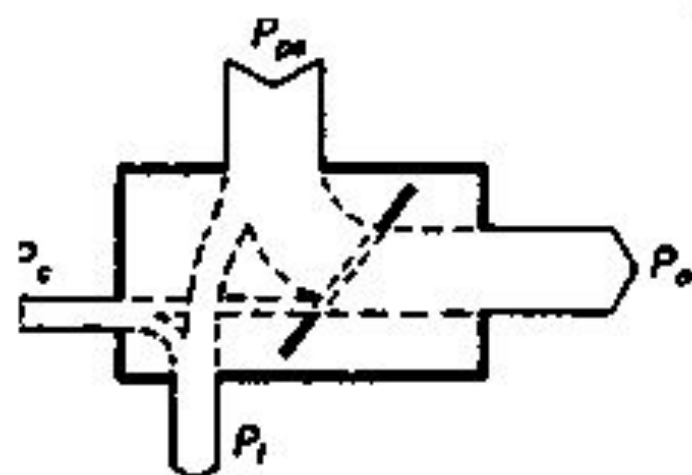
# Типы датчиков

В отношении свойства датчиков преобразовывать энергию различают два типа датчиков: пассивные и активные.

- *Пассивными* являются такие датчики, которые функционируют без потребления энергии от вспомогательного источника;
- *Активными* являются такие датчики, которым требуется вспомогательный источник питания.



(a)



(b)

Рис. 2.68. Пассивный и активный датчики.  $P_i$  — мощность на входе,  $P_o$  — мощность на выходе,  $P_l$  — мощность, которая теряется в процессе преобразования,  $P_c$  — мощность управляющего воздействия,  $P_0$  — мощность вспомогательного источника. (a) Пассивный датчик. (b) Активный датчик.

# Категории датчиков

- датчики, которые отображают сигналы из различных физических областей на сигналы в электрической области,
- обратные преобразователи, которые переводят электрический сигнал в неэлектрическую величину.

Датчики первой категории нужны на **входе** измерительной системы. Поэтому они называются **входными** или **измерительными** датчиками.

Обратные преобразователи нужны на **выходе** измерительной системы для целей индикации и регистрации данных или для управления другими процессами. Поэтому их называют **выходными датчиками** или **исполнительными механизмами**.

# Обработка сигналов

Одной из причин преобразования неэлектрических сигналов в электрические является большое разнообразие и гибкость методов обработки, предлагаемых современной электроникой. Обычно электронный измерительный сигнал или выходной сигнал датчика сам по себе не пригоден для непосредственной индикации, регистрации или управления машиной и поэтому должен быть сначала преобразован. Обработка сигнала может быть линейной, частотно-зависимой (**фильтрация**) или (квази-) частотно-независимой (**усиление, ослабление**). Возможно также выполнение нелинейных операций (**выпрямление, определение среднеквадратичного значения, аналого-цифровое преобразование** и др.). Обработка сигнала может осуществляться многими способами.

## **Устройства индикации**

Устройство, предназначенное для представления результатов измерения человеку-наблюдателю, мы назвали «устройством индикации» (дисплеем). Устройства индикации не обязательно должны быть **аналоговыми** (как, например, электронный луч, рисующий на экране осциллографа), они могут также быть **цифровыми** (например, алфавитно-цифровой дисплей или светящиеся элементы индикации). Как мы уже видели, устройства индикации рассчитаны на визуальное наблюдение и потому являются электрооптическими преобразователями. Чтобы избежать больших ошибок считывания и интерпретации, аналоговые устройства индикации должны быть особенно хорошо согласованы с потребностями наблюдения. Эта проблема решается, в частности, путем применения **гибридных устройств индикации**.

## **Регистрация данных**

Данные регистрируются для того, чтобы они были доступны позднее, например, для представления наблюдателю в более удобное время. К регистрации часто прибегают в тех случаях, когда собирается большое число результатов измерений и нужно облегчить производимый вслед за этим анализ полученных результатов.

Другим поводом для регистрации данных служит желание предотвратить необходимость повторения измерений (в частности, когда опыты крайне дороги, например, эксперименты по столкновению частиц). Для того, чтобы облегчить интерпретацию результатов измерений, часто осуществляют графическую запись. Например, электрическая активность сердца регистрируется в виде электрокардиограмм, то есть в форме графиков в координатах  $x - t$ .

## *Управление, обратная связь*

Бывает так, что результат измерения не регистрируется и не воспроизводится средством индикации, а непосредственно используется для управления каким-то процессом.

Целью управления процессом является такое регулирование, при котором выходной продукт соответствует определенным требованиям. Измеряются один или большее число параметров процесса, и регулирование осуществляется таким образом, чтобы уменьшить различие между измеряемыми величинами и заданными наперед значениями.



## ***Виды управления***

Если управление основано на измерении такого параметра процесса, на котором не отражается результирующее изменение характеристик процесса, то считается, что регулирование процесса осуществляется по принципу ***автоматического управления «вперед»*** (разомкнутая система управления).

Однако в том случае, когда управление базируется на измерениях, результаты которых зависят от предшествующих управляющих воздействий, возникает замкнутый контур (который в отдельных случаях, в принципе, может приводить к неустойчивости). Этот последний метод управления процессом носит название ***управления с обратной связью***.

# Результат измерения

$$\text{величина} = \{\text{значение}\} \times [\text{единица}]$$
$$x = \{x\}[x].$$

Тогда для векторной физической величины справедливо равенство

$$\mathbf{x} = \{x\}[x]\mathbf{e}.$$

Результат измерений должен верно представлять значение измеряемой величины. Однако у такого представления всегда бывают изъяны в виде ошибок; следовательно, **результат не обеспечивает абсолютно точного образа того, что измеряется.**

К сожалению, **каждое измерение сопровождается ошибками**, то есть всегда существует различие между результатом измерения и истинным значением измеряемой физической величины. Значение ошибки никогда нельзя узнать точно; его можно только оценить.

Результат измерения может быть правильным только в определенной степени, поэтому информация об измерении оказывается осмысленной только в том случае, когда одновременно с результатом измерения имеются сведения об ошибке измерения.

При этом величина ошибки может **казаться** скрытой.

# Ошибки измерения

Погрешность измерения можно отнести к одной из двух категорий: *неправильность в действиях* и *ошибка измерения*.

**Неправильность в действиях** возникает из-за промаха оператора, действия которого не согласуются с правильной процедурой измерения; примерами таких промахов являются считывание показаний по неправильной шкале, неправильная настройка, перегрузка и т. д. **Их можно полностью избежать, выполняя измерения аккуратно.**

**Ошибки измерения**, в свою очередь, могут быть двух типов: *систематические ошибки* и *случайные ошибки*. На практике ошибки обоих типов присутствуют одновременно.

# Систематические ошибки

Когда мы несколько раз измеряем какую-то определенную физическую величину с помощью одной и той же измерительной системы, поддерживая условия измерения неизменными, мы сталкиваемся с наличием ошибок, **значение которых раз от раза остается одинаковым**. Эти ошибки называются **систематическими**.

Примерами таких ошибок служат ошибки вследствие нагружающего действия или рассогласования, вызываемых влиянием измерительной системы на объект испытаний. Другой пример - это ошибки, обусловленные неточным знанием передаточных характеристик системы; это - системные ошибки.

# *Источники систематических ошибок*

Возникновение систематических ошибок можно проследить, тщательно анализируя весь измерительный тракт от измеряемого объекта до наблюдателя через измерительную систему.

Путь выявления таких систематических ошибок состоит в проведении измерения по совершенно другому принципу и с помощью другой аппаратуры (**метод повторений**).

# Случайные ошибки

**Случайными** являются такие ошибки, которые меняются непредсказуемо от одного измерения к другому при определении одной и той же физической величины с помощью одной и той же аппаратуры при неизменных условиях.

Обычно они бывают **обусловлены большим числом факторов**, которые влияют на результат измерения **независимо**.

Мы не можем скорректировать случайные ошибки, так как нам **неизвестны** их **причины** и следствием их являются **случайные колебания** результата измерения (непредсказуемые).

# Примеры случайных ошибок

Примерами случайных ошибок служат ошибки наблюдателя при **считывании показаний** прибора с аналоговой шкалой (такого, как термометр), **ошибки регулировки** или выравнивания при установке нуля или при настройке измерительного прибора (например, при балансировке моста), а также **ошибки округления**.

Все, о чем мы можем говорить, имея дело со случайными ошибками, это вероятность того, что ошибка будет той или иной величины.

Теория вероятностей и статистика дают нам возможность делать определенные утверждения при наличии случайных ошибок.



# Источники ошибок

Рассмотрим источники возможных ошибок на основе структурной схемы измерения

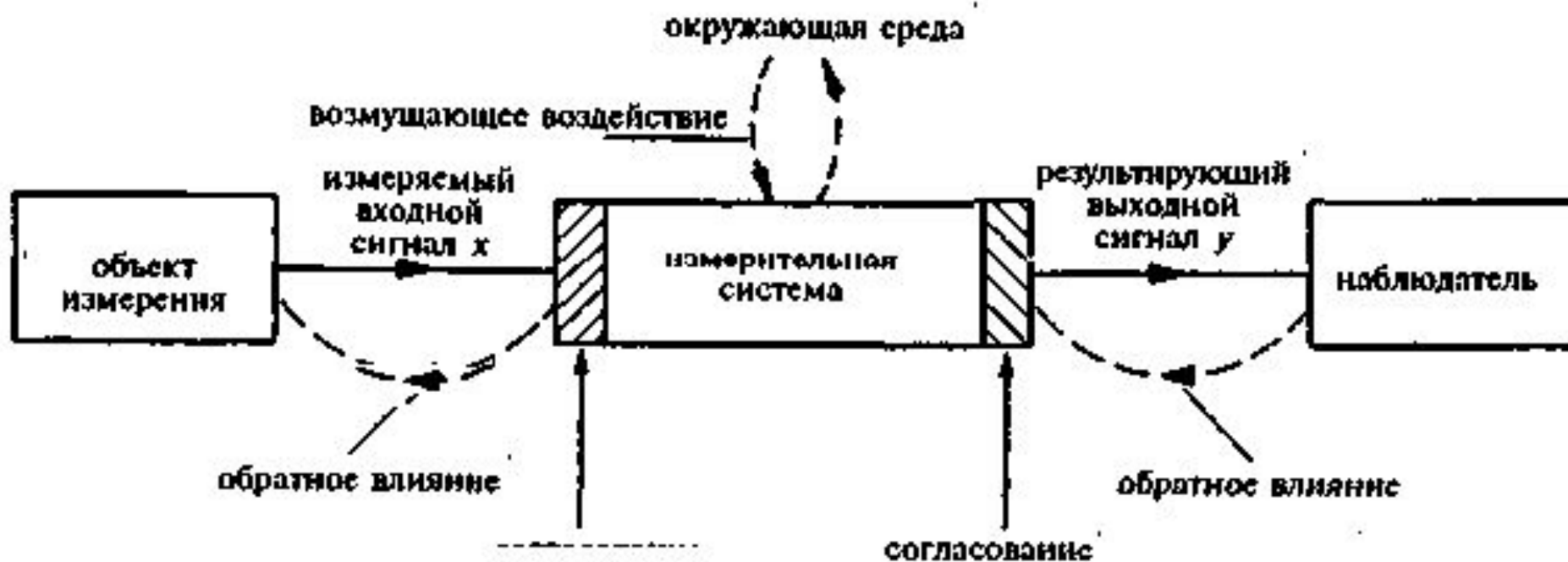


Рис. Взаимодействия измерительной системы с исследуемым объектом, окружающей средой и наблюдателем.

- *ошибка обратного влияния.* Необходимо согласовать входной каскад измерительной системы (заштрихованный);
- *ошибка взаимодействия* между выходом измерительной системы и наблюдателем;
- окружающая среда существенно влияет на результат работы измерительной системы, это *взаимодействие с окружающей средой* нежелательно, оно вызывает возмущения и помехи. Об этом источнике ошибок измерения говорят как о *возмущающем* или «мешающем» воздействии;
- источником ошибок измерения являются (несовершенные) *характеристики* самой измерительной системы. Если характеристики системы не соответствуют требованиям данного измерения, то они приводят к тому, что измерения оказываются неправильными.

# ***Обратное влияние на измеряемый объект: согласование***

В зависимости от ситуации различают три типа такого согласования:

- *Анэнергетическое согласование;*
- *Энергетическое согласование;*
- *Согласование по шуму.*

# ***Анэнергетическое согласование***

Целью анэнергетического согласования является сведение к минимуму передачи энергии или мощности между объектом измерения и измерительной системой.

В результате согласования в процессе измерения никакая (сколько-нибудь ощутимая) энергия не передается на измеряемый объект и не потребляется от него.

# Пример аэнергетического согласования

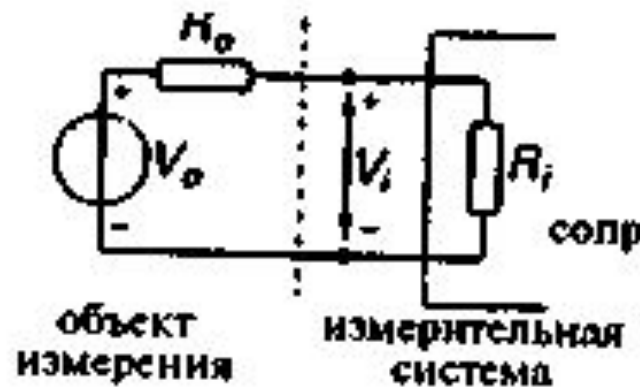


Рис. иллюстрирует принцип аэнергетического согласования при измерении  $V$ -величины  $V_0$ . Результат действия измерительной системы пропорционален значению  $V_i$ , которое равно

$$V_i = V_0 \frac{R_i}{R_i + R_0}$$

Отсюда следует, что для точного измерения  $V$ -величины необходимо, чтобы входное сопротивление измерительной системы было много больше, чем внутреннее сопротивление объекта измерений.

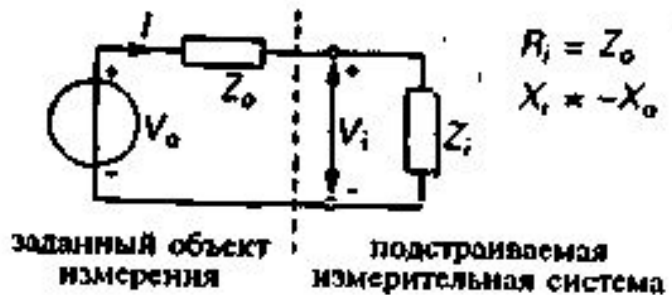
# Энергетическое

## согласование

Целью согласования такого типа является извлечение максимально доступной мощности из измеряемого объекта, чтобы усиление мощности в измерительной системе могло быть возможно меньшим.

Энергетическое согласование особенно важно для пассивных измерительных систем, то есть для таких систем, внутри которых не происходит усиления мощности.

Нетрудно получить условия, которым должен удовлетворять входной импеданс  $Z_i$  такой системы, чтобы максимизировать среднюю мощность  $P_{avg}$ , поступающую в измерительную систему от данного объекта измерений.



Данный объект измерения с (обобщенным) внутренним сопротивлением  $Z_o$  отдаёт наибольшую мощность, если входной импеданс измерительной системы равен

$$Z_i = Z_o^*$$

$$R_o = 0$$

и  $X_o = -X_i$  (условие резонанса).

# Согласованная передача ВЧ-сигналов

Для передачи высокочастотных измерительных сигналов по соединительным линиям от объекта измерения к измерительной системе осуществляется согласование другого вида: **согласование с характеристическим импедансом** сигнальной линии или **согласование по отсутствию отражения**. Для очень длинных однородных кабелей можно ввести понятие о так называемом характеристическом импедансе.

Характеристический импеданс кабеля равен входному сопротивлению кабеля бесконечной длины. Обозначим импеданс измеряемого объекта  $Z_o$ , характеристический импеданс кабеля  $Z_c$  и входной импеданс измерительной системы  $Z_i$ ; тогда согласование с характеристическим импедансом достигается при

$$Z_o = Z_c = Z_i$$

Если это условие удовлетворяется, то отражений от концов кабеля нет!



# Соединительная линия без потерь

Для кабеля без потерь характеристический импеданс имеет вид

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = R_c,$$

где  $L$  — погонная индуктивность, которой обладают образующие кабель проводники, а  $C$  — погонная емкость между ними.

У характеристического импеданса кабеля без потерь имеется только действительная часть а мнимой части нет. Поэтому для согласования по

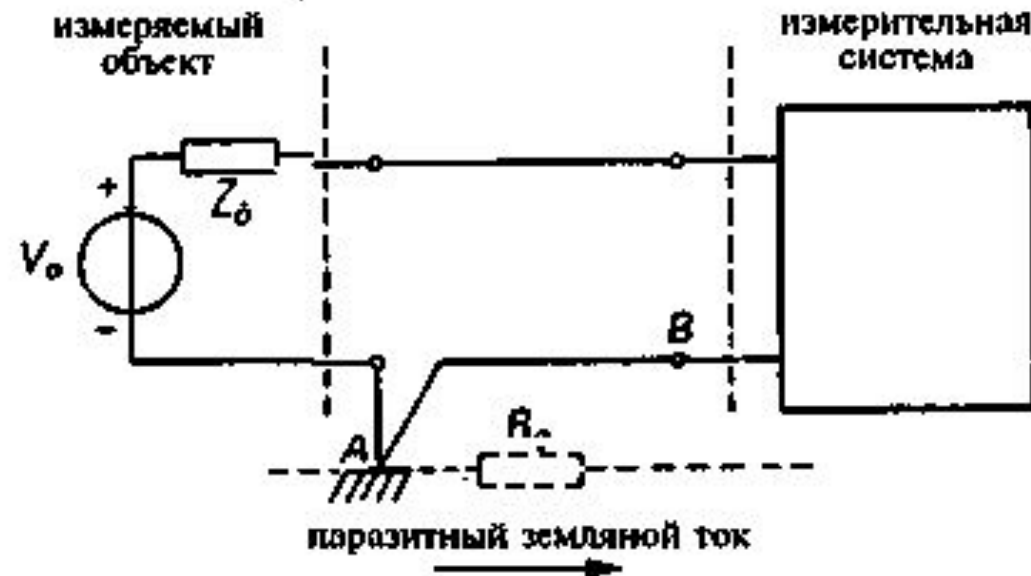
отсутствию отражения требуется, чтобы  $R_0 = R_c = R_i$

Тип линии	Характеристическое сопротивление
коаксиальный кабель	50 - 75 Ом
скрученная пара	50 - 150 Ом
проводники на печатной плате	100 - 120 Ом
ленточный кабель (2,5 см)	200 - 300 Ом
свободное пространство	376 Ом



# Правило единственной точки заземления

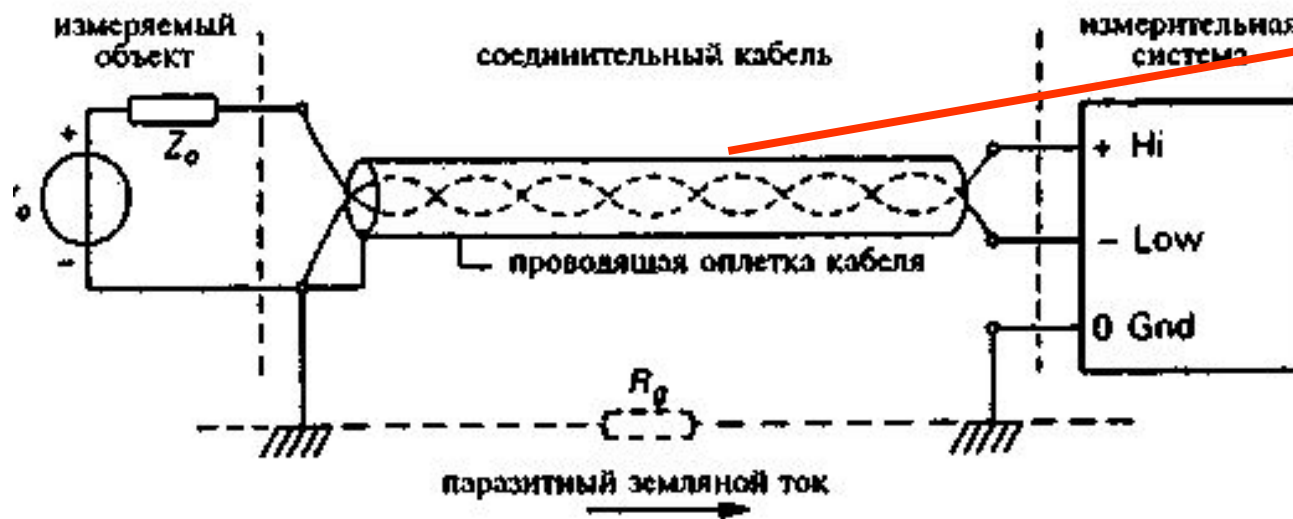
Способ, к которому часто прибегают, чтобы избежать влияния паразитных токов, состоит в строгом следовании правилу *единственной точки заземления* для измеряемого объекта и измерительной системы (чтобы исключить замкнутый контур):



Теперь напряжение на  $R_g$  остается в стороне от входной цепи измерительной системы и потому не оказывает влияния. Для большинства измерений этот метод заземления является предпочтительным и обеспечивает надлежащее устранение помех от паразитных токов. Однако малое напряжение помехи присутствует, так как система заземлена посредством проводника **AB**. По этому проводнику течет **ток земли измерительной системы**

# Симметричный (дифференциальный) вход

Чтобы в еще большей степени избежать влияния помех, возникающих в результате несовершенства заземления, целесообразно воспользоваться измерительной системой с **симметричным входом** относительно земли. При таком устройстве входной цепи вход называют также **плавающим или дифференциальным**.



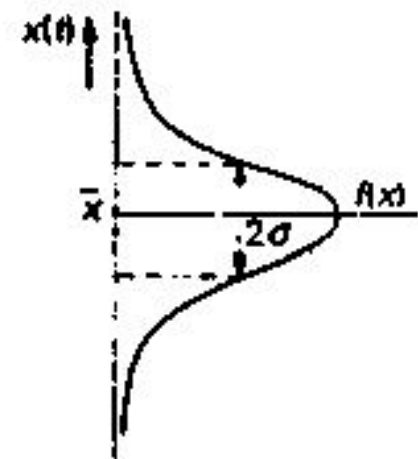
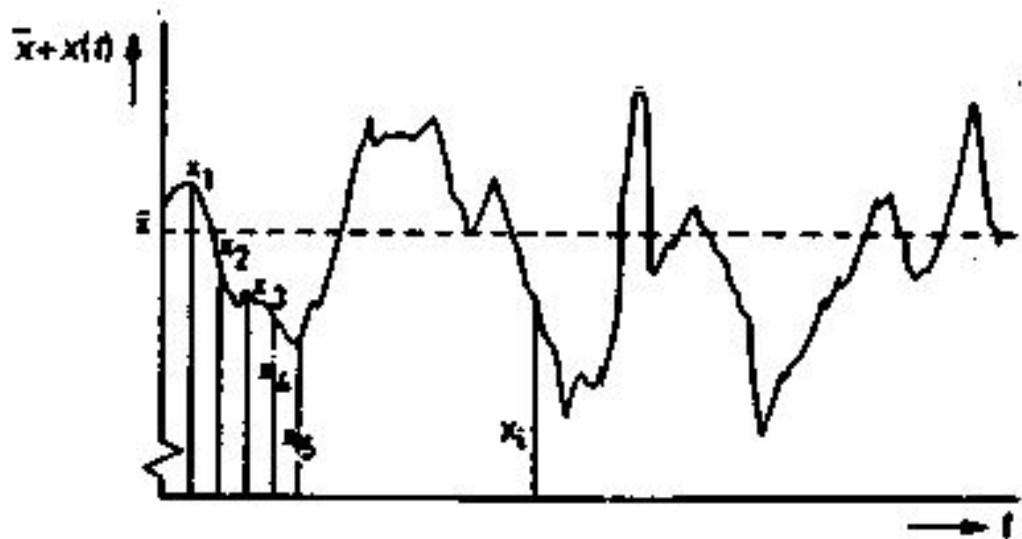
Кабель – скрученная пара в экранирующей оплетке

Ток земли измерительной системы потечет через отдельную клемму 0 и поэтому останется в стороне от входной цепи. Напряжение, возникающее на сопротивлении земляной шины  $R_g$ , накладывается на потенциалы обоих входных зажимов (относительно клеммы 0).

# Согласование по шуму

Целью *согласования по шуму* является достижение таких условий, когда измерительная система добавляет к измеряемой величине возможно меньше шума.

На рис. изображено постоянное напряжение со средним по времени значением  $x$  с наложенным на него шумом. *Среднее по времени значение шума равно нулю.* Справа показано распределение плотности вероятностей зашумленного сигнала.



# Параметры зашумленного сигнала

Среднеквадратическое значение только шумовой составляющей имеет вид:

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

и асимптотически стремится к стандартному отклонению выборочных значений

$$x_{\text{RMS}} = \sigma_x$$

поэтому среднеквадратическое значение шума равно его стандартному отклонению. Из этого сразу следует, что **средняя мощность искаженного шумом сигнала  $P$**  пропорциональна его дисперсии;  $P_{\text{avr}} = V^2/R = I^2R$ , где  $V$  и  $I$  - действующие значения напряжения и тока.

# Параметры аддитивной смеси сигналов

Сумму двух искаженных шумом сигналов  $a(f)$  и  $b(t)$  можно представить, складывая их мощности или их мгновенные значения при условии, что эти сигналы **некоррелированы**. Последнее утверждение является необходимым условием справедливости правила Гаусса. Поэтому оно относится только к нахождению мощности суммарного сигнала как результата сложения мощностей двух шумовых сигналов. Выражая сложение мощностей в терминах среднеквадратических значений, получим

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{a_{\text{RMS}}^2 + b_{\text{RMS}}^2}.$$

# **Источники помех**

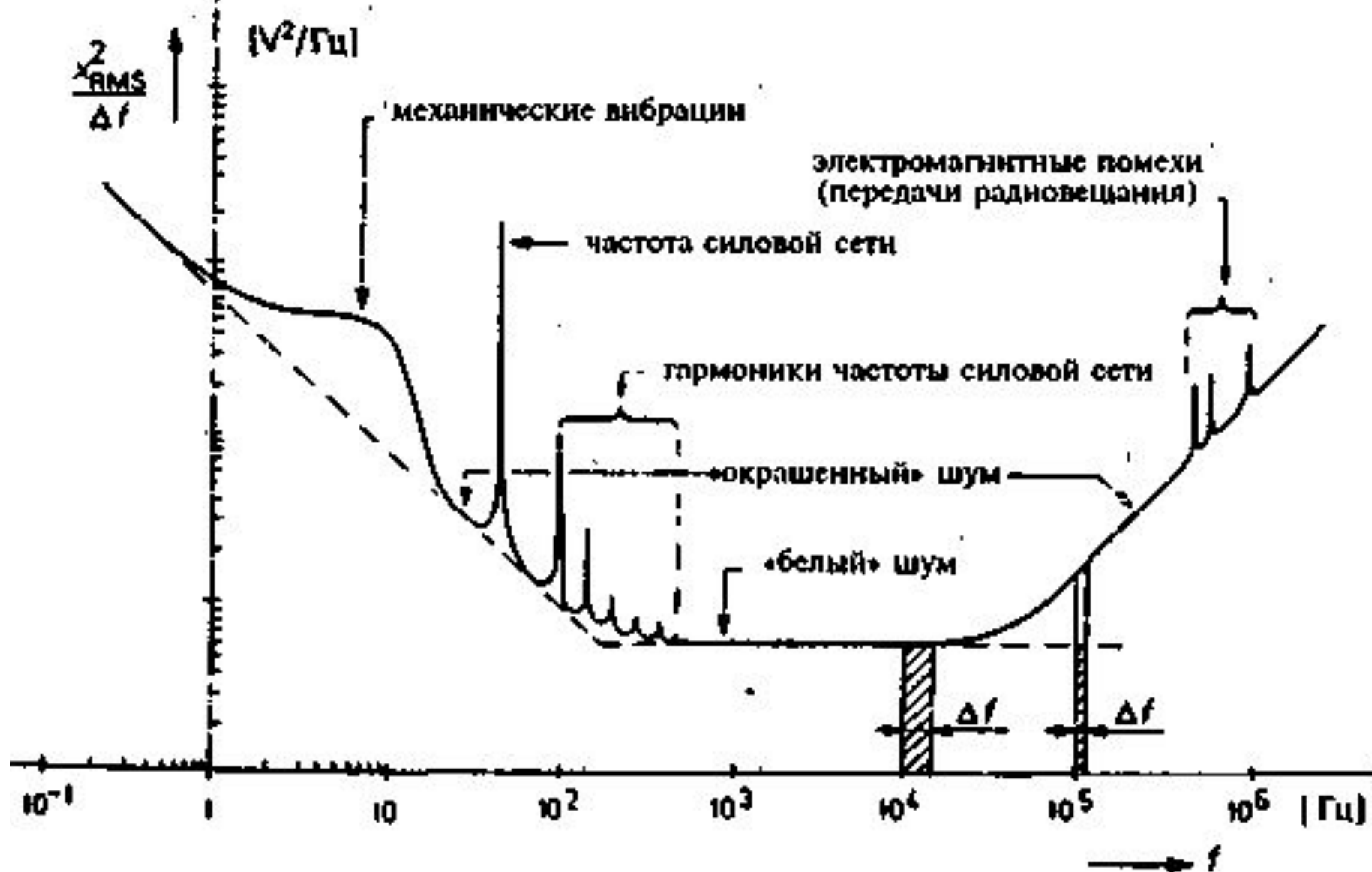
Измерительная система передает на выход не только полезный сигнал, но и нежелательные колебания, возникающие внутри и поэтому называемые **собственными помехами**.

Основными из них являются

- **фон,**
- **наводки,**
- **шумы,**
- **дрейф нуля** (в усилителях постоянного тока),
- **(микрофонный эффект).**

# Спектр шума и помех

Обычно шум занимает широкую полосу частот. Как правило, мощность шума, заключенного в заданном узком интервале частот не остается одной и той же в различных точках на оси частот.



# Источники шума

- **Тепловой** шум (белый)

$$S_u = 4 \cdot k \cdot T \cdot R, \text{ В}^2 / \text{Гц}$$

- **Дробовый** шум (белый)

$$S_i = 2 \cdot q \cdot I, \text{ А}^2 / \text{Гц}$$

- **Фликкер** - шум (шум мерцаний), **1/f-шум**:

$$S(f) = S(f_1) \cdot \left( \frac{f_1}{f} \right)^a, a = 1 \text{ — типное.}$$



# Мера шума

Мерой того, в какой степени можно различать наличие сигнала на фоне шума или его отсутствие, служит **отношение сигнал/шум**:

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{Мощность сигнала}}{\text{Мощность шума}}$$

В этом выражении под мощностью сигнала понимается мощность сигнала, рассеиваемая в нагрузке, подключенной к источнику сигнала (во входной цепи измерительной системы), а под мощностью шума - мощность шума, рассеиваемая в той же самой (нешумящей) нагрузке.

*Обе мощности относятся к одному и тому же малому интервалу частот. Обычно отношение сигнал/шум зависит от частоты.*

# Коэффициент шума

Как упоминалось выше, в измерительной системе происходит добавление шума к сигналу. Мерой увеличения шума является **коэффициент шума**:

$$F = \frac{N_0}{N'_0} .$$

$N_0$  — мощность шума на выходе шумящей измерительной системы, на вход которой подан искаженный шумом измерительный сигнал;

$N'_0$  — это мощность шума на выходе той же самой системы в предположении, что сама она на этот раз не шумит.

В этом последнем случае шум возникает на выходе только как результат прохождения через систему вместе с измеряемым входным сигналом.

# Связь коэффициента шума с отношением сигнал/шум

Введем, по определению, коэффициент усиления мощности  $G$  измерительной системы как  $G = S_o / S_i$

где  $S_o$  - мощность сигнала, которая рассеивается в импедансе нагрузки на выходе системы, а  $S_i$  — мощность сигнала, рассеиваемая на входном импедансе системы. Тогда получим:

$$F = \frac{N_o}{S_o} \frac{S_o}{N_o'} = \frac{N_o}{S_o} \frac{S_i G}{N_i G} = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o},$$

где  $N_i$  — мощность шума, поступающая из измеряемого объекта, которая рассеивается на входном импедансе измерительной системы.

Следовательно, **коэффициент шума показывает также ухудшение отношения сигнал/шум, обусловленное измерительной системой.**

## ***Влияние характеристик измерительных систем***

Мы рассмотрим здесь несколько характеристик измерительных систем, которые могут влиять на **правильность результата измерения**.

Если один или большее число параметров, отражающих эти характеристики, не соответствуют требуемым (или заданным) значениям, то при измерении будут происходить ошибки.

# Чувствительность

**Чувствительность  $S$**  (линейной) измерительной системы — это отношение величины выходного сигнала  $y$  к величине входного сигнала  $x$ .

$$S = \frac{y}{x}.$$

Чувствительность измерительной системы, вообще говоря, зависит от частоты:  $S = S(\omega)$ .

Чувствительность измерительного усилителя обычно называют усилением, тогда как в отношении (измерительных) систем в общем случае говорят о передаточной функции. Помимо чувствительности иногда используют масштабный коэффициент  $W$ , равный, по определению,

$$W = \frac{1}{S} = \frac{x}{y}.$$

*Именно масштабный коэффициент, как правило, бывает указан для осциллографов.*

# Чувствительность

Когда передаточное соотношение  $y = f(x)$ , связывающее выходной сигнал  $y$  (отсчет) и входной сигнал  $x$  (величину, которая должна быть измерена), является нелинейным, нельзя говорить о чувствительности, так как отношение выходного сигнала  $y$  ко входному сигналу  $x$  меняется в зависимости от величины  $x$ . Для таких нелинейных систем мы введем дифференциальную чувствительность. По определению, дифференциальная чувствительность  $S_{diff}$  измерительной системы, описываемой соотношением  $y$ , при

$$S_{diff}(x_0) = \left( \frac{df(x)}{dx} \right)_{x=x_0}$$

на

*У нелинейной системы  $S_{diff}$  зависит от значения входного сигнала  $x$*

$$S_x^y = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{df(x)}{dx} \cdot \frac{x}{y}$$

*Коэффициент чувствительности  $y$  к изменениям в  $x$*

# ***Порог чувствительности***

Невозможно увеличивать чувствительность измерительной системы до бесконечности (например, путем увеличения коэффициента усиления): идя по этому пути, мы столкнемся с *порогом чувствительности*.

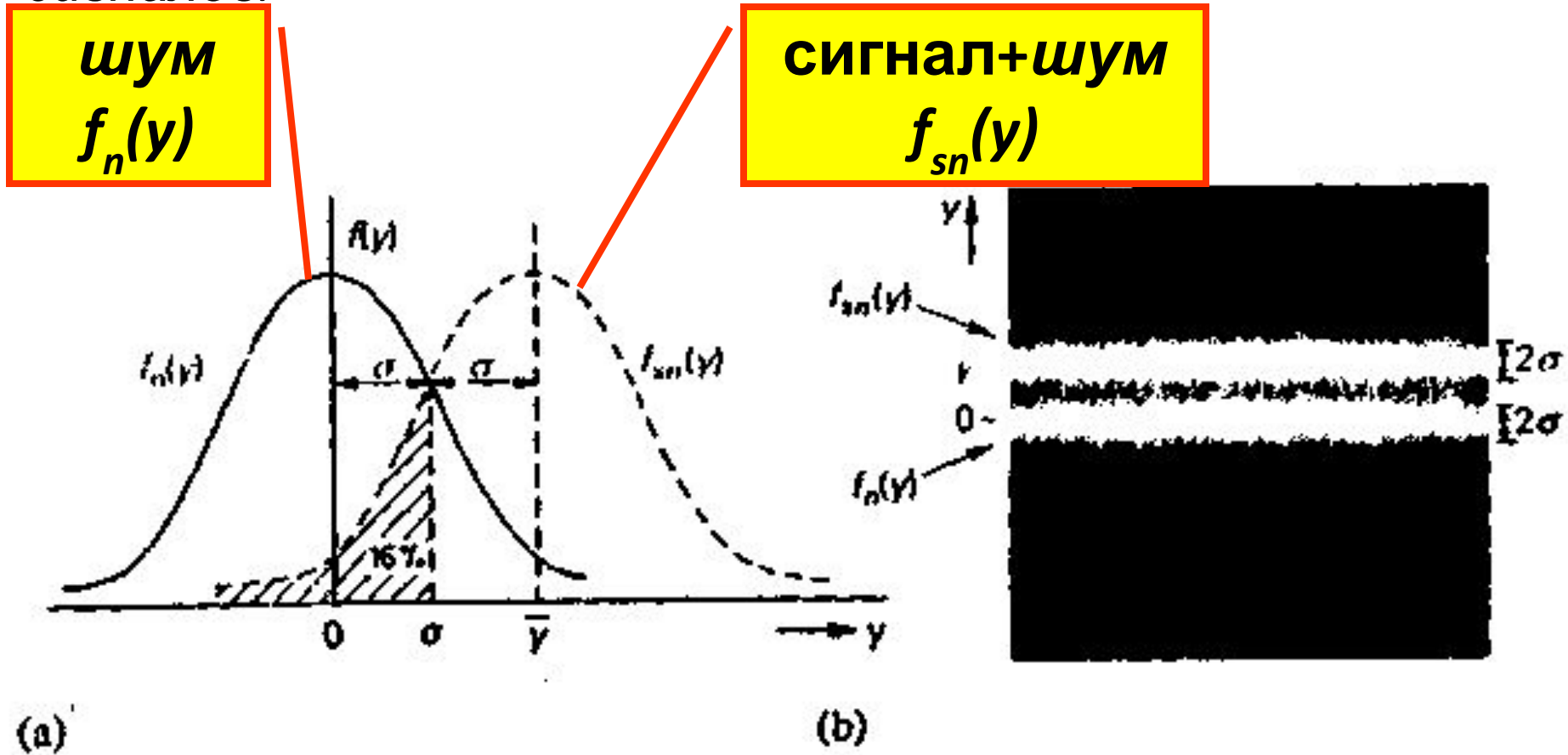
*Порог чувствительности измерительной системы определяется как наименьший входной сигнал, который все еще обнаруживается с заданной вероятностью правильного решения.*

***Порог чувствительности препятствует обнаружению нами сколь угодно малых сигналов.***

Принципиальный предел чувствительности системы определяется случайными флуктуациями внутри этой системы и является существенной характеристикой. В измерительной системе всегда присутствует шум, и он определяет теоретически осуществимый порог чувствительности.

## Порог чувствительности системы с гауссовым шумом

Мы рассмотрим вопрос о пороге чувствительности шумящей измерительной системы в предположении, что измеряемая величина  $x$  остается постоянной. Пусть шум имеет гауссово распределение. Порог чувствительности препятствует обнаружению нами сколь угодно малых сигналов.





## **Критерий обнаружения**

В силу того, что плотность распределения вероятностей  $f_n(y)$  является четной функцией, мы можем ввести **критерий обнаружения**, основанный на том, что фактическое значение выходного сигнала  $y$  больше или меньше, чем  $0,5 \bar{y}$ .

Если  $y > 0,5 \bar{y}$ , то мы делаем вывод, что сигнал на входе **присутствует**, а если  $y < 0,5 \bar{y}$ , то мы принимаем решение об **отсутствии** сигнала на входе.

$$y > 1/2 \cdot \bar{y}$$

**критерий  
обнаружения**

## Надежность обнаружения

Как можно видеть из графика ( $n = \mu / \sigma = 2$ ) (согласно критерию обнаружения, при котором происходит сравнение со значением  $0,5\mu$ ) заключение, что «входного сигнала нет», будет ошибочным для 16% выборок. Это в точности та часть всей площади под  $f_{sn}(y)$ , которая заштрихована. Поэтому доля случаев, в которых обнаруживается входной сигнал, порождающий выходной сигнал, составляет 84%.

Следовательно, с достоверностью 84% можно обнаруживать маскируемое шумом постоянное напряжение, когда среднеквадратическое значение шума равно половине значения этого постоянного напряжения ( $n = 2$ ).

Отношение сигнал/шум составляет

$$\frac{(n \cdot \sigma)^2}{\sigma^2} = n^2$$

**Вероятность обнаружения и отношение сигнал/шум**  
для различных значений сигнала  $y$  в зависимости от соотношения  
между стандартным отклонением  $\sigma$  и величиной сигнала

Сигнал $y$	Вероятность обнаружения	Отношение сигнал/шум
$1 \sigma$	69,15%	1
$1,4 \sigma$	76,11%	2
$2 \sigma$	84,13 %	4
$3 \sigma$	93,32 %	9
$4 \sigma$	97,72 %	16
$5 \sigma$	99,38 %	25
$6 \sigma$	99,87 %	36
$8 \sigma$	99,9968 %	64
$10 \sigma$	99,999971 %	100

Общепринятой мерой порога чувствительности является величина входного сигнала, для которого отношение сигнал/шум равно единице. Тогда, в случае шума с нормальным распределением мгновенных значений, вероятность обнаружения оказывается равной примерно **70%**.

# Способы снижения порога чувствительности

1. Порог чувствительности улучшается, когда мы выносим решение на основании нескольких (скажем,  $n$ ) выборок. Как мы уже видели

$$\sigma_{\text{avg}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}},$$

где  $\sigma$  - среднеквадратическое значение шума, а  $\sigma_{\text{avr}}$  - стандартное отклонение среднего от  $n$  выборок. Таким образом,

*в результате усреднения отношение сигнал/шум увеличивается в  $n$  раз и порог чувствительности соответственно снижается.*

2. Порог чувствительности можно также улучшить, сужая ширину полосы  $B$  измерительной системы. В предположении, что шум белый,  $\sigma = \sigma_0 \sqrt{B}$ , среднеквадратическое значение где  $\sigma_0$  - эквивалентный шум в полосе 1 Гц. Это означает, что *с сокращением полосы  $B$  измерительной системы в какое-то число раз, во столько же раз увеличивается отношение сигнал/шум.* Соответственно этому снижается порог чувствительности.

# Способы снижения порога чувствительности

В качестве *альтернативы нахождению среднего* от  $n$  отдельных последовательных выборок мы можем также измерять входной сигнал  $x(f)$  непрерывно в течение определенного времени  $T$ . Среднее по времени значение  $y_a$  выходного сигнала измерительной системы  $y(f)$  на интервале  $(t, t + T)$  равно:

$$y_{\text{avg}} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} y(t) dt .$$

стандартное отклонение среднего по выборкам из сигнала  $y(t)$  на протяжении  $T$  секунд имеет вид:

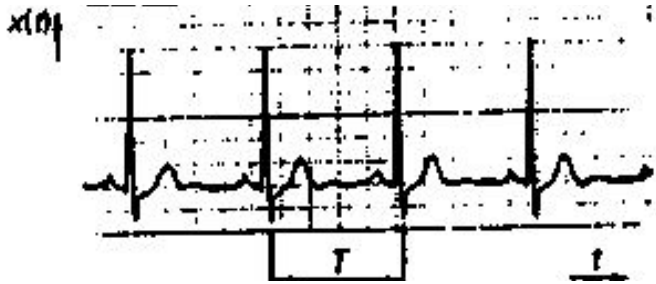
$$\sigma_{\text{avg}} = \frac{\sigma}{\sqrt{2TB}} = \frac{\sigma_0}{\sqrt{2T}} .$$

Следовательно,

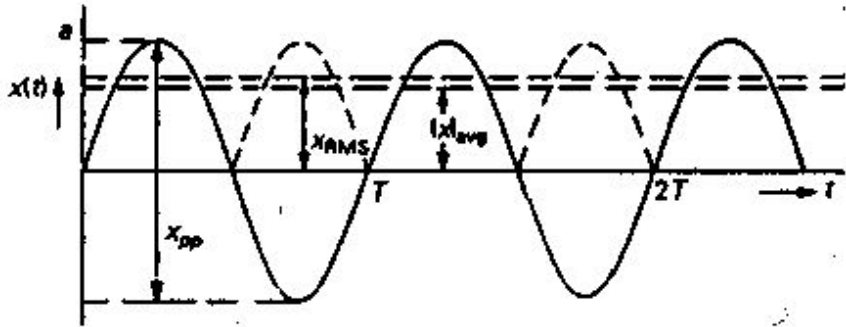
*вычисление среднего на интервале времени  $T$  приводит к увеличению отношения сигнал/шум в  $2T$  раз; порог чувствительности снижается  $(2T)^{1/2}$  раз.*

# Чувствительность к форме сигнала

Значение какого параметра сигнала измеряется?



$$x_p = \max |x(t)|.$$



$$x_{pp} = \max \{x(t)\} - \min \{x(t)\}.$$

Целесообразно как можно реже использовать **пиковое значение**  $x_p$  и **полный размах**  $x_{pp}$ , так как оба они очень чувствительны к возмущениям типа шума, накладывающегося на полезный сигнал. Большие ошибки в  $x_p$  и  $x_{pp}$  возникают также из-за нелинейных искажений сигнала. Значительно менее чувствительными к искажениям и помехам являются:

- **Среднее по времени значение;**
- **Среднее значение от абсолютной величины;**
- **Действующее значение.**

# Разрешающая способность

Разрешающая способность (разрешение) измерительной системы - это размер шага, на который может быть настроена система, или шага, с которым на индикатор выводится результат действия системы. По определению, **разрешающая способность - это наименьший интервал  $\Delta x$  значения измеряемой величины  $x$ , который все еще вызывает изменение результата измерения  $y$ .**

Численно разрешающая способность  $R$  выражается в виде:

$$R = \frac{x}{\Delta x}$$

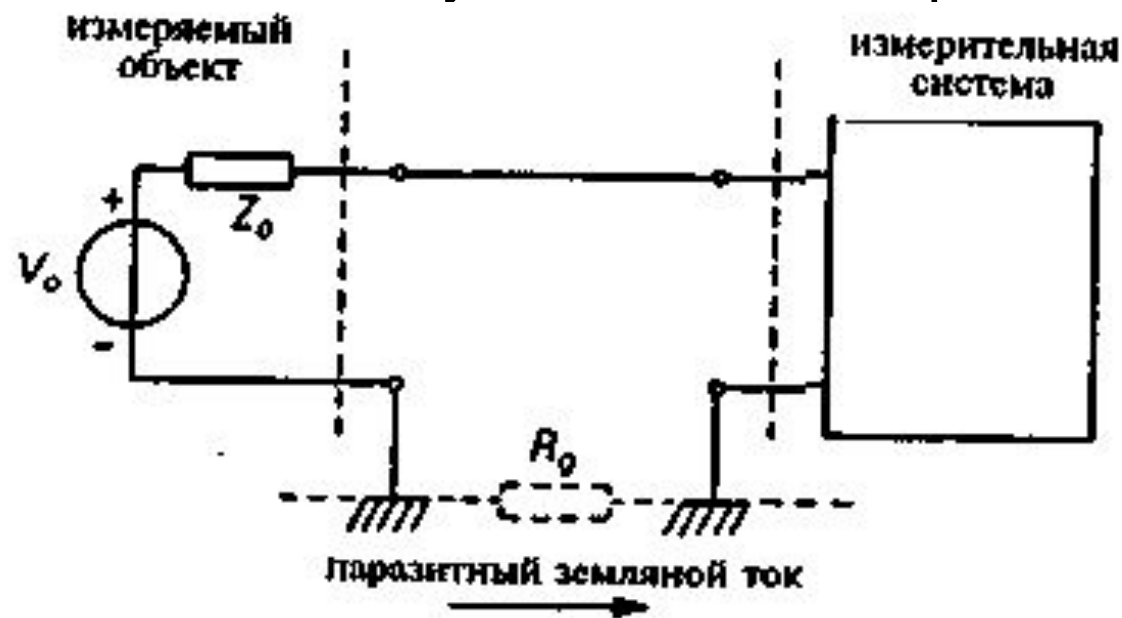
Если разрешение системы конечно, то результат измерений оказывается квантованным; при этом возникает **ошибка квантования**. Ошибки, являющиеся следствием квантованности результата измерения, можно разделить на **ошибки усечения** и **ошибки округления**.

Ошибка усечения происходит в том случае, когда в системе не принимаются во внимание десятичные знаки справа от младшего указываемого десятичного разряда: остаток просто опускают.

Ошибка округления происходит в том случае, когда в наименьшем указываемом десятичном разряде учитывается остаток путем округления до ближайшего значения в этом разряде.

## Помехи плохого заземления

В измерительной установке может случиться так, что измеряемый объект будет подключен к земляной шине не в той же точке, что и измерительная система; это может произойти, например, когда используются две различные розетки силовой сети. Такой случай показан на рис.

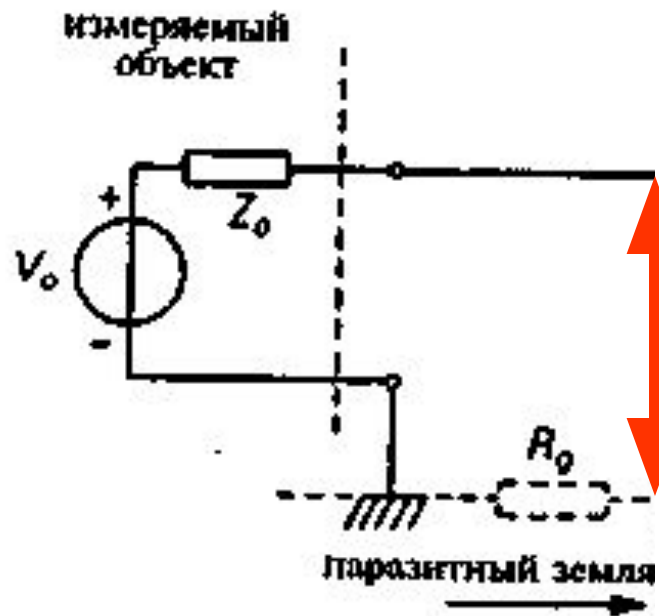


В подобным образом заземленной аппаратуре могут возникать значительные наводки из-за паразитных токов, протекающих по земле. Как правило, сопротивлением  $R_g$  по земляной шине между измеряемым объектом и измерительной системой нельзя пренебрегать (оно бывает порядка 0,1 Ом/м).



# Аддитивность помехи плохого заземления

Это ненулевое сопротивление и паразитные блуждающие токи, протекающие по земляной шине (вызываемые в ней другим оборудованием, подключенным к этой же шине), создадут на  $R_g$  напряжение, оказывающееся включенным последовательно с напряжением источника  $V$ . Когда должны быть измерены малые сигналы, эти аддитивные возмущения будут относительно велики, и проведение чувствительных измерений может быть легко нарушено.



**Сигнал +  
помеха**

# **Возможности симметричного входа**

Подобная дифференциальная измерительная система бывает специально сконструирована таким способом, чтобы быть **максимально нечувствительной к любому напряжению, которое одновременно присутствует на двух входных зажимах.**

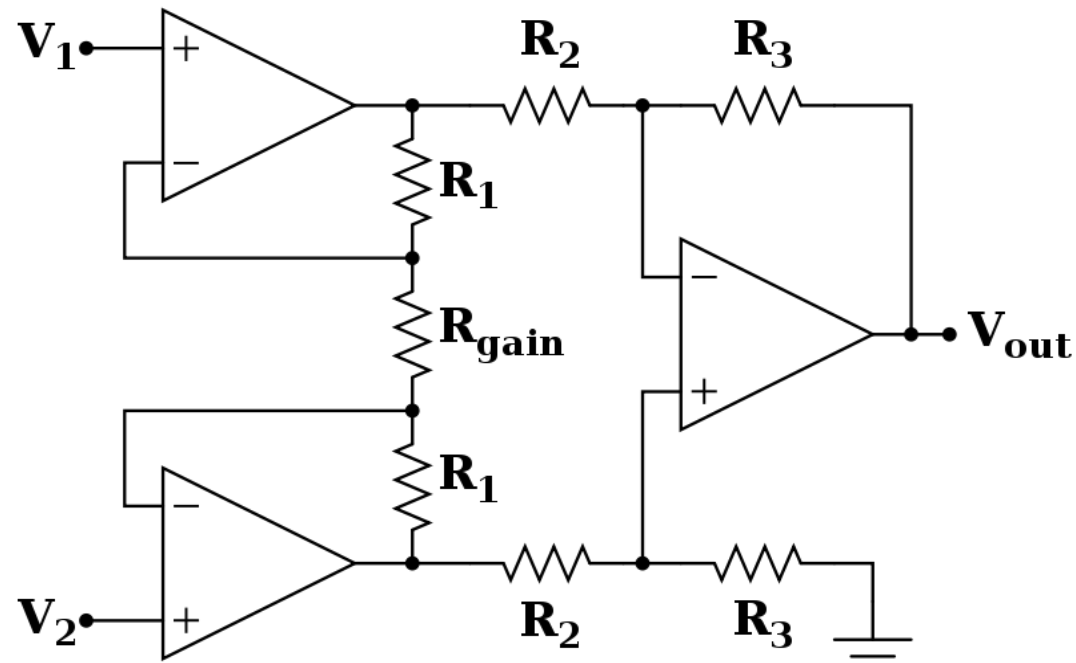
О нечувствительности измерительной системы говорят как об «ослаблении»; в частности, нечувствительность системы к потенциалам, которые являются общими для обеих клемм со знаками плюс и минус, называют **«коэффициентом ослабления синфазного сигнала»**. Способность системы реагировать на разность потенциалов между входами + и - характеризуется **«чувствительностью по отношению к дифференциальному сигналу»**

На рис. показано также, как **избежать емкостных наводок путем экранирования кабеля** проводящей оплеткой, заземленной на стороне измеряемого объекта (при измерении напряжения). Кроме того показано, что благодаря применению кабеля с **двумя внутренними скрученными проводниками** можно **избежать индуктивной наводки.**

Рассмотренные выше методы устранения помех, то есть применение активной защиты или экранирование с заземлением, исключение из входной цепи импедансов, по которым протекают паразитные токи, и компенсация возмущений, применяются не только при электронных измерениях, но и почти во всех областях физики и техники.

# Инструментальный усилитель

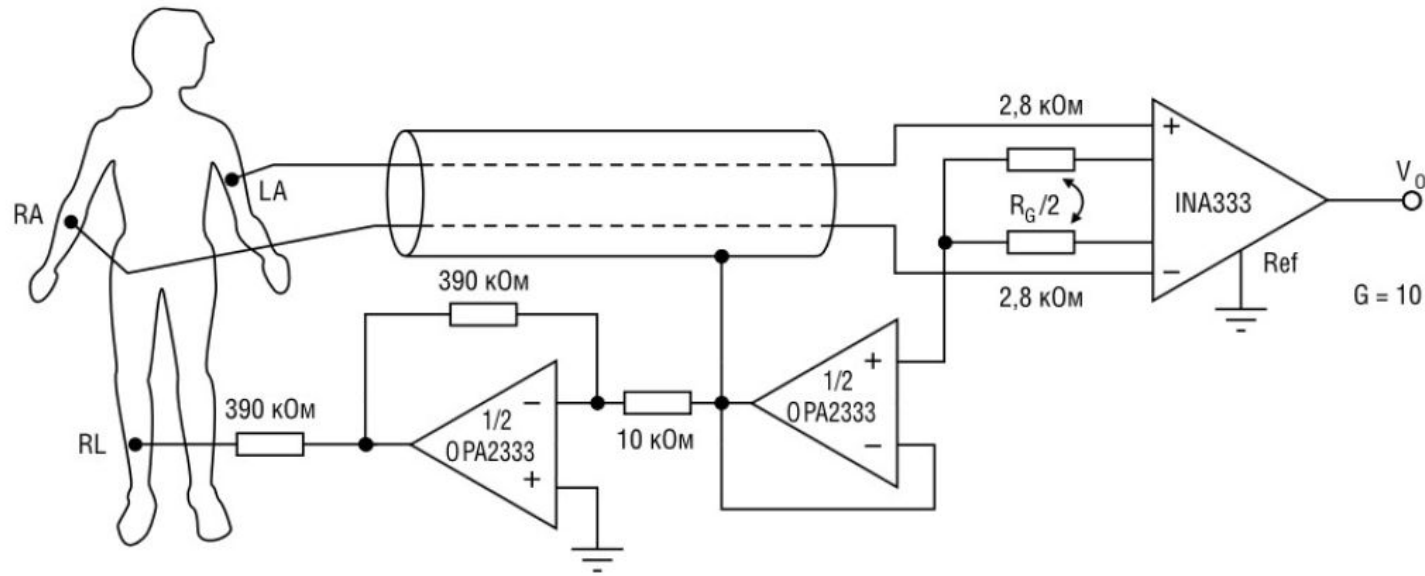
Инструментальный усилитель (измерительный усилитель, электрометрический вычислитель) — это тип дифференциального усилителя с характеристиками, подходящими для использования в измерениях и тестирующем оборудовании.



Коэффициент усиления напряжения всей схемы составляет:

$$K_U = K_{Ud} \cdot K_{Ub} = \frac{V_{out}}{V_2 - V_1} = \left(1 + \frac{2R_1}{R_{gain}}\right) \frac{R_3}{R_2}$$

Современные инструментальные усилители активно используются при измерении биоэлектрических потенциалов (получения кардиограммы, энцефалограмм и т.п.). Для этих целей можно использовать, например, инструментальный усилитель с малыми токами потребления от компании Texas Instruments – INA333 (рис. 8.23)



Два дополнительных ОУ задают начальный потенциал человеческого тела, относительно которого производится измерение

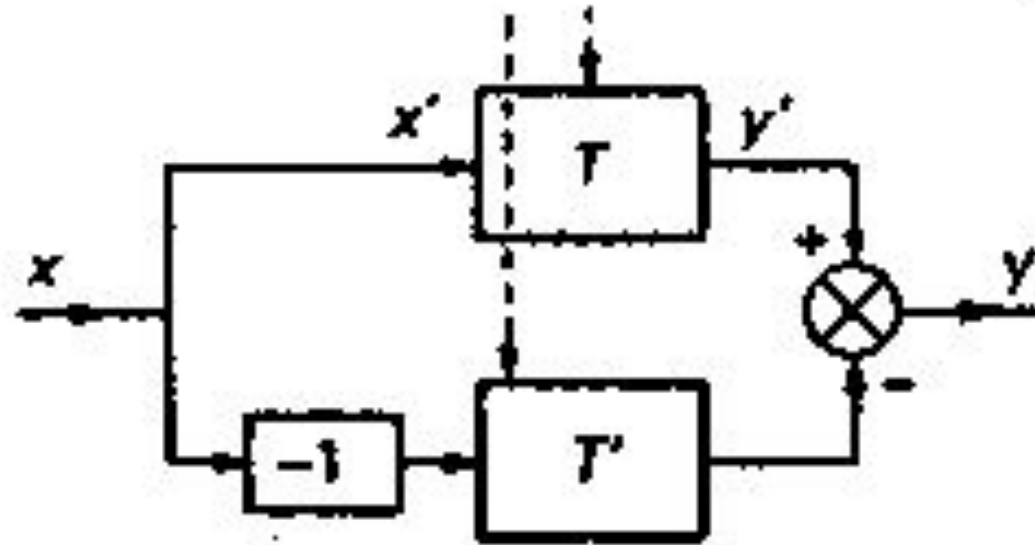
## Входные преобразователи

Перед обсуждением преобразователей, часто используемых для измерения обычных физических величин, таких как **перемещение, скорость, давление, температура, магнитная индукция** и т. д., мы сначала рассмотрим один из методов, объединяющих преобразователи (датчики) с частными принципами преобразования в один единственный составной преобразователь. Этот **«КОМПОЗИТНЫЙ МЕТОД»** используется для уменьшения или даже полного исключения некоторых ограничений, связанных с отдельными преобразователями.

Широко распространен метод комбинирования преобразователей, при котором два идентичных преобразователя используются в **балансной конфигурации** (см. рис.). Если оба преобразователя имеют одну и ту же передаточную характеристику  $y=f(x)$ , то выход  $y$  балансной схемы имеет вид

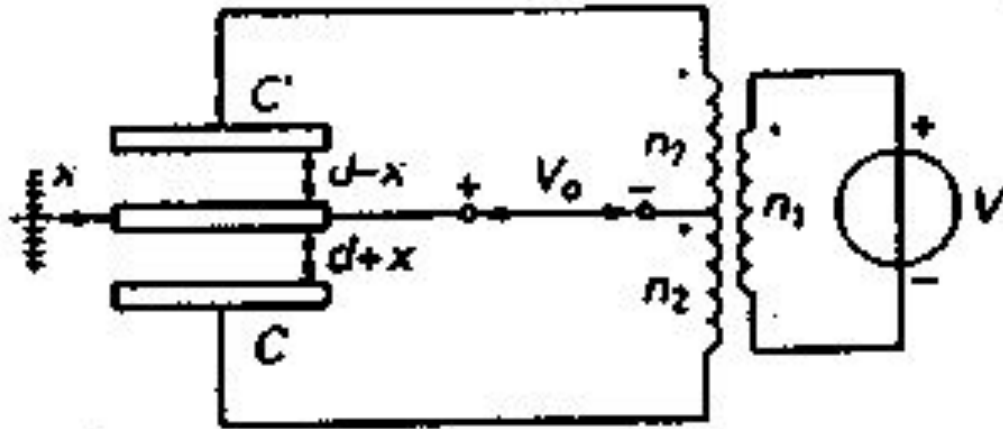
$$y = f(x) - f(-x)$$

## Балансная схема



Балансная схема не чувствительна к внешним возмущениям, так как в ней, по существу, применяется **параллельная компенсация**. Схема невосприимчива к аддитивным помехам, если преобразователи  $T$  и  $T'$  одинаково чувствительны к этим помехам. Для того, чтобы она была невосприимчива также к мультипликативным помехам, коэффициенты чувствительности по отношению к помехам у преобразователей должны быть одной величины, но противоположны по знаку.

## Емкостной датчик перемещения-пример балансной схемы



$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d+x} \text{ и } C' = \frac{\epsilon_0 A}{d-x}$$

Оба емкостных датчика перемещения, обозначенные C и C', являются отдельными преобразователями. Входной величиной является смещение x, а выходной — напряжение  $V_0$ . Очевидно, что зависимость  $C = C(x)$  **нелинейна**.

$$V_0 = V \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{(C' - C)}{(C' + C)}$$

Подстановка значений C и C' дает:

$$V_0 = V \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{x}{d}$$

Использование в этом примере двух емкостных преобразователей смещения в балансной схеме, позволяет достичь **идеальной линейности**.

$$V_0 = x \cdot S$$

# Р1. Тема 1. Измерительные усилители на ОУ

*«СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ 2»*

*© Школа Н.Ф.*

***Лекция №2 2017 г.***



***Все устройства аналоговой обработки и преобразования с ОУ можно условно разделить на три разновидности:***

- **схемы с глубокими ООС;**
- **схемы, в которых ОУ используются без ОС;**
- **схемы на ОУ с ПОС.**

Наибольшее распространение получили устройства первой разновидности. Их часто называют **активными**, т.е. с применением усилителей.

Они строятся по схеме **однопетлевой ОС**, основным усилительным звеном которой является ОУ с большим коэффициентом усиления. Благодаря этому выполняется **условие большой глубины ООС**  $T \gg 1$ , что **обеспечивает** практическую **независимость свойств устройств** обработки на ОУ от обычно весьма **неопределенных характеристик**

Следствием организации устройств обработки сигналов в виде схем с глубокими ОС является также то, что в них **характер преобразования аналоговых сигналов** формируется и **задается цепью, внешней по отношению к ОУ.**

Передаточные свойства цепи обратной связи могут быть заданы и сформированы с большой определенностью, что обуславливает в условиях глубокой ОС ( $T \gg 1$ ) **высокую стабильность и определенность характеристик схем на ОУ** и, как следствие этого, широко использование ОУ в устройствах усиления и преобразования аналоговых

Передаточные свойства цепи ОС могут носить **как частотно-независимый, так и частотно-зависимый характер.**

Вольт-амперные характеристики этой цепи могут быть **нелинейными**, а в ряде случаев — **изменяться под воздействием дополнительных управляющих сигналов.**

Что же касается **схем на ОУ без обратных связей**, а также схем, в которых **ОУ охвачен петлей ПОС**, то они в первую очередь используются как **схемы сравнения двух сигналов**. Такие схемы называются ***компараторами***.

***В устройствах с ООС различают три основных способа включения ОУ в схему:***

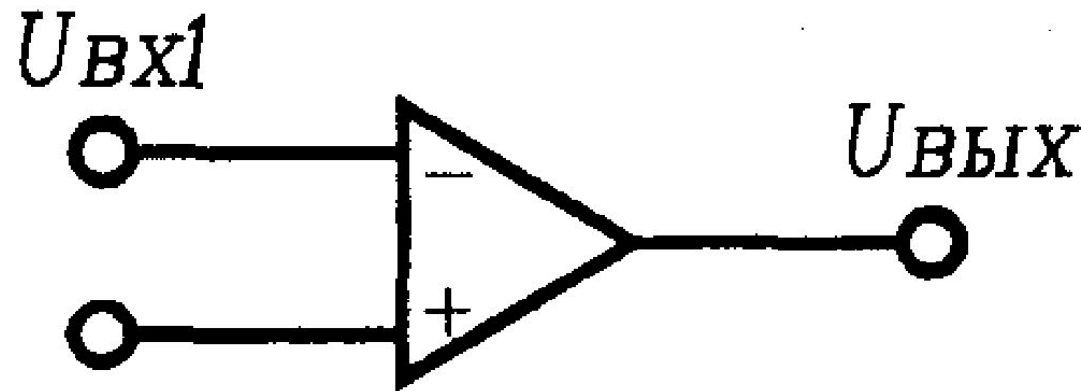
- **инвертирующее** включение;
- **неинвертирующее** включение;
- **комбинированное** включение .

**При всех трех способах включения петля ООС замыкается через инвертирующий тракт ОУ, при этом в целях обеспечения определенности передаточных свойств выполнено основное условие глубокой ОС.**

# 1. Усилители с отрицательной обратной СВЯЗЬЮ

## 1.1. Измерительные усилители

- **Измерительный**, или **инструментальный**, усилитель - это устройство с дифференциальным ВХОДОМ.



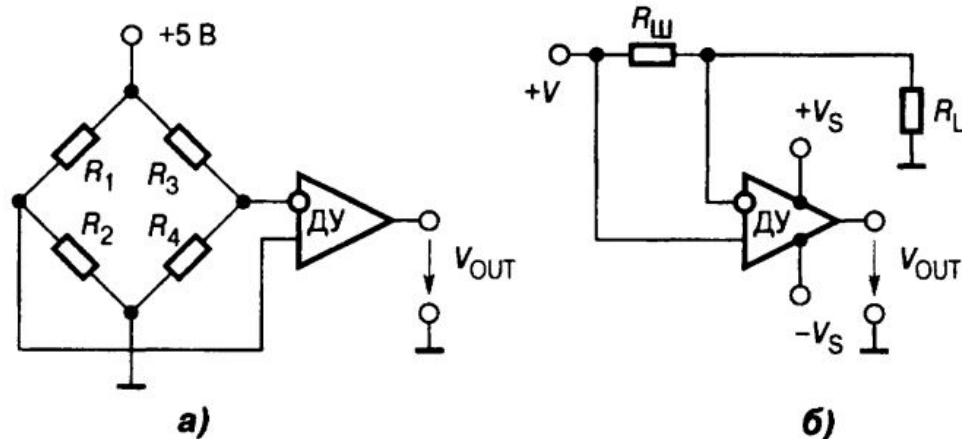
$U_{ВХ2}$

$$U_{ВЫХ} = K_u(U_{ВХ1} - U_{ВХ2})$$



10

Во многих измерительных схемах необходимо измерять разность потенциалов между двумя точками электрической цепи, каждая из которых имеет ненулевой потенциал относительно общей точки измерительной схемы. Для этой цели используются *измерительные усилители* (в переводной литературе часто называемые инструментальными), которые представляют собой устройства с дифференциальным входом, построенные так, что они усиливают только разность напряжений, поданных на их входы, и не реагируют на синфазное напряжение. Типичные примеры применения измерительных усилителей (ИУ) приведены на **Рис 2.39**.



**Рис. 2.39.** Типичные примеры применения измерительных усилителей:

Схема на **Рис. 2.39а** обычна для тензометрии, измерения давления и др. В одно или два плеча мостовой схемы включены тензорезисторы. Синфазное напряжение на входах дифференциального усилителя (ДУ) составляет в этой схеме обычно 1.5... 2.5 В, причем, хотя это напряжение, как правило, стабилизируется, все же возможны его изменения в пределах порядка

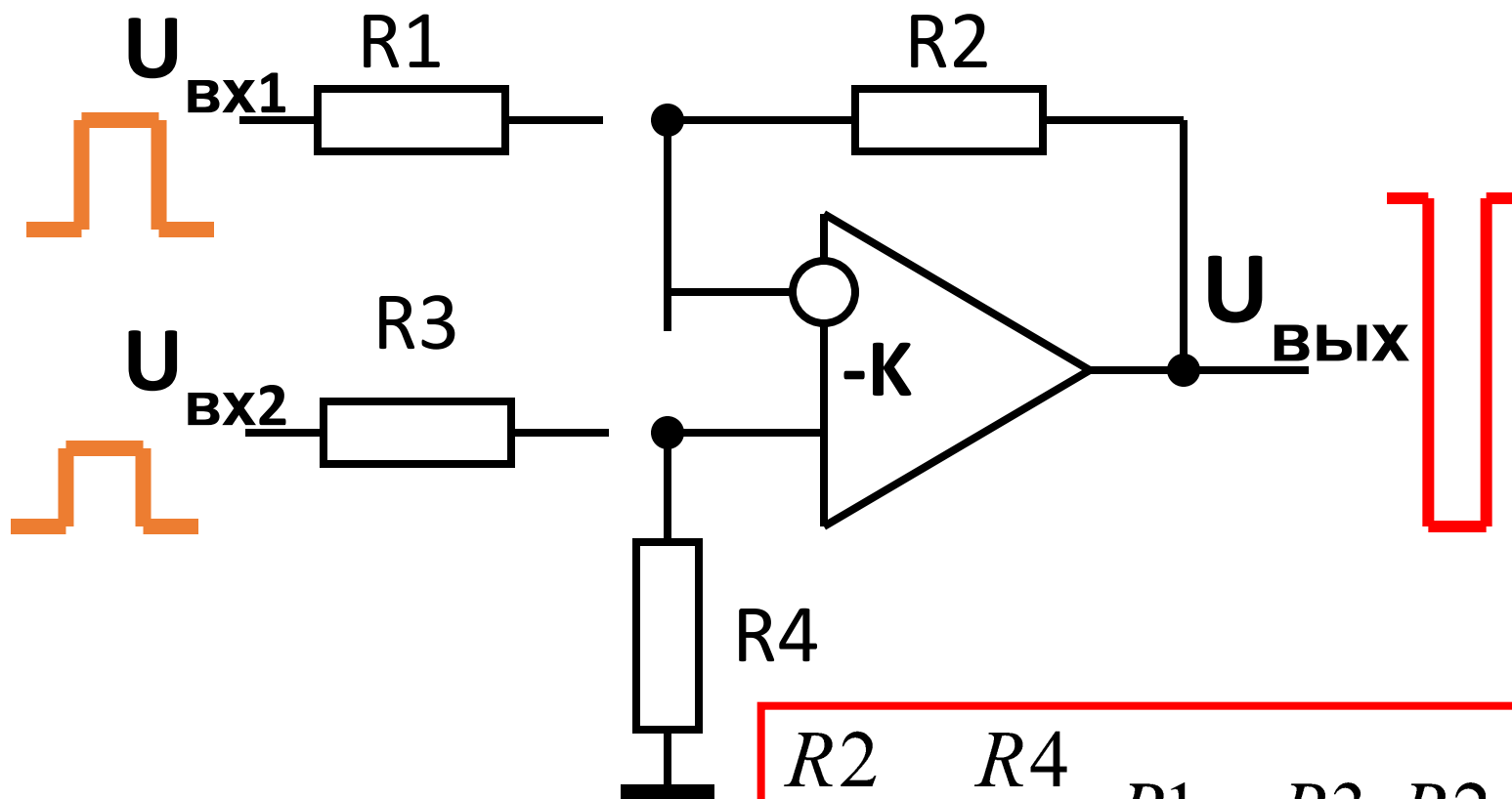
- Усилитель строится так, что он усиливает только разность напряжений, поданных на его входы ( $U_{вх2} - U_{вх1}$ ) и не реагирует на синфазное входное напряжение.
- Для большинства микросхем измерительных усилителей коэффициент усиления (передачи) по напряжению  $K_u$  находится между **1 и 1000**.

- Обычно измерительный усилитель служит первым каскадом измерительной или преобразовательной схемы, где основным требованием является **ТОЧНОСТЬ**.

- Во многих случаях входной сигнал подается на измерительный усилитель с **МОСТОВОЙ СХЕМЫ** или **датчика**, преобразующих неэлектрическую величину в аналоговый электрический сигнал.

- Основные проблемы, которые приходится решать разработчику при усилении этого сигнала для обработки последующими каскадами, **связаны с подавлением шумов и нестабильностью коэффициента усиления при воздействии внешних факторов.**

# Измерительный усилитель на **одном** **операционном усилителе**



$$\frac{R2}{R1} = \frac{R4}{R3}; R1 = R3; R2 = R4.$$

$$\begin{aligned}
U_{\text{вых}} &= U_{\text{вых1}} + U_{\text{вых2}} = \\
&= -\frac{R2}{R1} \cdot U_{\text{ex1}} + \frac{R4}{R3 + R4} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \cdot U_{\text{ex2}} = \\
&= -\frac{R2}{R1} \cdot U_{\text{ex1}} + \frac{R4}{R3} \cdot \frac{1 + \frac{R2}{R1}}{1 + \frac{R4}{R3}} \cdot U_{\text{ex2}} = \\
&= \frac{R2}{R1} \cdot (U_{\text{ex2}} - U_{\text{ex1}}), \\
\text{если: } \frac{R2}{R1} &= \frac{R4}{R3}, K = \frac{U_{\text{вых}}}{(U_{\text{ex2}} - U_{\text{ex1}})} = \frac{R2}{R1}.
\end{aligned}$$

$$K = \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{K_0}}$$

$$K_{c1} = \frac{R1 \cdot R4 - R2 \cdot R3}{R1 \cdot (R3 + R4)};$$

$$K_{c2} = \frac{R2}{R1 \cdot M_c};$$

$$K_{OOC} = \frac{K}{K_{c1} + K_{c2}}.$$

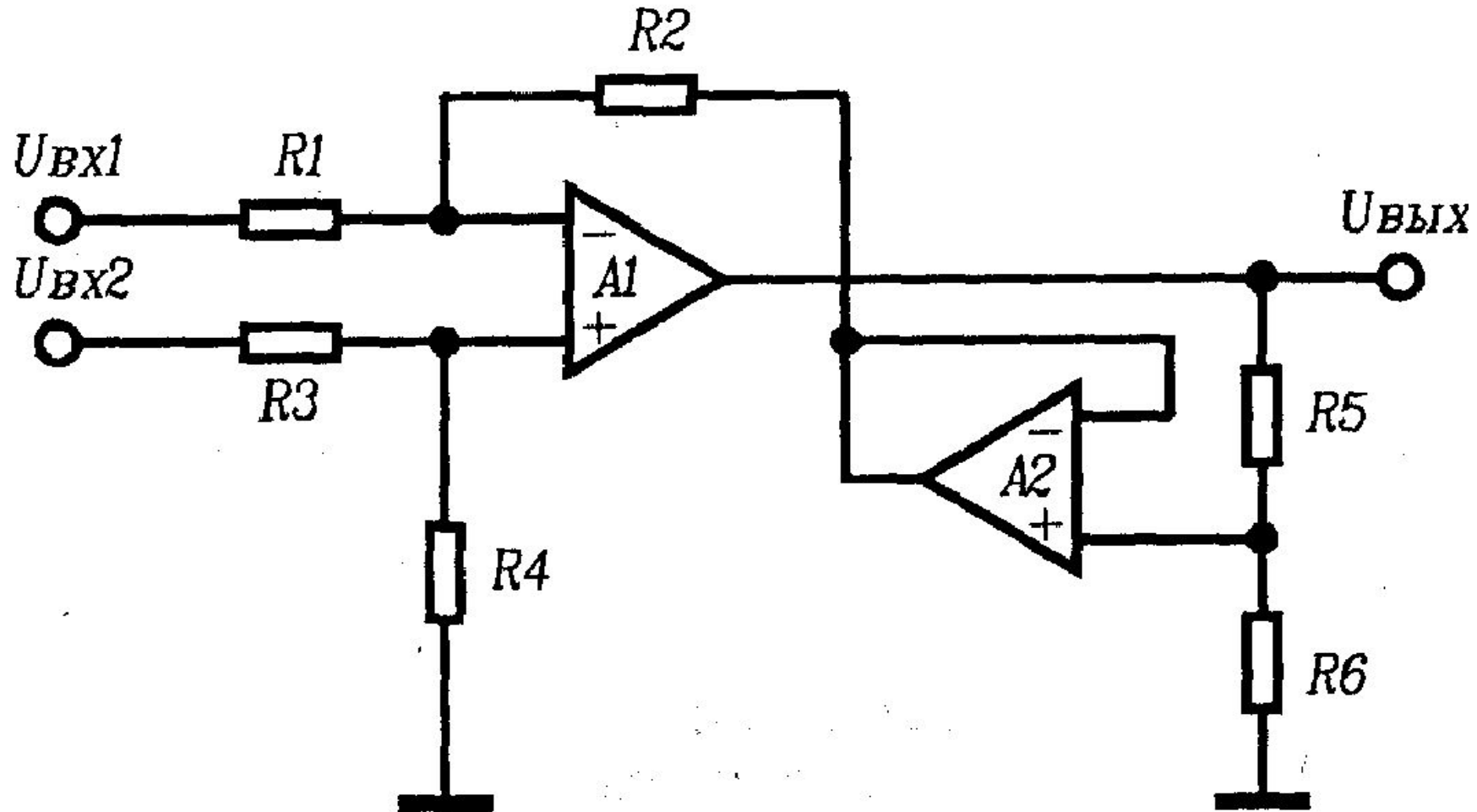
$$U_{CMVIX} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \cdot U_{CM} + \Delta I_{CMVIX} \cdot R2;$$

$$R_{VX.диф} = R1 + R3;$$

$$R_{VX.синф} = (R1 + R2) \parallel (R4 + R3).$$

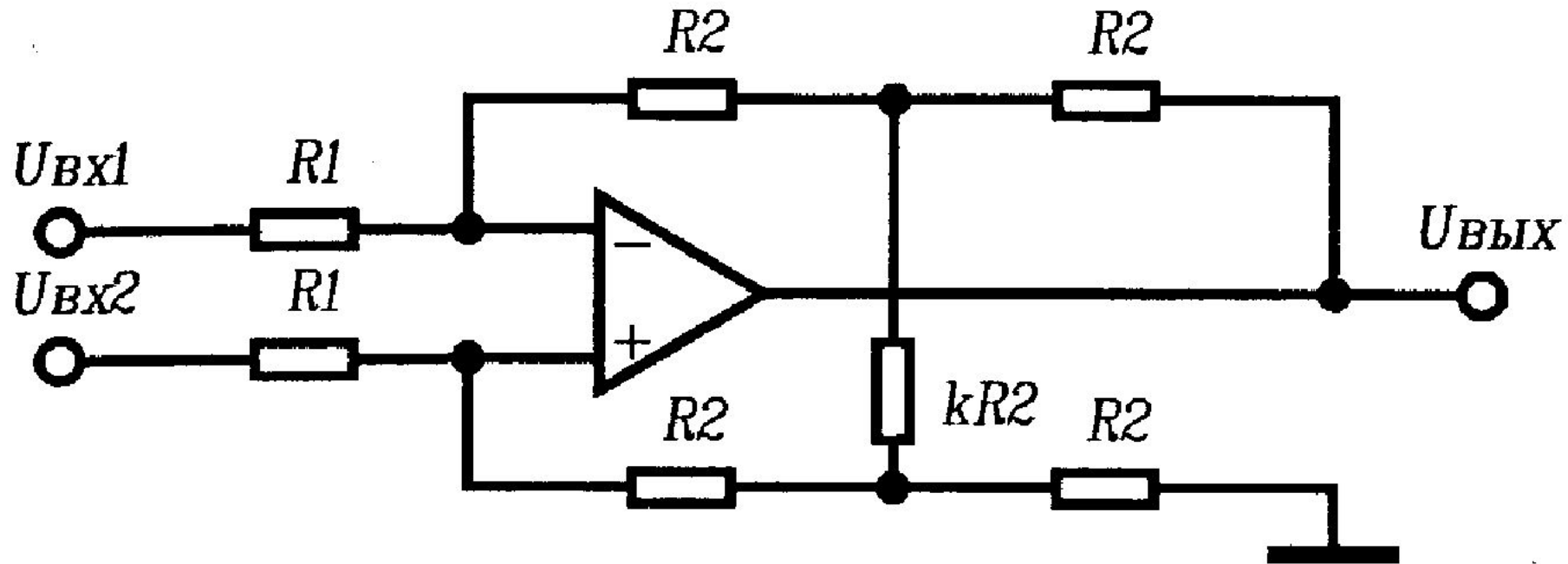


**Схема для повышения коэффициента усиления без применения высокоомных резисторов**



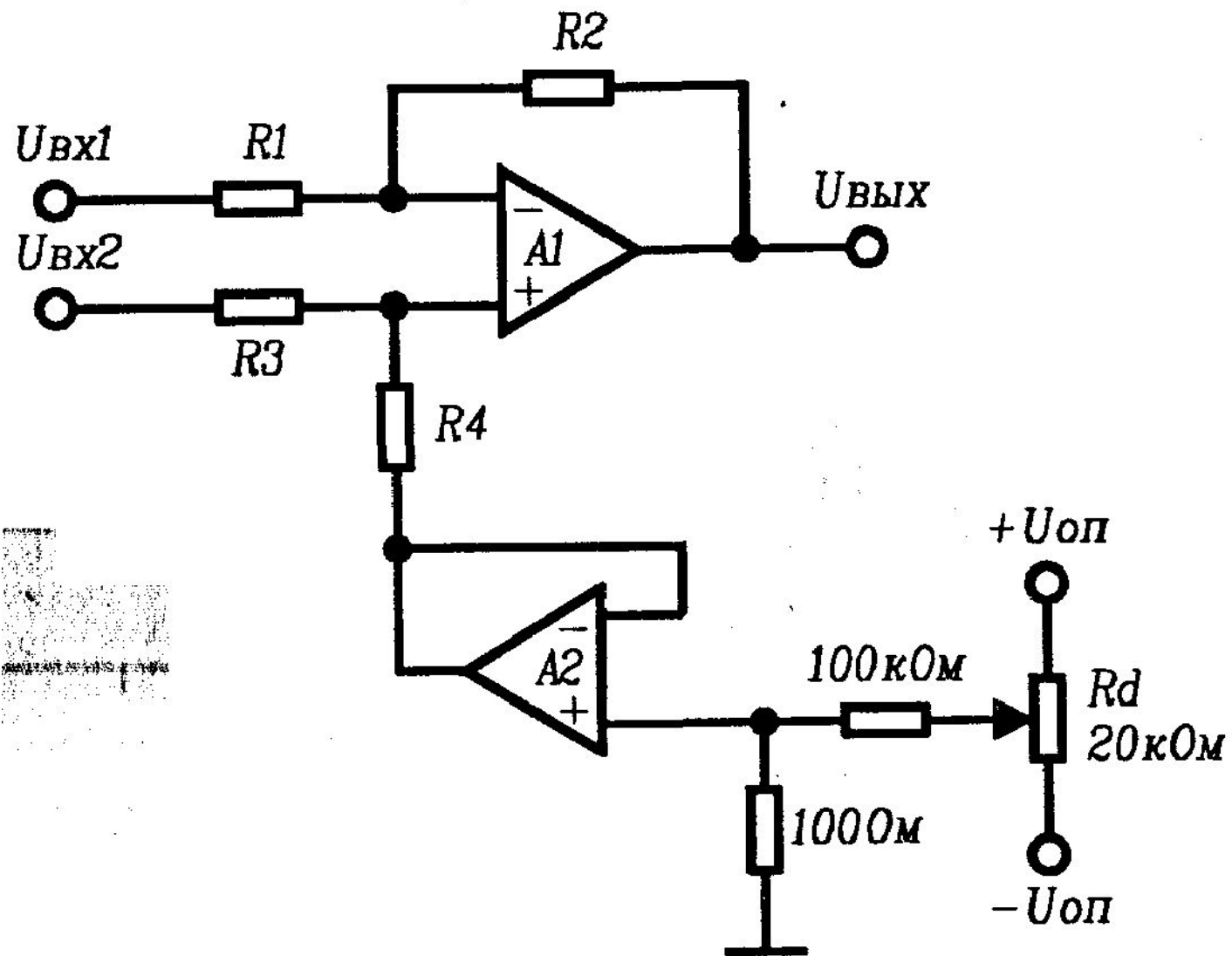
$$K_u = \left(1 + \frac{R_5}{R_6}\right) \frac{R_2}{R_1}$$

# Применение T-образного включения для увеличения коэффициента передачи

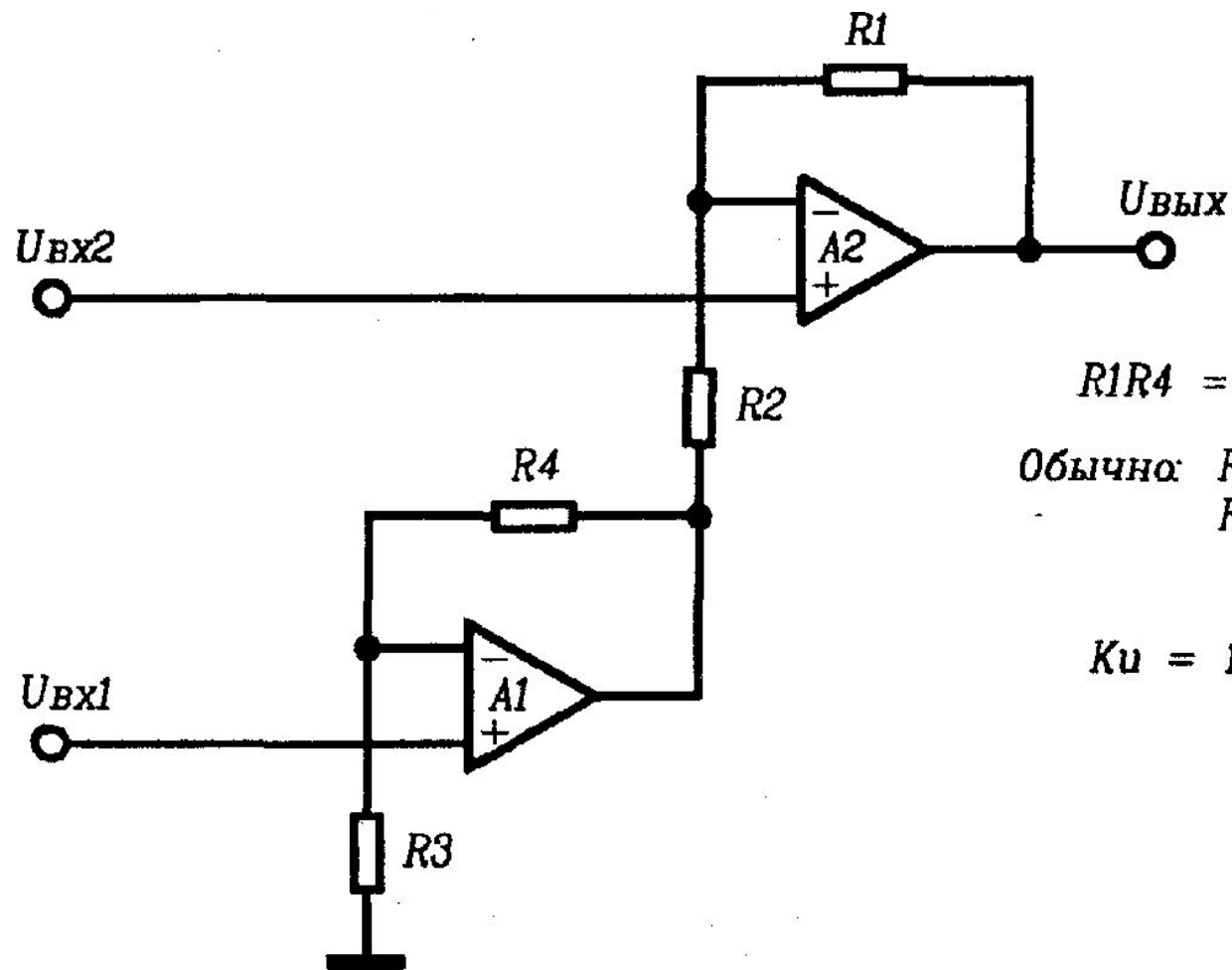


$$K_u = \frac{2R2}{R1} \left( 1 + \frac{1}{k} \right)$$

# Балансировка дифференциального усилителя



# Измерительный усилитель на **двух** **операционных усилителях**



$$R1R4 = R2R3$$

Обычно:  $R1 = R3$   
 $R2 = R4$

$$K_u = 1 + \frac{R1}{R2}$$

Дифференциальный коэффициент усиления:

$$K_U = 1 + R_1/R_2 .$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала:

$$K_{сф} = (R_1R_4 - R_2R_3)/R_3R_2 = 1 - \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

Следовательно, при  $R_1/R_2 = R_3/R_4$   $K_{сф} = 0$ .

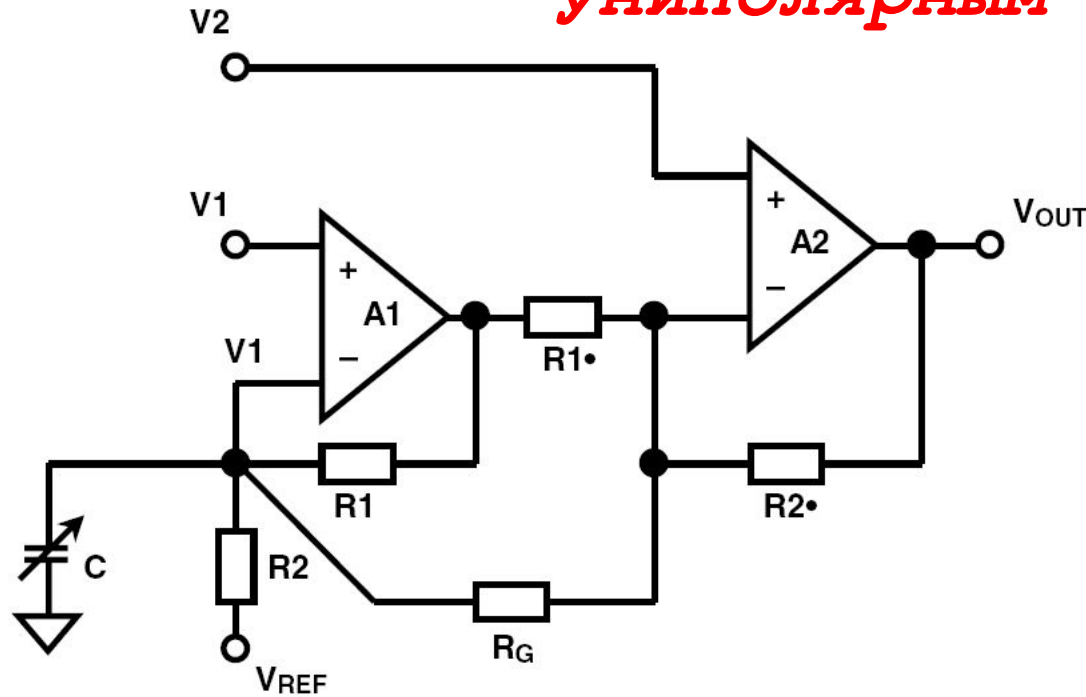
---

Выходное напряжение смещения:

$$U_{см.вых} = 2(1 + R_1/R_2)U_{см.вх} \quad (\text{при } R_1/R_2 = R_3/R_4).$$

где  $U_{см.вх}$  — входное напряжение смещения ОУ.

# Измерительный усилитель на двух операционных усилителях с униполярным питанием



$$OCC = 20 \cdot \log_{10} \left[ \frac{GAIN \times 100}{\% \text{ошибки}} \right]$$

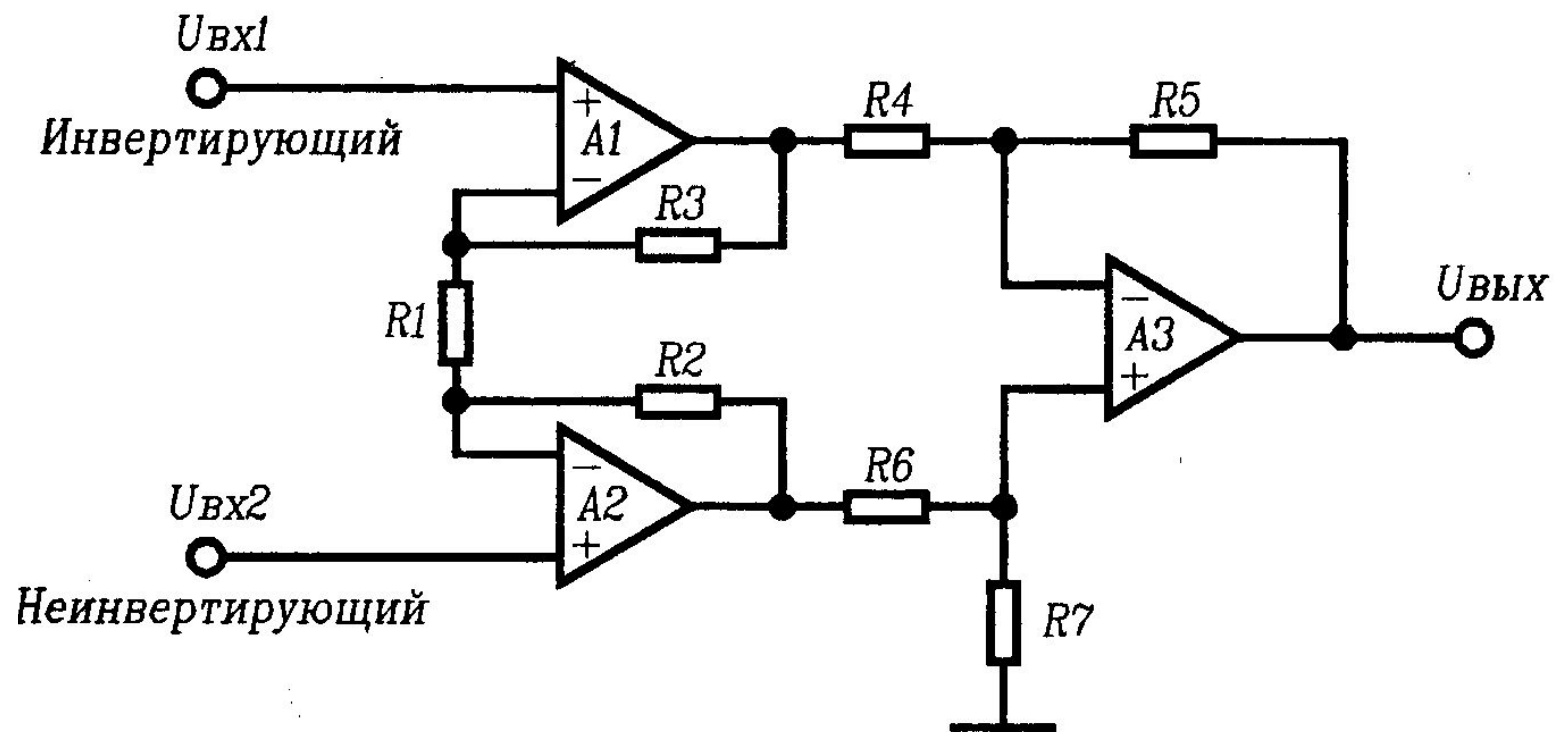
$$G = 1 + \frac{R2}{R1} + \frac{2 \cdot R2}{R_G}$$

$$V_{OUT} = (V_2 - V_1) \cdot \left[ 1 + \frac{R2}{R1} + \frac{2 \cdot R2}{R_G} \right] + V_{REF}$$

для высокого OCC критично выполнение  $\frac{R2}{R1} = \frac{R2'}{R1'}$

# *Измерительный усилитель на **трех** **операционных усилителях***

Такая схема имеет более высокий **входной импеданс** и обеспечивает **большее усиление и лучший КОСС** по сравнению со схемами на одном ОУ. Кроме того, величина КОСС менее чувствительна к точности подбора резисторов.



**$R4R7 = R5R6$  – максимальный КОСС,**  
 **$R2 = R3, R4 = R6, R5 = R7.$**



Дифференциальный коэффициент усиления:

$$K_U = \frac{(R_1 + R_2 + R_3)}{R_1} \cdot \frac{R_5}{R_4} .$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала (из-за разбаланса резисторов):

$$K_{сф1} = (R_7 R_4 - R_5 R_6) / R_4 (R_6 + R_7) .$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала (из-за конечного значения КОСС усилителя  $A_3$ ):

$$K_{\text{сф}2} = R_5/R_4 \cdot \text{КОСС}_{A_3} .$$

Общий КОСС измерительного усилителя в наихудшем случае (приложении  $K_{\text{сф}1}$  и  $K_{\text{сф}2}$ ):

$$\text{КОСС} = \frac{K_U}{K_{\text{сф}1} + K_{\text{сф}2}} .$$

Выходное напряжение смещения  $U_{\text{см.вых}1}$ , обусловленное напряжениями смещения ОУ (наихудший случай):

$$U_{\text{см.вых}1} = \frac{(R_1+R_2+R_3)}{R_1} \cdot \frac{R_5}{R_4} (U_{\text{см.}A_1} + U_{\text{см.}A_2}) + \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) U_{\text{см.}A_3} ,$$

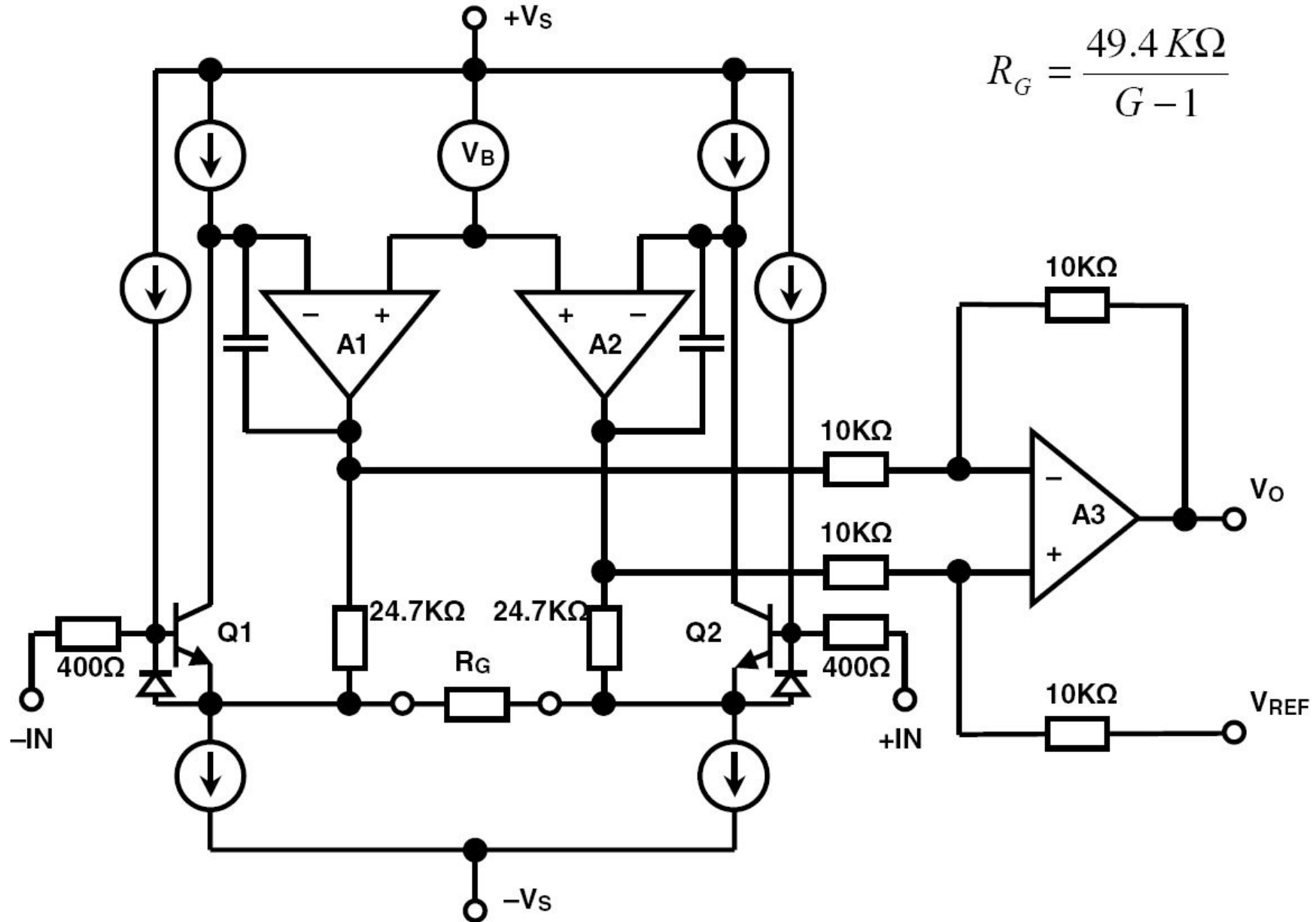
где  $U_{\text{см.}A_1}$  — входное напряжение смещения ОУ  $A_1$ ,

$U_{\text{см.}A_2}$  — входное напряжение смещения ОУ  $A_2$ ,

$U_{\text{см.}A_3}$  — входное напряжение смещения ОУ  $A_3$ .

Классическая схема на 3 ОУ используется в интегральных схемах ИУ. Кроме прекрасно согласованных ОУ лазерная подгонка тонкопленочных Резисторов обеспечивает высокую степень согласования при меньшей стоимости.

# Пример упрощенной схемы ИУ АД 620

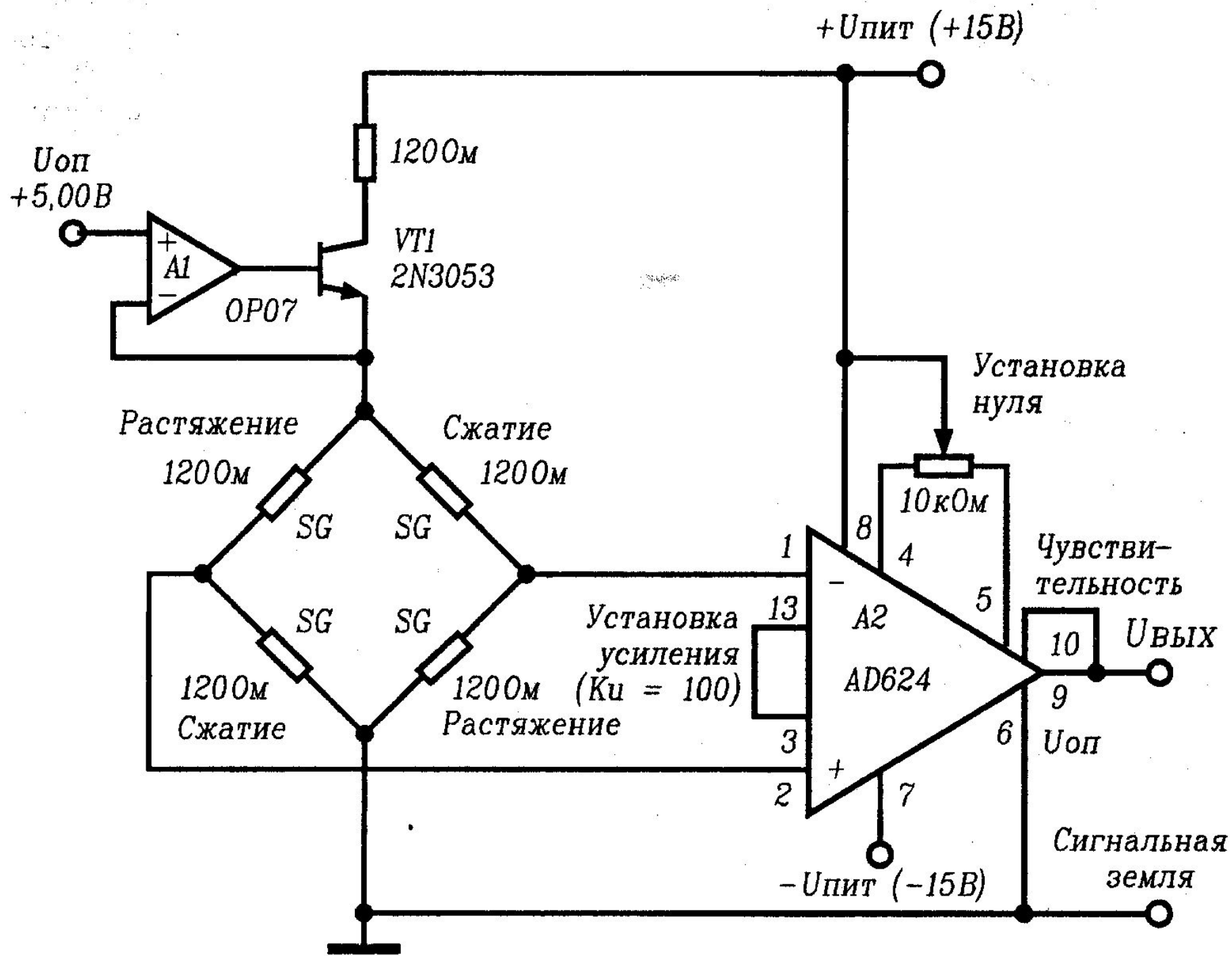


# Промышленные однокристалльные измерительные усилители

Промышленностью выпускаются **однокристалльные измерительные усилители** (AD624, OP77). Конечно, выбор конкретной микросхемы диктуется особенностями применения с учетом стоимости и доступности. Имеются микросхемы измерительных усилителей **с цифровым управлением** (PGA200), которые наиболее удобны для микропроцессорных систем.

# Использование измерительных усилителей совместно с датчиками

Наиболее широко измерительные усилители применяются для усиления сигналов **с различных датчиков**. Схема демонстрирует применение **промышленного измерительного усилителя AD624C** совместно с **МОСТОВЫМ ТЕНЗОДАТЧИКОМ**.



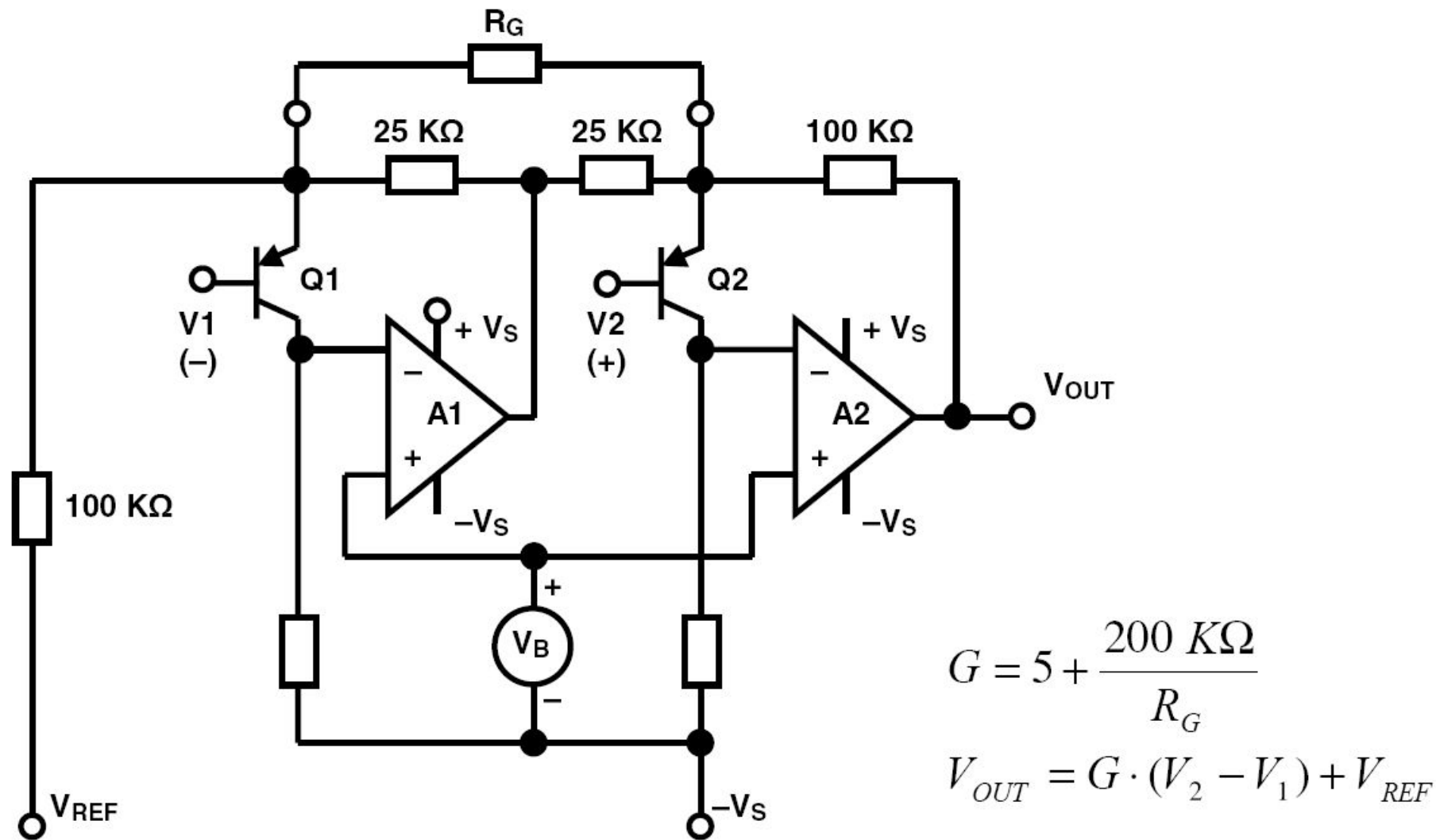


Рис.3.30. Архитектура ИУ AD627.

# Параметры некоторых инструментальных усилителей

Модель	Ипотр макс., мА	Упит., В	Метод установки Ку	Кос сф мин., дБ (Ку=10)	fгр., кГц (Ку=10)	tуст., мкс (Ку=10)	Uсм вх макс., мкВ	$\Delta U_{см}$ вх./ $\Delta T$ , мкВ/°С	Iвх макс., нА	Uсм вых макс., мВ	$e_{н. макс.}$ нВ/√Гц (f=1кГц)	Ку	Ошибка Ку, % (Ку=10)	Корпус	Цена, руб.
AD620	1,3	±2,3...±18	Резистор	93	800	15	125	1	2	1	13	1...10000	0,3	DIP8, SOIC8	161,64
AD621	1,3	±2,3...±18	Перемычка	93	800	12	250	2,5	2	Н/д	17	10; 100	0,15	DIP8, SOIC8	223,53
AD622	1,3	±2,6...±18	Резистор	86	800	10	125	1	5	1,5	12	1...1000	0,5	DIP8, SOIC8	111,99
AD623	0,55	±2,3...±18	Резистор	90	100	20	200	2	25	1	35	1...1000	0,35	SOIC8	74,23
AD627	0,085	±2,3...±18 +2,7...+12	Резистор	77	80 (Ку=5)	135 (Ку=5)	Uитт ±200 Uитт +250	3	10	1	38	5...1000	0,35	SOIC8	114,22
AD629	1	±2,5...±18 +2,7...+36	Нет возм-ти	77 (Ку=1)	500 (Ку=1)	15	1000	20	Н/д	Н/д	550	1	0,05	SOIC8	123,16
AMP02	6	±4,8...±18 +5	Резистор	115	200	10	100	2	10	10	9	1...10000	0,5	DIP8	299,31
AMP04	0,7	±4...±12	Резистор	80	300	-	300	3	50	3	270	1...1000	0,8	DIP8	411,96
INA111AP	4,5	±6...±18	Резистор	106	2000	2	500	5	20 нА	-	10	1...10000	0,1	DIP8	236,31
INA118	0,38	±1,35...±18 +2,7...+36	Резистор	110	500	15	50	0,5	5	-	10	1...10000	0,02	DIP8, SOIC8	149,63
INA122U	0,085	-0,9/13...±18 +2,2...+36	Резистор	83	120 (Ку=5)	350 (Ку=5)	250	3	25	-	60	1...10000	0,5	S08	127,37
INA128UA	110	±2,25...±18	Резистор	93	700	7	50	0,5	5	-	8	1...10000	0,5	S08	148,23
INA129	0,75	±2,25...±18	Резистор	100	700	7	50	0,5	5	-	8	1...10000	0,4	DIP8, SOIC8	113,36



# Р1. Тема 2. Специализированные усилители на ОУ

*«СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ 2»*

*© Школа Н.Ф.*

***Лекция №3 2017 г.***

## 1.2. Разновидности усилителей с ООС

### Усилитель тока

**Усилители тока** предназначены для преобразования малых токов в напряжение.

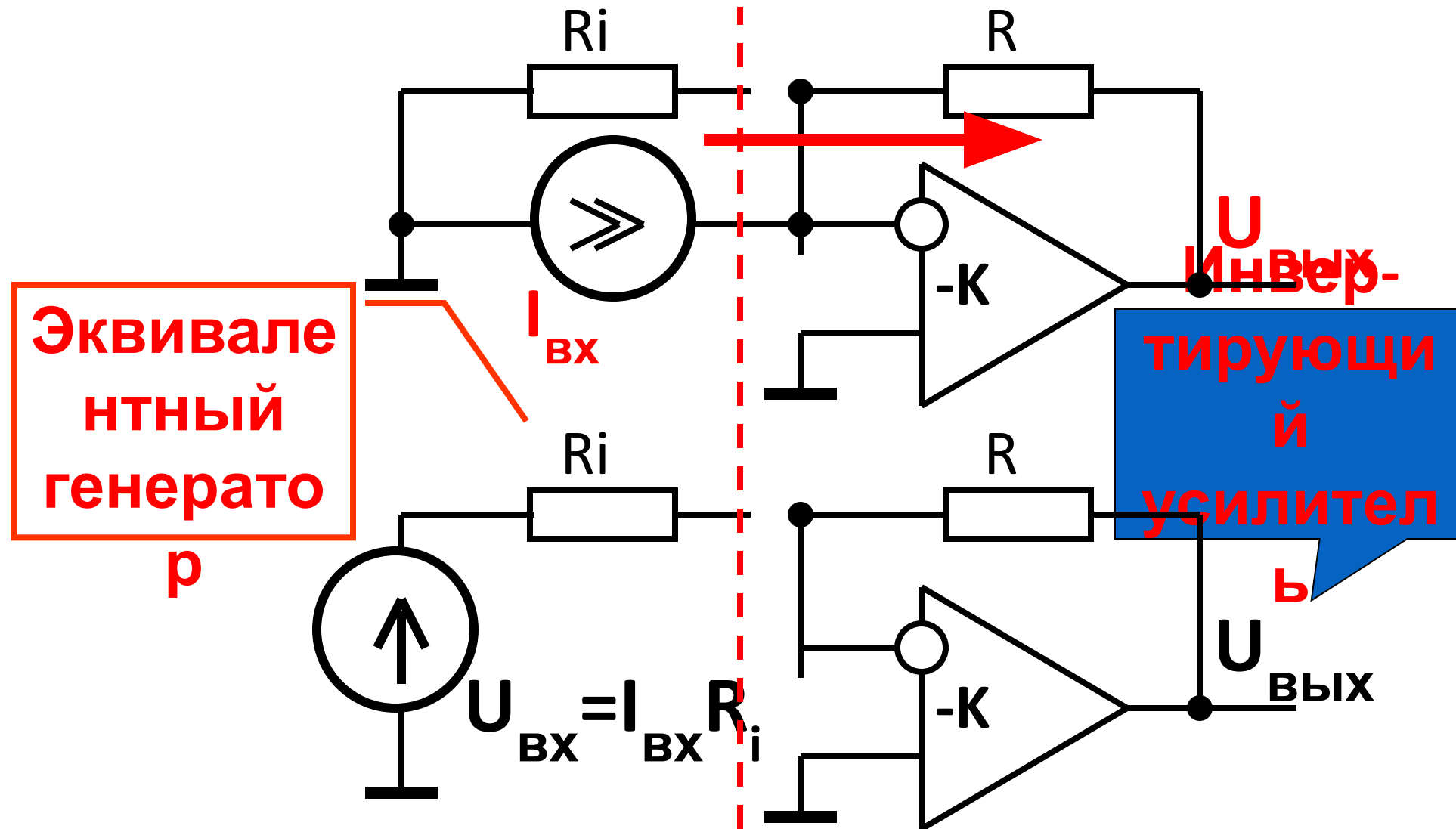
Простейший способ преобразовать ток в напряжение - это **пропустить этот ток через резистор с известным сопротивлением.**

Однако при этом для увеличения чувствительности при измерении очень малых токов приходится существенно

## Недостатки способа:

- увеличение **нежелательного обратного воздействия** измерительной цепи на цепь, в которой производится измерение,
- требует **повышения входного сопротивления** последующих каскадов,
- **увеличивает инерционность цепи**, вызываемую действием паразитных емкостей, в частности емкости соединительной линии.

**Усилитель тока на основе ОУ** позволяет в значительной степени избавиться от перечисленных недостатков.



**Из свойств инвертирующего  
усилителя:**

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}} \cdot R_i} = - \frac{\gamma \cdot K_0}{1 + \beta_c \cdot K_0},$$

$$\gamma = \frac{R}{R_i + R},$$

$$\beta_c = \frac{R_i}{R_i + R}.$$

$$K_i = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = - \frac{\gamma \cdot K_0 \cdot R_i}{1 + \beta_c \cdot K_0} = - \frac{\frac{\gamma \cdot R_i}{\beta_c}}{1 + \frac{1}{\beta_c \cdot K_0}}$$

$$= - \frac{R}{1 + \frac{1}{\beta_c \cdot K_0}} \cong -R;$$

$$\frac{1}{\beta_c \cdot K_0} \ll 1 \text{ или } \frac{R + R_i}{R \cdot K_0} \ll 1 \Rightarrow$$

$$R \cdot K_0 \gg R + R_i.$$

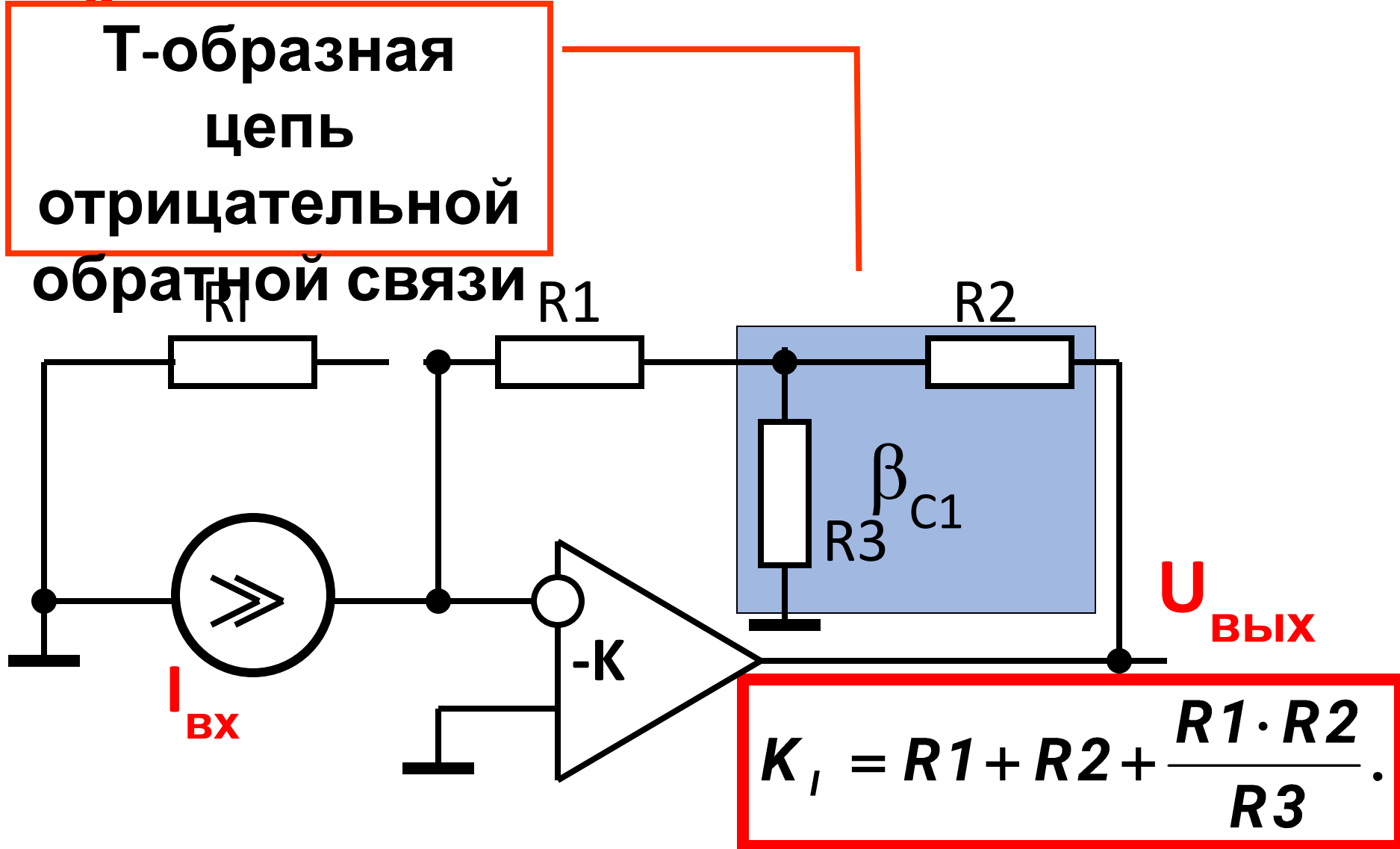
**Входное сопротивление** усилителя тока весьма мало и может быть найдено как сопротивление инвертирующего усилителя, уменьшенное на сопротивление резистора  $R_i$ .

$$R_{вхI} = R_{вхД} \parallel \frac{R}{1 + \beta_c \cdot K_o}.$$

- Вследствие малости входного сопротивления **усилитель тока практически не оказывает обратного влияния** на цепь, в которой измеряется ток.
- **Устраняется влияние емкости соединительной линии**, так как эта емкость включена параллельно низкому входному сопротивлению усилителя тока и поэтому обусловленная ею постоянная времени очень мала.
- **Выходное сопротивление данного усилителя тока** мало, как и у всякого усилителя с обратной связью по напряжению.

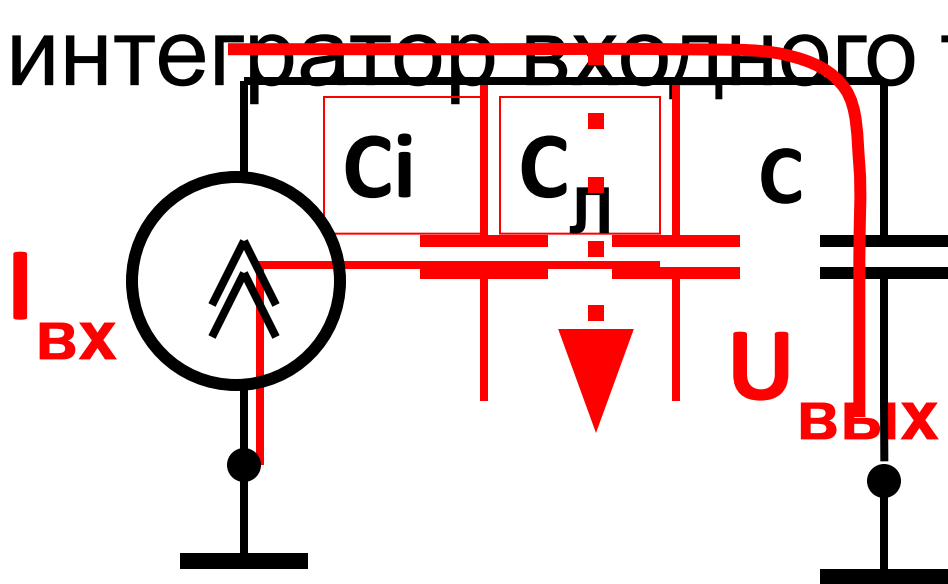


Схема с низкоомными резисторами в цепи ООС для получения большого  $K$ .



# Усилитель заряда

**Усилитель заряда** обеспечивает выходное напряжение, пропорциональное электрическому заряду, приходящему на его вход (другими словами, усилитель заряда- это интегратор входного тока).



$$\Delta U_c = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I \cdot \Delta t}{C}$$

$$\Delta U_c = \frac{\Delta Q}{C_i + C_l + C}$$

# Усилитель заряда

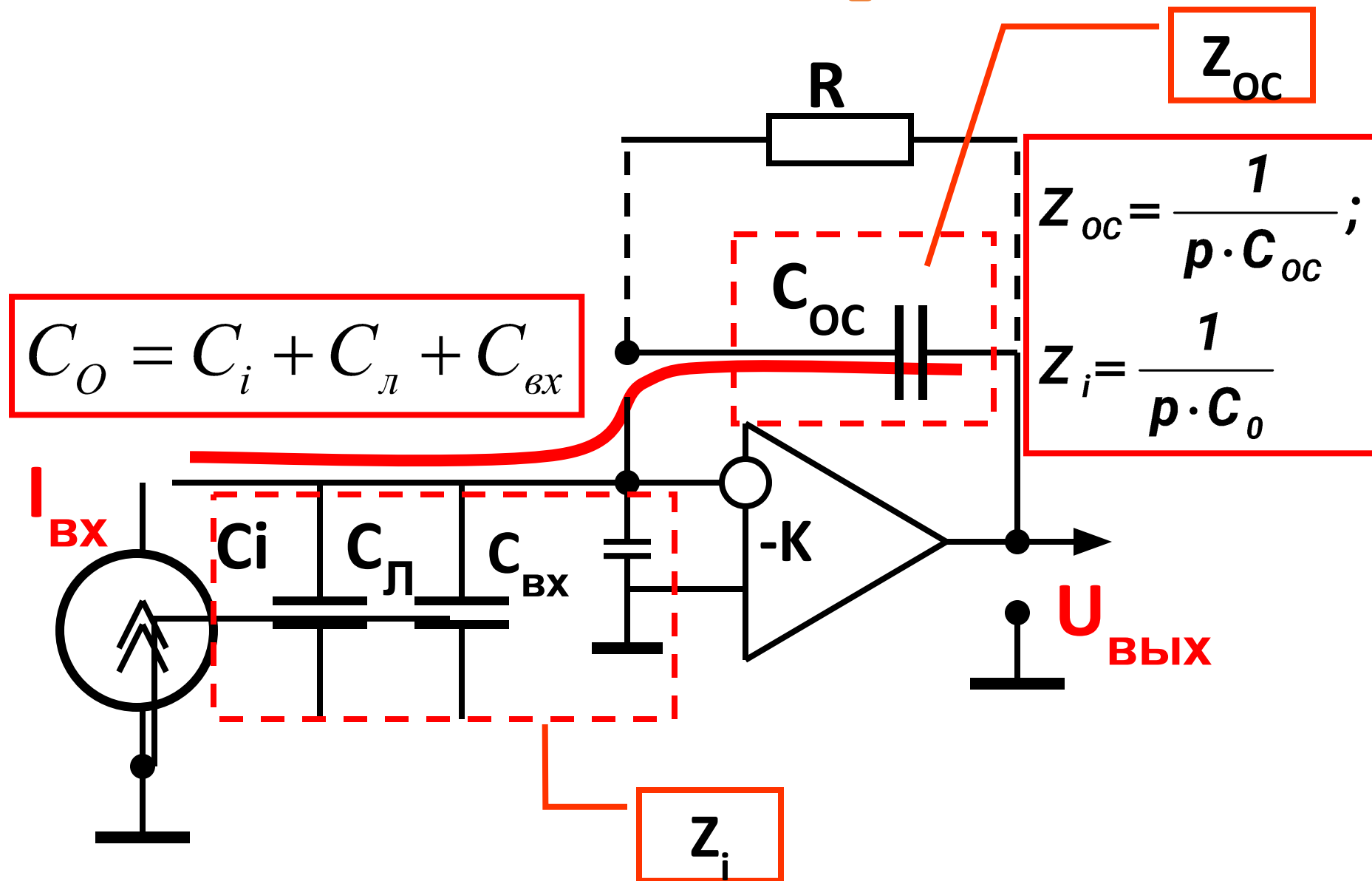


Схема включает в себя ОУ, охваченный обратной связью через конденсатор  $C_{ос}$ . Ко входу ОУ присоединен источник входного заряда, условно показанный в виде источника тока  $I_{вх}$  и соединенной параллельно с ним емкости  $C_i$ .

Конденсатор  $C_{л}$  на схеме показывает емкость линии, соединяющей выход источника усиваемого заряда со входом усилителя заряда.  $C_{вх}$  - входная емкость ОУ.

Усилитель по схеме в принципе можно рассматривать как инвертирующий усилитель для входного тока  $I_{вх}$ .

В отличие от обычного инвертирующего усилителя здесь вместо резисторов  $R_i$  и  $R$  включены конденсаторы  $C_0$  и  $C_{ос}$ . Поэтому усилитель реагирует только на

Реально в качестве источников входных зарядов выступают обычно **датчики** (полупроводниковые, пьезоэлектрические).

Использование в этом случае **усилителей зарядов** вместо **усилителей напряжения** позволяет существенно **уменьшить погрешности** измерения, обусловленные **нестабильностью емкости датчика** и соединительной линии.

$$K_i = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = - \frac{Z_{\text{OC}}}{1 + \frac{1}{\beta_c \cdot K_0}} =$$

$$\approx - \frac{Z_{\text{OC}}}{1 + \frac{1}{\frac{Z_i}{Z_i + Z_{\text{OC}}} \cdot K_0}} = - \frac{\frac{1}{p \cdot C_{\text{OC}}}}{1 + \frac{1}{\frac{1}{\frac{p \cdot C_0}{\frac{1}{p \cdot C_0} + \frac{1}{p \cdot C_{\text{OC}}}} \cdot K_0}}} =$$

$$= - \frac{1}{p \cdot C_{\text{OC}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K} \cdot \left( 1 + \frac{C_0}{C_{\text{OC}}} \right)};$$

$$q_{\text{ex}}(t) = \int i_{\text{ex}}(t) dt, Q_{\text{ex}}(p) = \frac{I_{\text{ex}}(p)}{p};$$

$$K_Q = \frac{U_{\text{BЫX}}}{Q_{\text{BX}}} = \frac{U_{\text{BЫX}}}{\frac{I_{\text{BX}}}{p}} = p \cdot \frac{U_{\text{BЫX}}}{I_{\text{BX}}} =$$

$$= p \cdot \left( -\frac{1}{p \cdot C_{\text{oc}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K} \cdot \left( 1 + \frac{C_0}{C_{\text{oc}}} \right)} \right) =$$

$$= -\frac{1}{C_{\text{oc}}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{K} \cdot \left( 1 + \frac{C_0}{C_{\text{oc}}} \right)} \cong -\frac{1}{C_{\text{oc}}};$$



$$K_q = -\frac{1}{C_{oc}}$$

Увеличение коэффициента преобразования усилителя заряда достигается путем уменьшения емкости  $C_{oc}$ .

## 1.3. Управляемые усилители

- Управляемым усилителем называется такой усилитель, коэффициентом усиления которого можно управлять цифровыми сигналами или аналоговым напряжением.
- Цифровое управление применяют в микропроцессорных средствах измерения и устройствах с автоматическим выбором пределов измерений.
- Управляемые напряжением усилители применяются как самостоятельные узлы и в составе функциональных блоков (автоматической регулировки усиления АРУ, ФАПЧ и т.Д.)

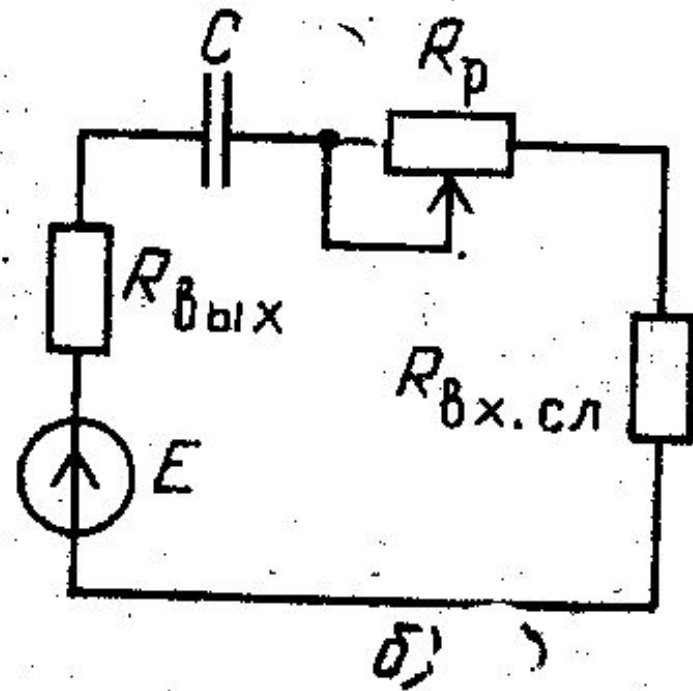
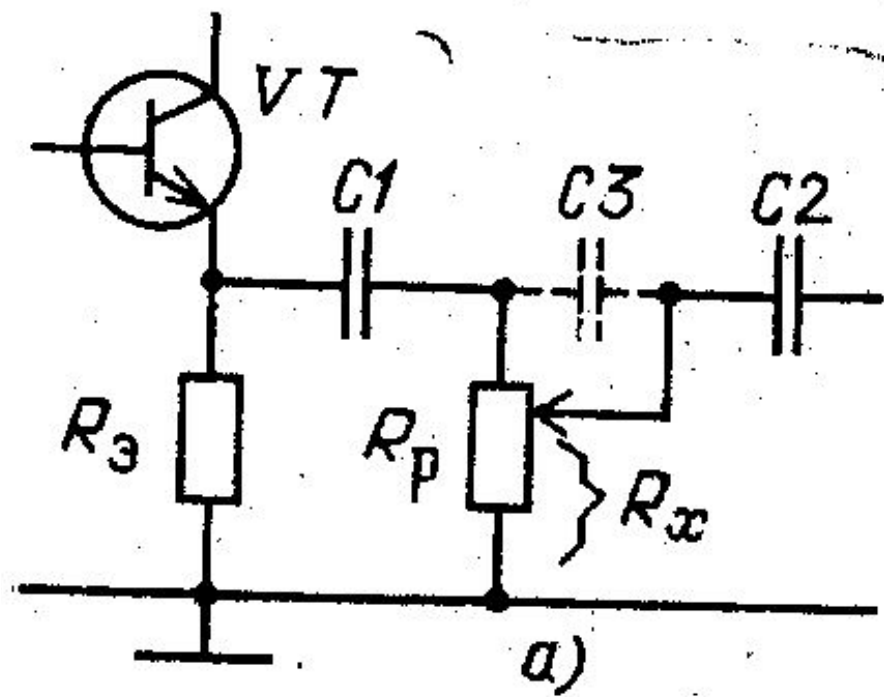
## *Регулировка усиления:*

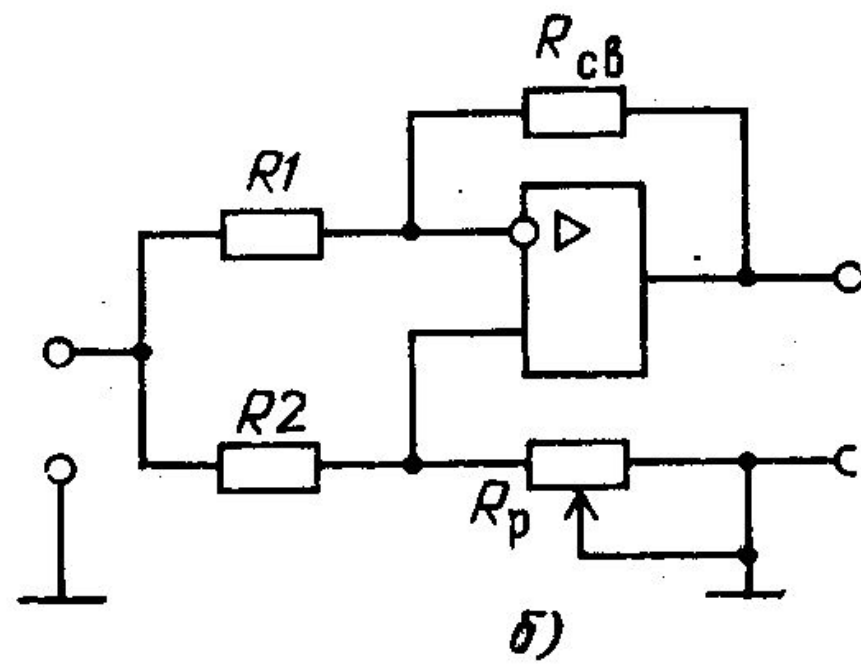
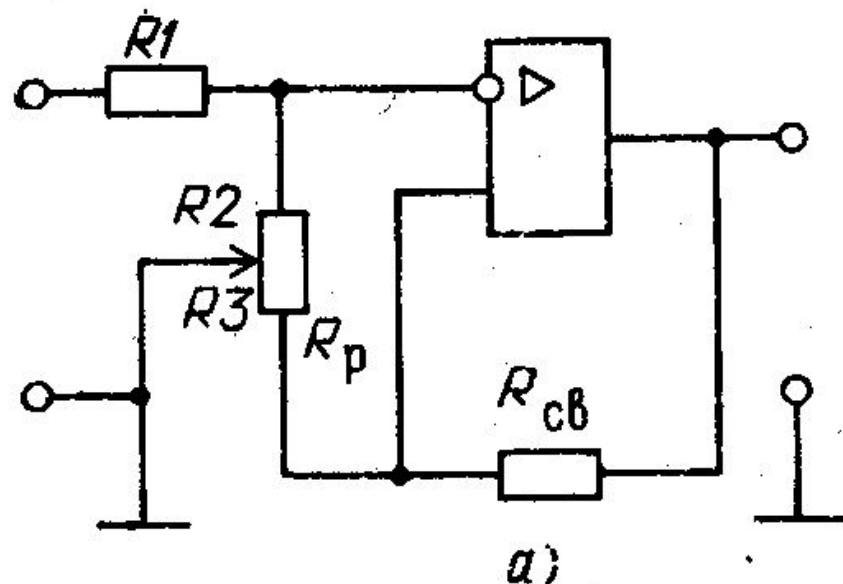
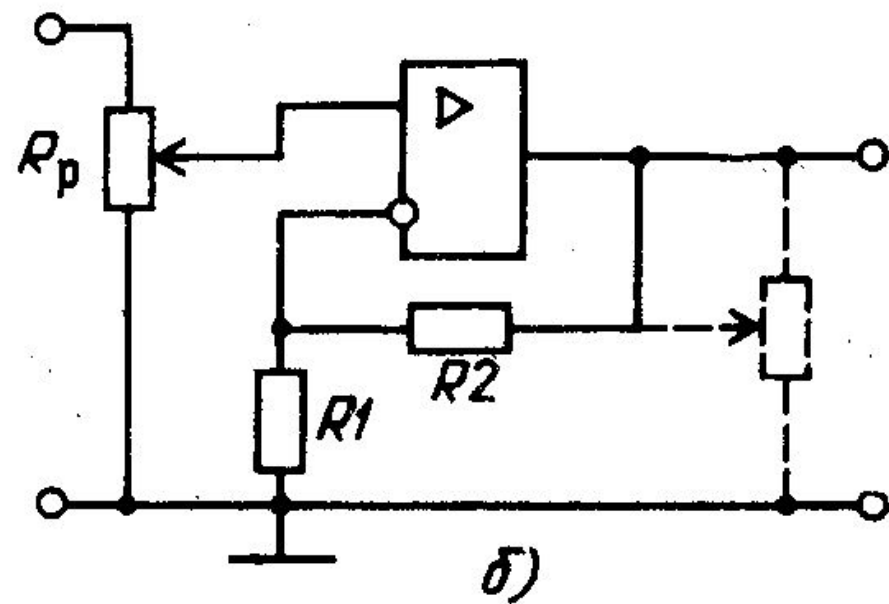
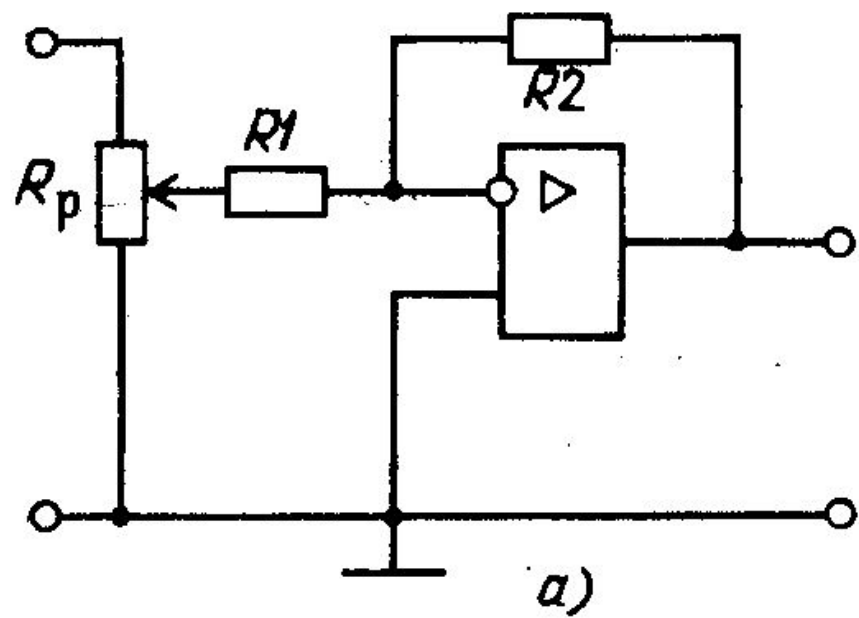
- Плавно- потенциометрическая;
- Дискретно -ступенчатая.

## *Способ регулировки усиления напряжением:*

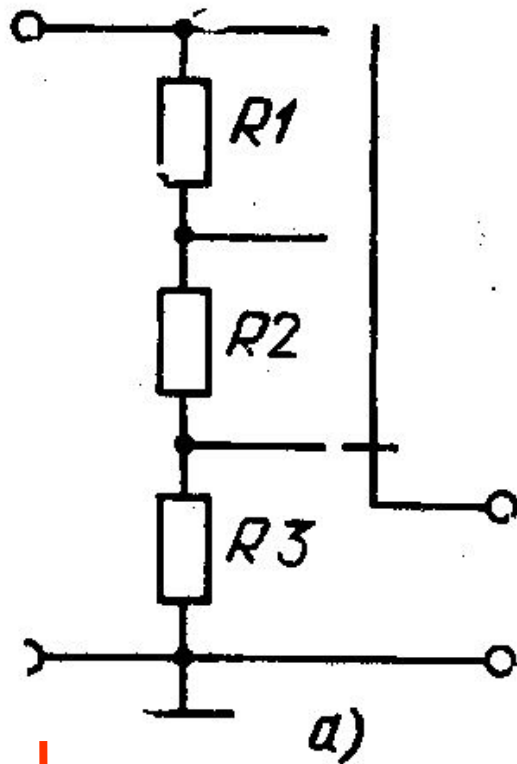
- Резистивный делитель (с управляемым напряжением резистором-ПТ);
- аналоговый умножитель.

# Потенциометрическая регулировка

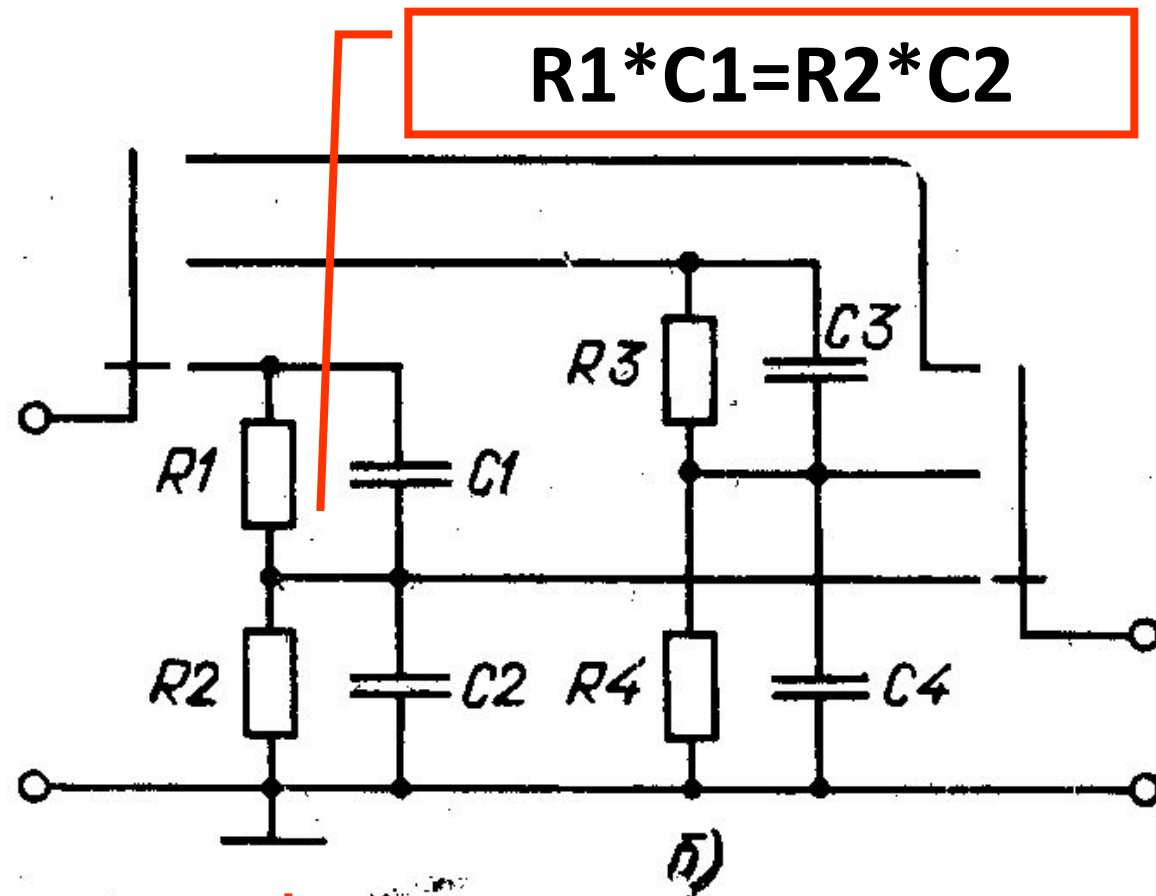




# Дискретная регулировка усиления:

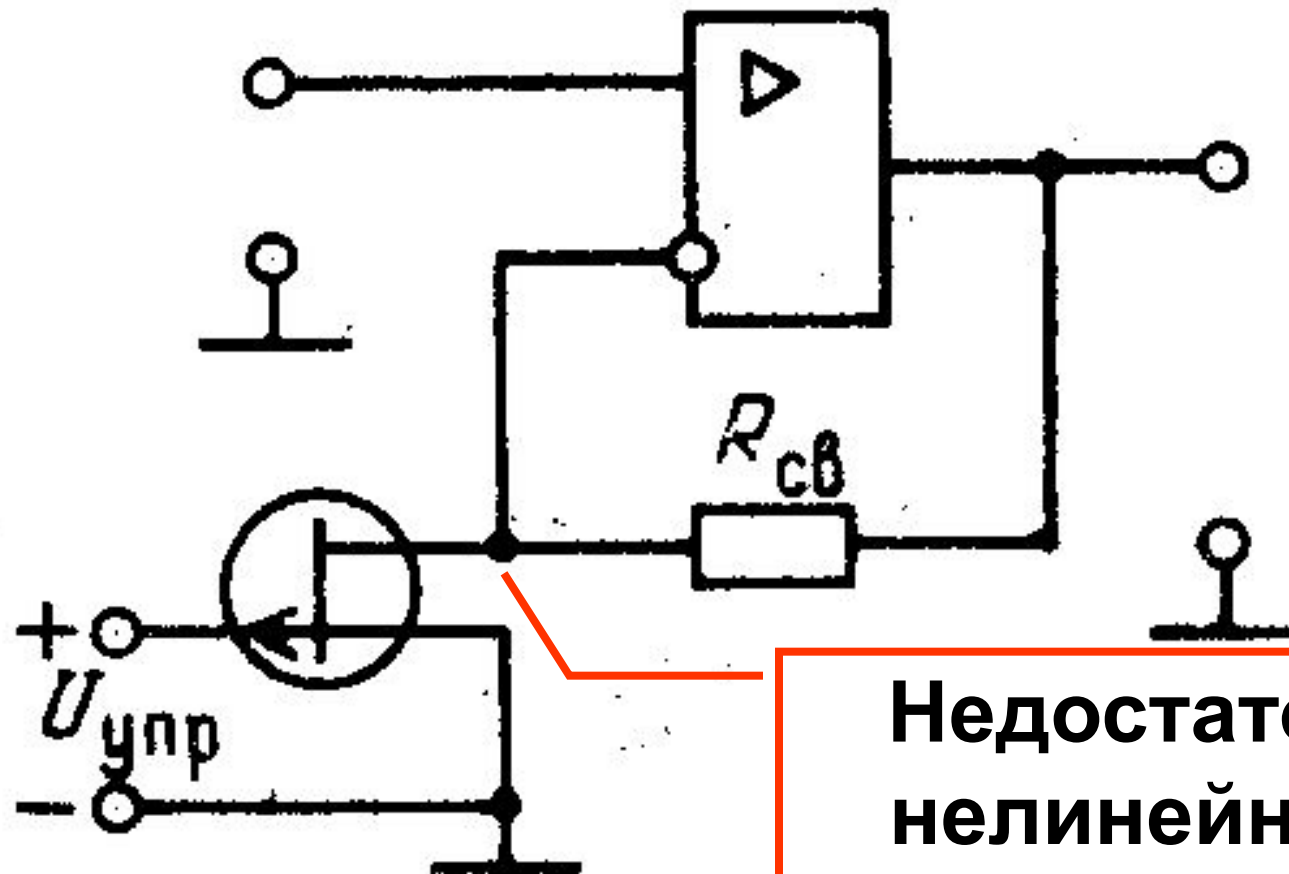


**Низкоомный  
делитель**



**Высокоомный  
делитель**

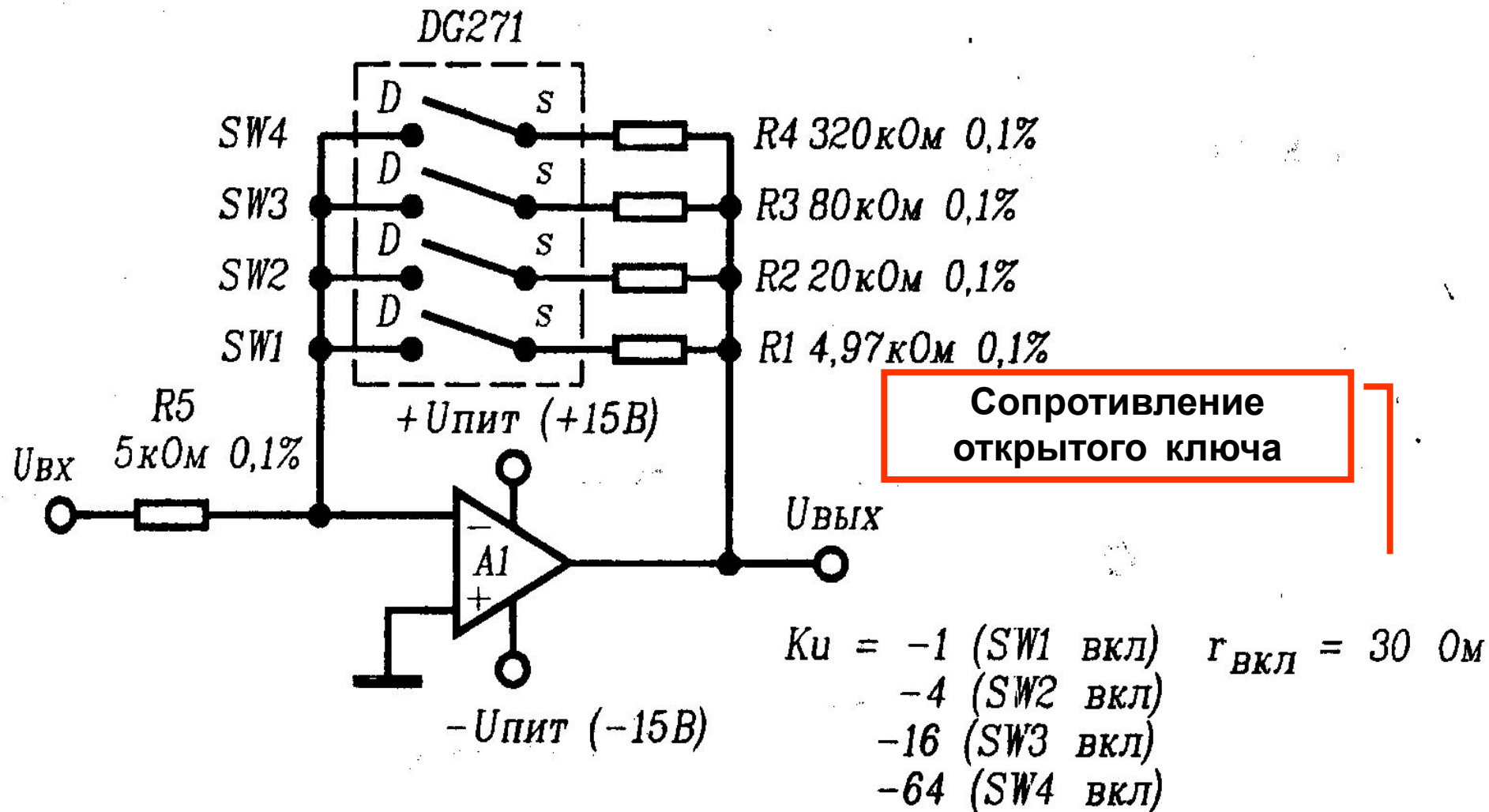
# Плавная регулировка усиления с полевым транзистором:



Недостаток:  
нелинейная  
зависимость

$$r(U_{упр})$$

# Усилитель с цифровым управлением усилением аналоговыми ключами



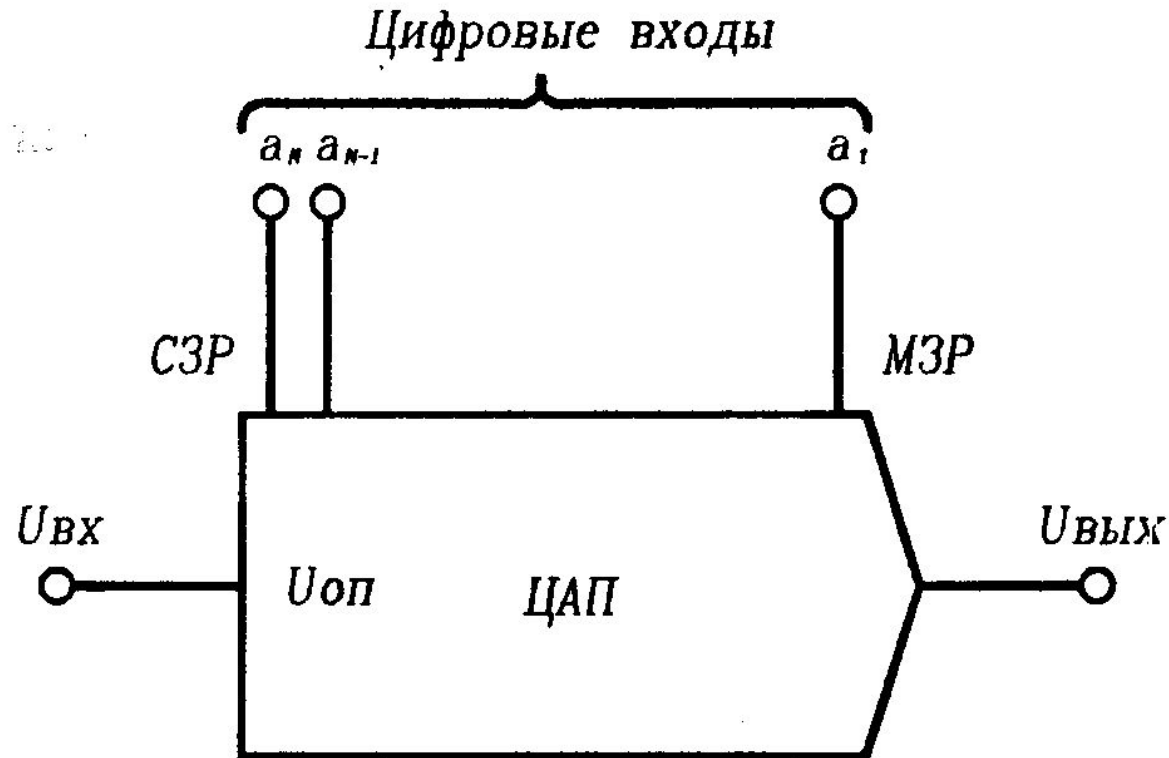


# Цифровой аттенюатор с применением ЦАП

Выходное напряжение:

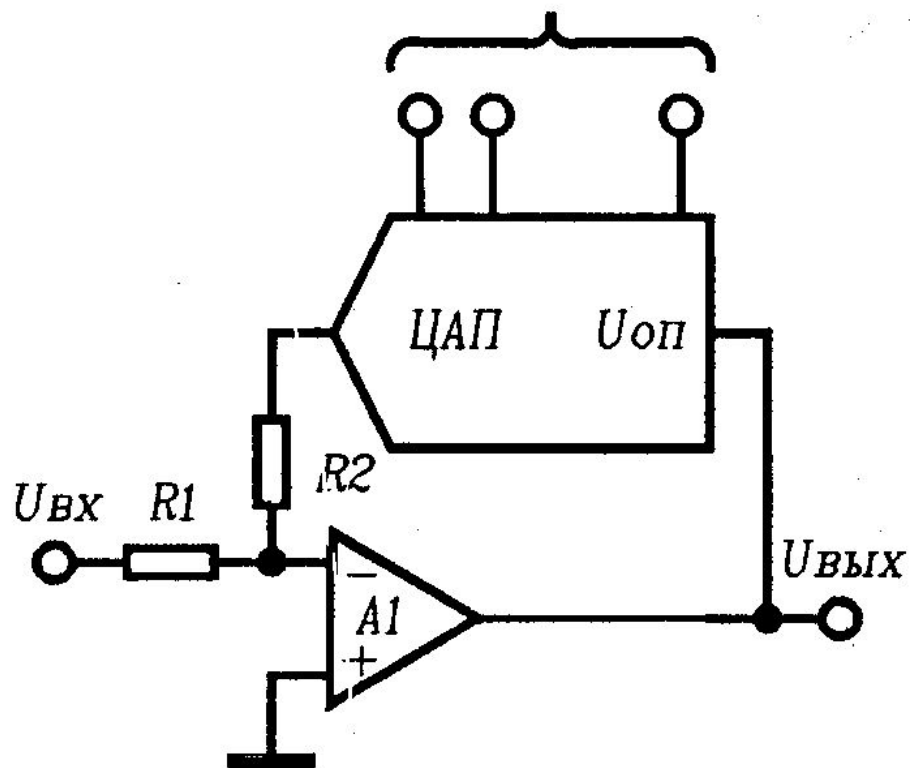
$$U_{\text{ВЫХ}} = (N_{\text{ВХ}}/N_{\text{МАХ}}) \cdot U_{\text{ВХ}} ,$$

где  $N_{\text{ВХ}}$  — значение двоичного входного кода,  
 $N_{\text{МАХ}}$  — максимальное значение двоичного кода ( $= 2^N$ ).



# Усилитель с управлением усилением ЦАП

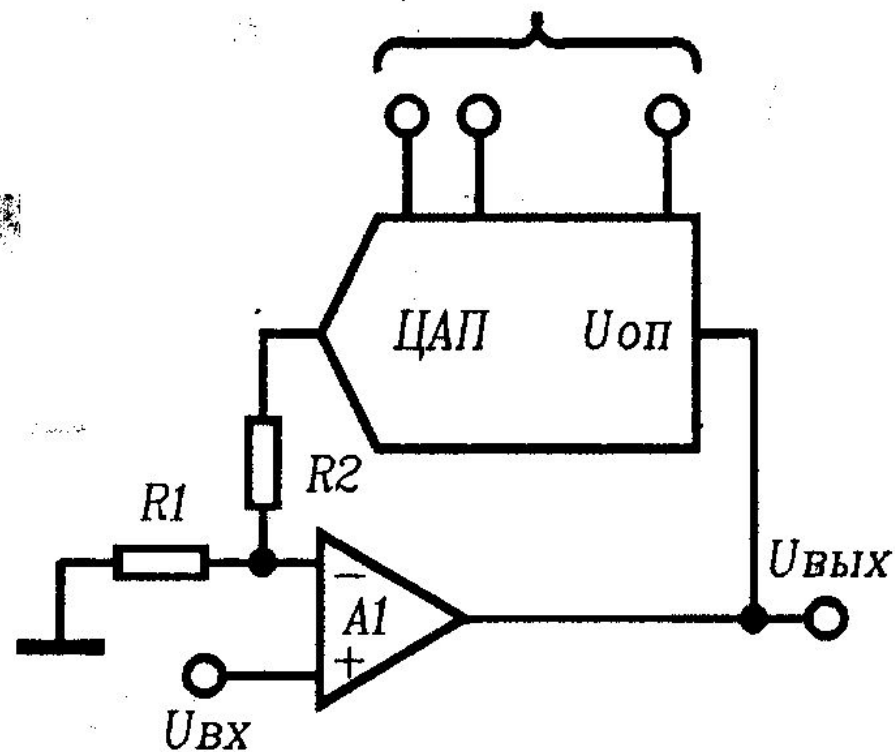
Код коэффициента усиления



$$U_{\text{ВЫХ}} = - \frac{R2}{R1} \frac{N_{\text{max}}}{N_{\text{ВХ}}} U_{\text{ВХ}}$$

Инвертирующий

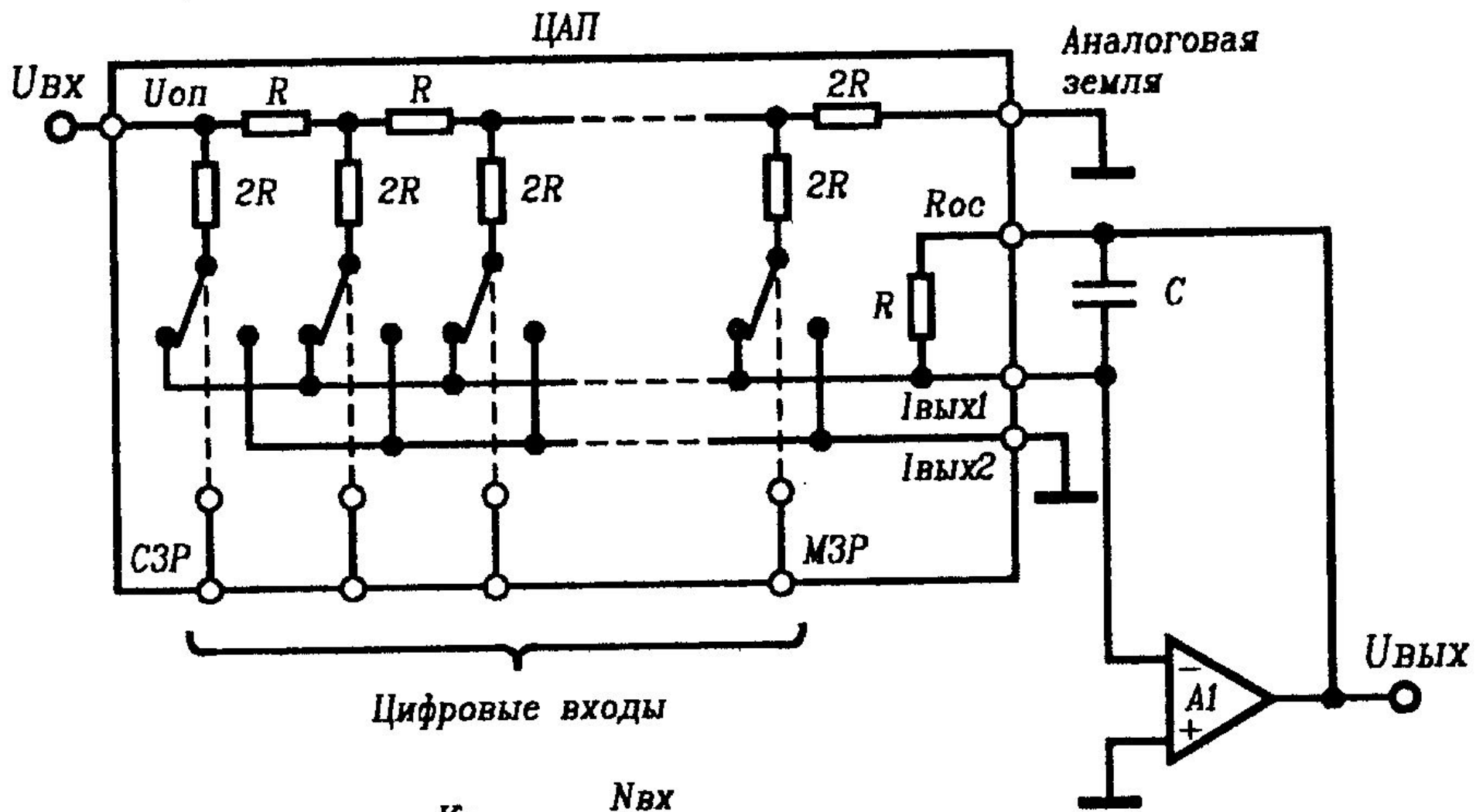
Код коэффициента усиления



$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R1 + R2}{R1} \frac{N_{\text{max}}}{N_{\text{ВХ}}} U_{\text{ВХ}}$$

Неинвертирующий

# Умножающий ЦАП



$$K_u = - \frac{N_{вх}}{N_{max}}$$

### ***13.1.4. Изолирующие усилители***

Развязывающий или изолирующий усилитель характеризуется высоким уровнем гальванической изоляции (развязки) между входными и выходными цепями.

Такой уровень изоляции достигается с помощью емкостной, оптической или трансформаторной связи между входным и выходным каскадами.

Надежная изоляция требуется в тех ситуациях, когда приходится иметь дело с высокими синфазными напряжениями.

Вполне возможно, например, спроектировать усилитель для развязки синфазных напряжений в несколько тысяч вольт.

Особое значение такие усилители имеют в медицине, когда электроды подключаются к телу пациента, и изоляция требуется по соображениям безопасности.

Развязывающие усилители применяются также для исключения наводок по "земляным" проводам и в тех случаях, когда требуется очень высокий коэффициент подавления синфазного напряжения (более 100 дБ).

На рис. 2.1 представлена  
**блок-схема**  
**развязывающего усилителя.**  
Основными компонентами  
таких усилителей являются:

- **входная секция,**
- **выходная секция,**
- **секция питания.**

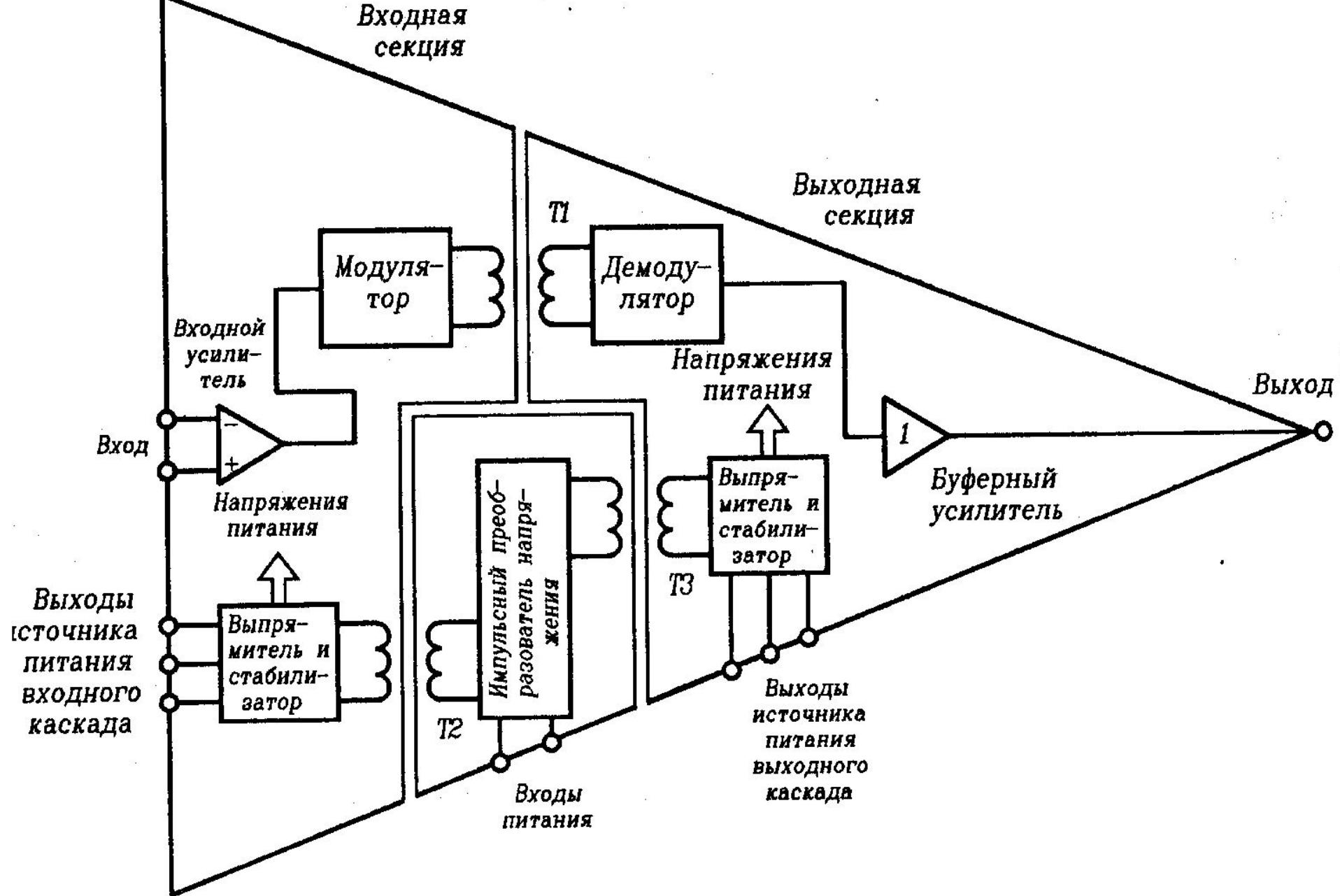


Рис. 2.1. Блок-схема развязывающего усилителя.

Главная особенность этих устройств состоит в том, что их входная и выходная секции должны иметь полную гальваническую развязку как **по сигналу**, так и по **источникам питания**.

В показанном на рис. 2.1 развязывающем усилителе реализована так называемая **трехуровневая развязка**: его **входной каскад**, **выходной каскад** и **секция питания** **изолированы** друг от друга.

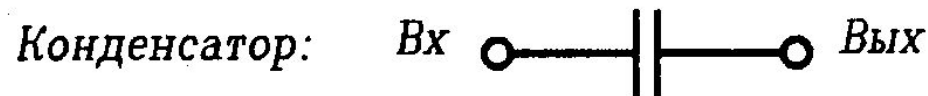
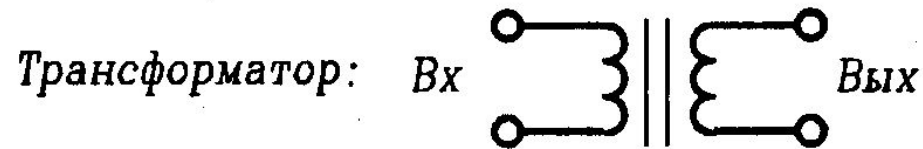
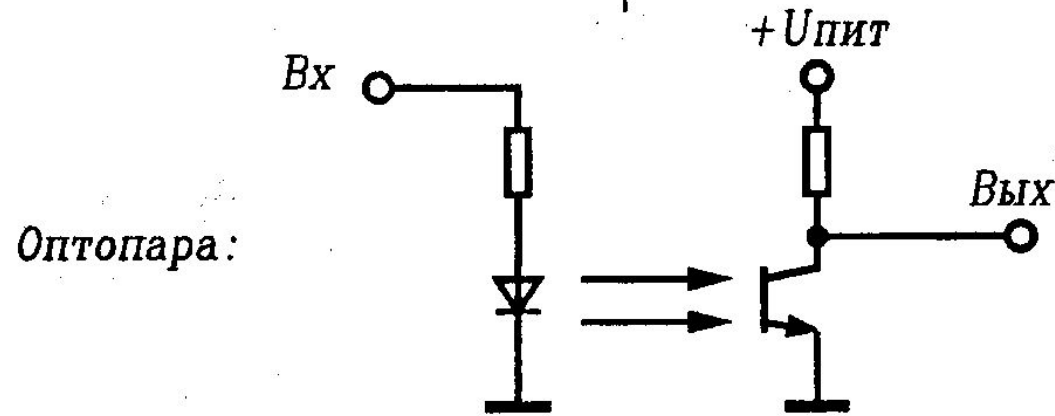
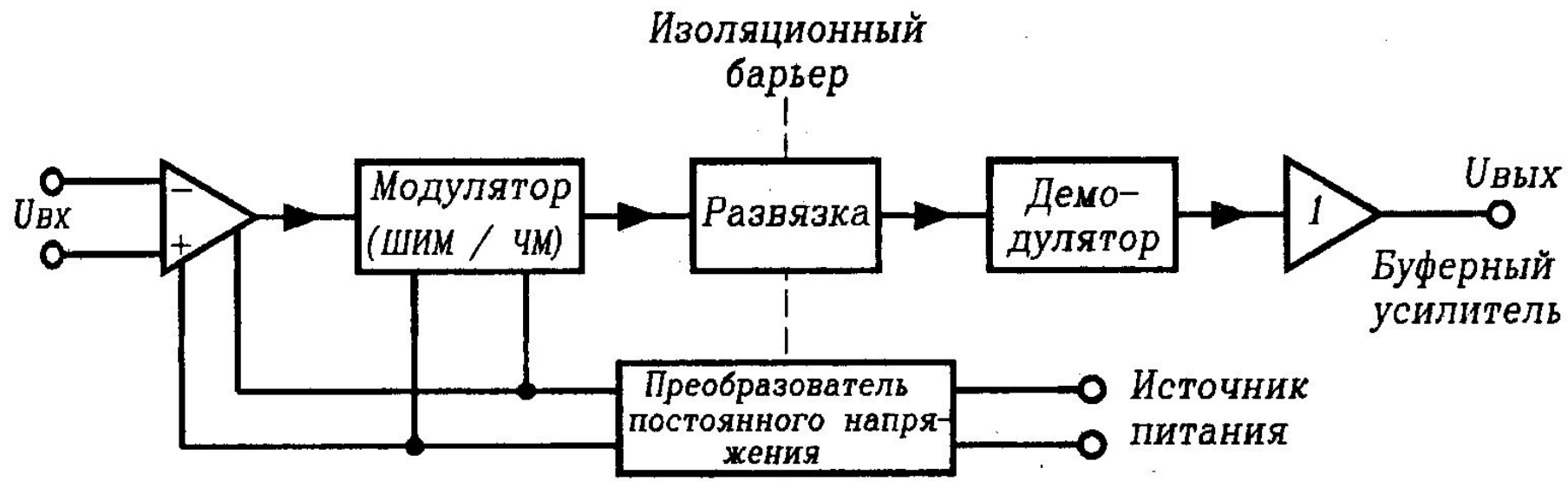


В такой трехуровневой системе питающие напряжения для всех узлов схемы обеспечиваются встроенной секцией питания.

Однако в некоторых трехуровневых устройствах питание выходного каскада должно осуществляться от того же источника питания, что и последующие каскады.

- Многие развязывающие усилители относятся к так называемой **двухуровневой** разновидности, - т.е. их выходной каскад и секция питания не изолированы.
- Во всех развязывающих усилителях **питание входного каскада** (в трехуровневой схеме — и выходного каскада) **осуществляется через разделительный трансформатор**. Как правило, используют небольшие ферритовые трансформаторы.

- На практике применяются три способа передачи сигнала от входного к выходному каскаду:  
**трансформаторный, оптический и емкостной.**
- Для передачи сигнала через цепь гальванической развязки обычно применяются два метода:  
**модуляция/демодуляция**  
(применяется для всех трех видов связи)  
и **линеаризирующая обратная связь**  
(применяется с оптронами).



Несколько пФ

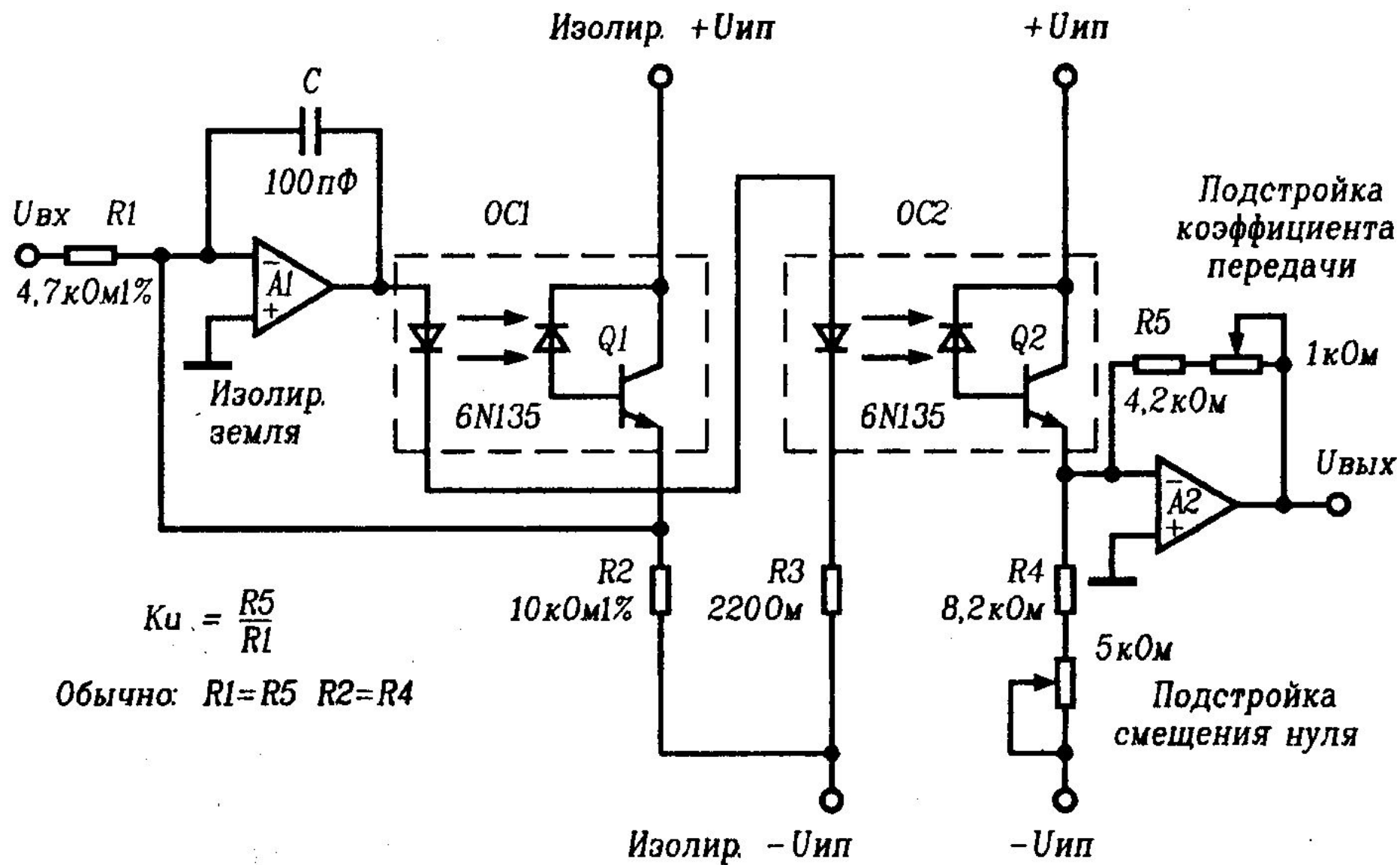


Таблица 2.1. Параметры некоторых промышленных развязывающих усилителей.

Продолжение табли

Параметр	AD202K	AD210AN
<i>Параметры развязки</i>		
Максимальное напряжение изоляции (60 Гц)	1500 В эфф	2500 В эфф
Сопротивление изоляции//проходная емкость	2 ГОм//4,5 пФ	5 ГОм//5 пФ
КОСС: на постоянном токе ( $K_U = 1$ )	—	—
на частоте 60 Гц ( $K_U = 1$ )	105 дБ	120 дБ
<i>Усиление</i>		
Диапазон	1-100	1-100
Точность	0,5%	2% <sup>А</sup>
Дрейф	$20 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$25 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Нелинейность ( $K_U = 1$ )	$250 \cdot 10^{-6}$	$250 \cdot 10^{-6}$ <sup>А</sup>
<i>Смещения</i>		
Входное напряжение смещения	5 мВ <sup>А</sup>	15 мВ <sup>А</sup>
Дрейф входного напряжения смещения	10 мкВ/ <sup>о</sup> С	10 мкВ/ <sup>о</sup> С
Выходное напряжение смещения	5 мВ <sup>А</sup>	45 мВ <sup>А</sup>
Дрейф выходного напряжения смещения	10 мкВ/ <sup>о</sup> С	30 мкВ/ <sup>о</sup> С
<i>Питание</i>		
Входное напряжение питания	+15 В	+15 В
Ток потребления при $U_{\text{вх}} = 0$	5 мА	50 мА
Изолированные выходы питания	$\pm 7,5$ В при 400 мкА	$\pm 15$ В (x 2) при 5 мА
<i>Динамические параметры</i>		
Полоса пропускания ( $K_U = 1$ )	2 кГц	20 кГц
Время установления (с точностью 0,1%)	1 мс	150 мкс
Тип корпуса	SIL/DIL	DIL
Развязка	2 уровня / с питанием	3 уровня
Способ развязки	Трансформаторный	Трансформаторный
<i>Комментарии</i>		
	Напряжение питания AD202K +15 В, общее с выходным каскадом. AD204K аналогичен описанному, но источник питания синхронизируется внешним сигналом с частотой 25 кГц.	Полная трехуровневая развязка с разделенными секциями входа/выхода/питания.

Модель	Uизол. В	Uпит. В	Iпотр., мА	Uсм., мВ	Uвх., В	BW, кГц	SR, В/мкс	$e_{нр}$ мкВ/√Гц
ISO122	1500	±4,5...±18	5,0...7,0	20...50	±12,5	50	2	4
ISO124	1500	±4,5...±18	5,0...7,0	20...50	±12,5	50	2	4

КНИ, %	Iвых., мА	tуст, мкс	Траб., °С	Особенности	Цена, руб.
0,02	±5...±15	50	-25...+85	Прецизионный	528,83
0,01	±5...±15	50	-25...+85	Прецизионный	388,89

# Р1. Тема 3. Схемы линейного преобразования на ОУ

*«СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ 2»*

*© Школа Н.Ф.*

***Лекция №4 2017 г.***

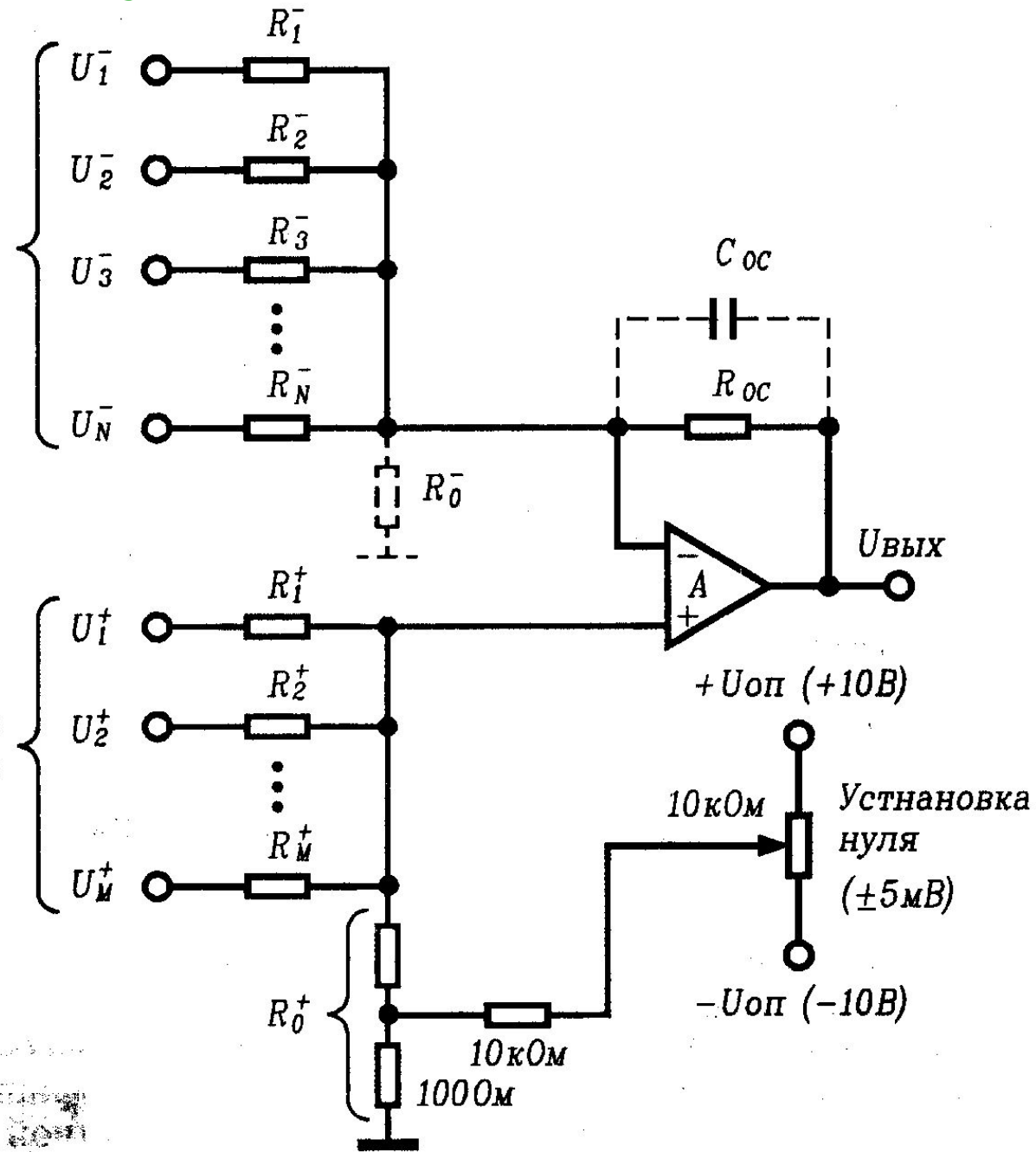


## 3.1. Схемы на ОУ для выполнения арифметических операций.

- Операции **суммирования/вычитания**;
- Операции **умножения/деления**.

**Реализовать ТОЧНО операции суммирования и вычитания гораздо проще, чем операции умножения и деления, поэтому последние следует избегать по причине их больших погрешностей.**

# 13.4.1. Схемы суммирования и вычитания



$$U_{\text{ВЫХ}} = K_1^+ \cdot U_1^+ + K_2^+ \cdot U_2^+ + \dots + K_M^+ \cdot U_M^+ - \\ - K_1^- \cdot U_1^- - K_2^- \cdot U_2^- - \dots - K_N^- \cdot U_N^- ,$$

где

$$K_1^- = \frac{R_{oc}}{R_1^-} , \dots , K_N^- = \frac{R_{oc}}{R_N^-} ;$$

$$K_1^+ = \left( 1 + \frac{R_{oc}}{R_\Sigma^-} \right) \cdot \frac{R_\Sigma^+}{R_1^+} , \dots$$

$$K_M^+ = \left( 1 + \frac{R_{oc}}{R_\Sigma^-} \right) \cdot \frac{R_\Sigma^+}{R_M^+};$$

$$R_\Sigma^- = R_0^- \parallel R_1^- \parallel R_2^- \parallel \dots \parallel R_N^- ,$$

$$R_\Sigma^+ = R_0^+ \parallel R_1^+ \parallel R_2^+ \parallel \dots \parallel R_M^+ .$$

**Выходное напряжение смещения  
определяется выражением:**

$$= \left(1 + \frac{R_{OC}}{R_{\Sigma}^-}\right) U_{CM.VX} + I_{CM.VX} R_{OC} - I_{CM.VX} R_{\Sigma}^+ \left(1 + \frac{R_{OC}}{R_{\Sigma}^-}\right)$$

$$= \left(1 + \frac{R_{OC}}{R_{\Sigma}^-}\right) U_{CM.VX} + \Delta I_{CM.VX} R_{OC} ,$$

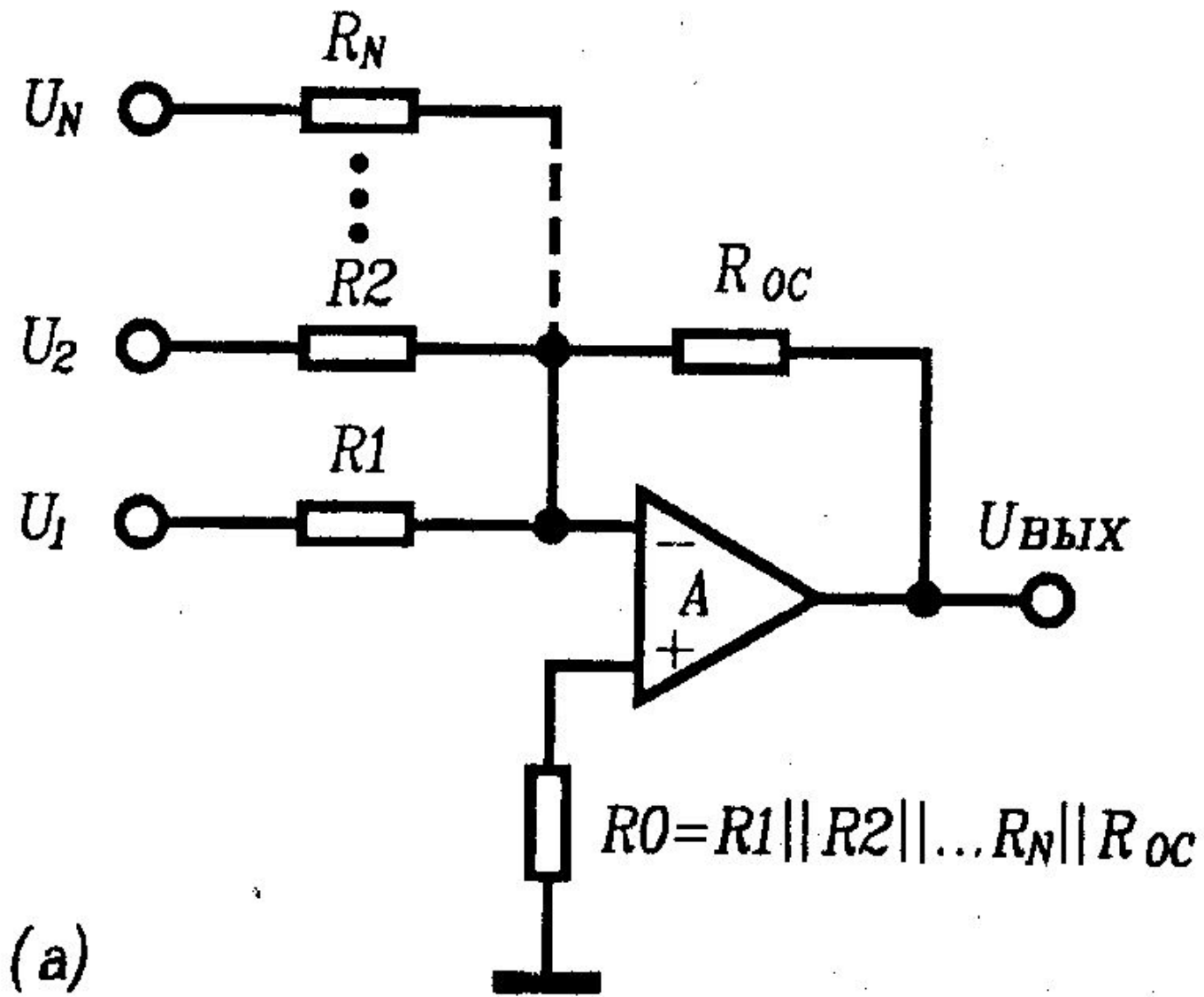
$$\dots \frac{1}{R_{\Sigma}^+} = \frac{1}{R_{OC}} + \frac{1}{R_{\Sigma}^-}$$

$U_{\text{см.вх}}$  — входное напряжение смещения ОУ,

$I_{\text{см.вх}}^+$  и  $I_{\text{см.вх}}^-$  — входные токи неинвертирующего  
и входов ОУ,

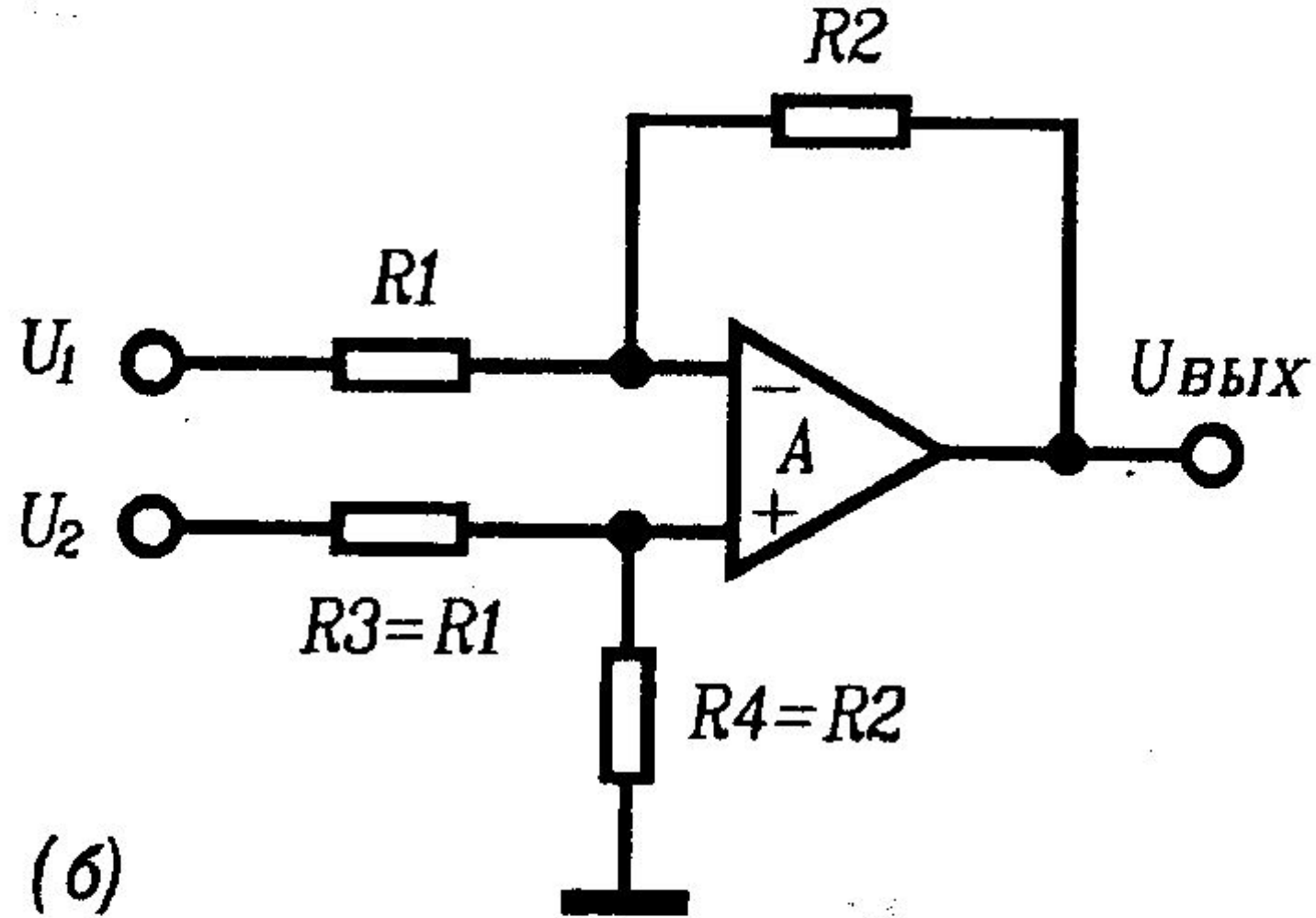
$\Delta I_{\text{см.вх}}$  — разность входных токов ОУ.

# Упрощенная схема суммирования



$$U_{\text{ВЫХ}} = - \left[ \frac{R_{oc}}{R_1} U_1 + \frac{R_{oc}}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R_{oc}}{R_N} U_N \right]$$

# Упрощенная схема вычитания



(6)

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



# Требования к ОУ

- При большом числе входов и больших коэффициентах усиления ОУ должен иметь **большим собственным коэффициент усиления**;
- при использовании **неинвертирующих входов КОСС** должен быть **большим**;
- при **больших резисторах** использовать **ОУ с ПТ** на входе;

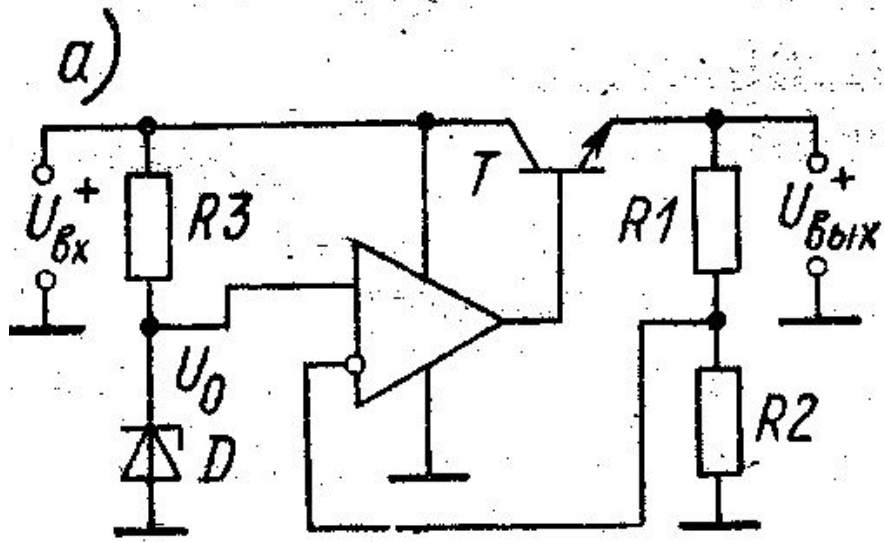
- для получения высокого быстродействия (широкополосности) необходим соответствующий ОУ и **низкоомные** сопротивления;
- **малые статические погрешности** ОУ.

## **3.2. Стабилизаторы напряжения и тока**

- 13.2.1. Стабилизаторы напряжения одно- и двухполярные.
- 13.2.2. Интегральные стабилизаторы напряжения.
- 13.2.3. Стабилизаторы тока.

### **3.2.1 Стабилизаторы напряжения однополярные**

- **Однополярные стабилизаторы** напряжения на основе ОУ могут быть построены по схеме инвертирующего или неинвертирующего усилителя, на вход которого подано **стабильное напряжение от опорного источника**.
- Достоинством подобных стабилизаторов является возможность получения **различных по абсолютному значению и знаку стабилизированных напряжений** при неизменном опорном.



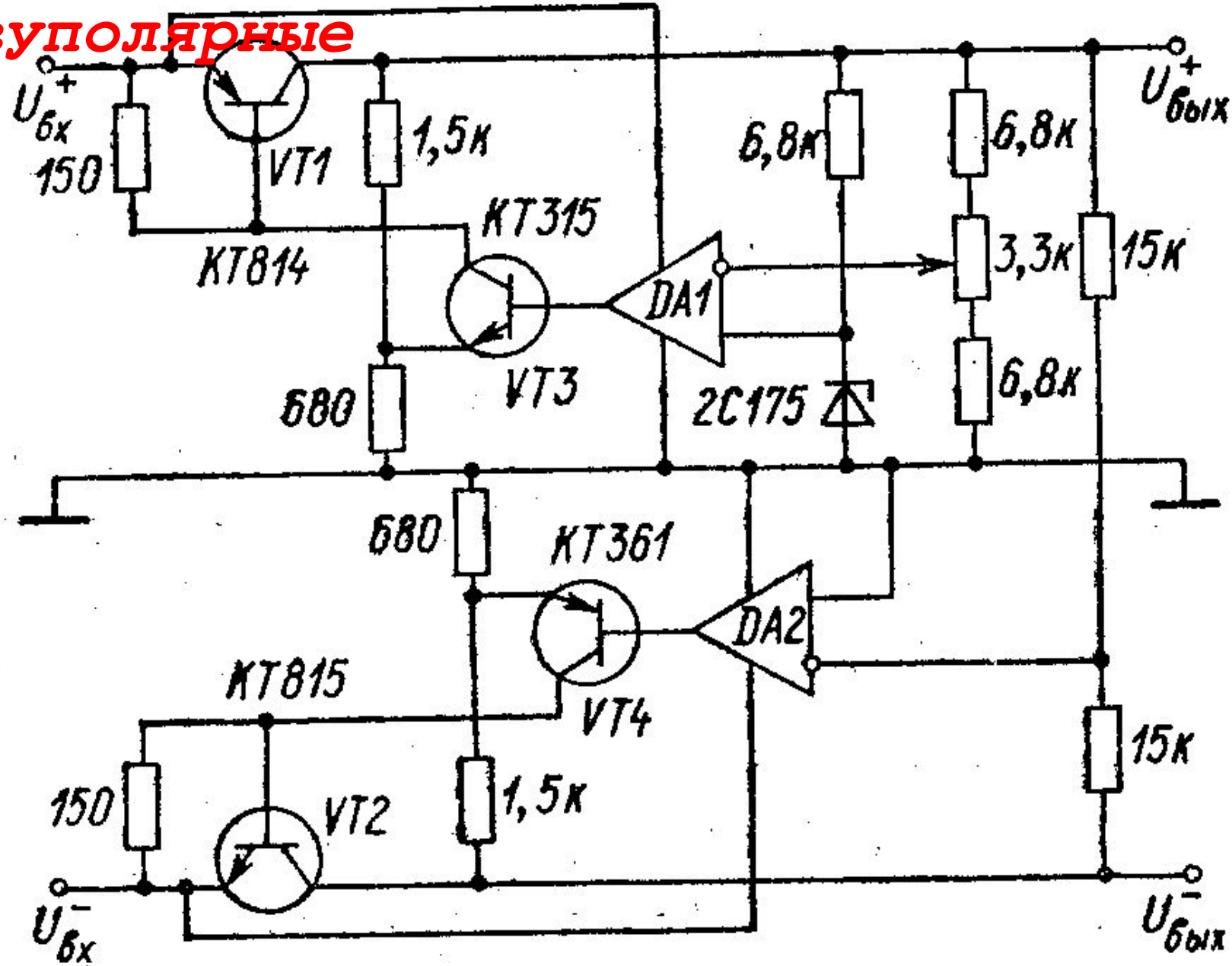
$$U_{\text{ВЫХ}} = U_0 \cdot \left( 1 + \frac{R1}{R2} \right)$$

**ОУ** включен в схему неинвертирующего усилителя, на вход которого подано опорное напряжение  $U_0$  со стабилитрона  $D$ .

Для увеличения выходного тока стабилизатора используется повторитель напряжения на транзисторе  $T$  (он может отсутствовать, если выходной ток стабилизатора менее 5 мА)

## 3.2.2 Стабилизаторы напряжения

двуполярные



# **Интегральные стабилизаторы напряжения**

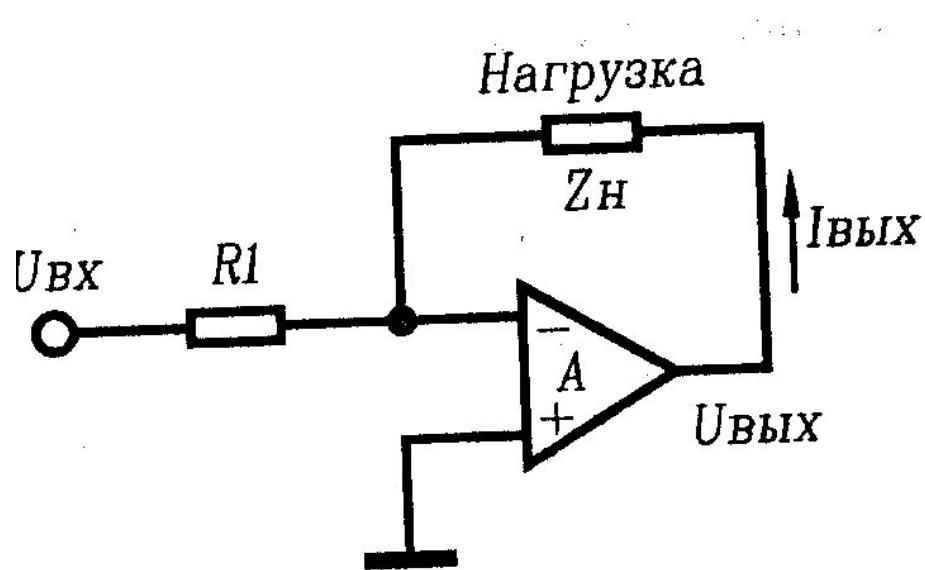
- При построении различных электронных устройств удобно применять интегральные стабилизаторы, выполненные в виде **полупроводниковых микросхем**.
- Отечественная промышленность выпускает различные полупроводниковые интегральные схемы стабилизаторов напряжения (**142ЕН...**), обеспечивающих получение как регулируемых (**3—30 В**), так и фиксированных напряжений (**5; 6; 9; 12; 15; ± 15; 20; 24; 27 В**)

# Параметры некоторых интегральных линейных стабилизаторов положительного напряжения

Наименование	Uвых.н., А	Uвых. ном., В	ΔUвых., %	Uвх. макс., В	ΔUвых. (от Uвх), мВ	ΔUвых. (от Iвых), мВ	Iпотр., мА	Траб., °С	Цена, руб.
<b>В корпусе Т0-3</b>									
LM323К	3	5	5	20	25	100	20	0...+125	123,03
<b>В корпусе Т0-220</b>									
МС78М05СТ	0,5	5	4	35	50	100	6	0...+125	4,47
МС78М08СТ	0,5	8	4	35	50	160	6	0...+125	8,67
МС78М12СТ	0,5	12	4	35	50	240	6	0...+125	7,27
МС78М15СТ	0,5	15	4	35	50	300	6	0...+125	8,64
L7805ABV	1,0	5	2	35	50	100	6	-40...+125	10,07
L7808ACV	1,0	8	2	35	80	100	6	0...+125	10,07
L7812ABV	1,0	12	2	35	120	100	6	-40...+125	11,20
L7815ABV	1,0	15	2	35	150	100	6	-40...+125	14,39
МС7812АСТ	1,0	12	2	35	240	240	8	0...+125	9,36
МС7815АСТ	1,0	15	2	35	300	300	8	0...+125	9,07
МС7805ВТ	1,0	5	4	35	100	100	8	-40...+125	8,49
МС7806ВТ	1,0	6	4	35	120	120	8	-40...+125	8,40
МС7809ВТ	1,0	9	4	35	180	180	8	-40...+125	9,12
МС7812ВТ	1,0	12	4	35	240	240	8	-40...+125	9,92
МС7824ВТ	1,0	24	4	40	240	100	6	-40...+125	9,83
МС7805СТ	1,0	5	4	35	100	100	8	0...+125	6,29
МС7806СТ	1,0	6	4	35	120	120	8	0...+125	7,75
МС7809СТ	1,0	9	4	35	180	180	8	0...+125	6,88
МС7812СТ	1,0	12	4	35	240	240	8	0...+125	4,02
КР142ЕН9К	1,0	27	3	35	-	-	-	-40...+85	4,00
КР1158ЕН3В	1,2	3	-	37	-	-	-	0...+70	16,70
КР1158ЕН5В	1,2	5	-	37	-	-	-	0...+70	17,50
КР1158ЕН5Г	1,2	5	-	37	-	-	-	0...+70	18,00
L7805CV	1,5	5	4	35	50	100	6	0...+150	5,27
L7806CV	1,5	6	4	35	60	100	6	0...+150	5,01
L7808CV	1,5	8	4	35	80	100	6	0...+150	5,01
L7809CV	1,5	9	4	35	90	100	6	0...+150	5,33
L7812CV	1,5	12	4	35	120	100	6	0...+150	5,33
L7815CV	1,5	15	4	35	150	100	6	0...+150	5,51
L7818CV	1,5	18	4	35	180	100	6	0...+150	6,56

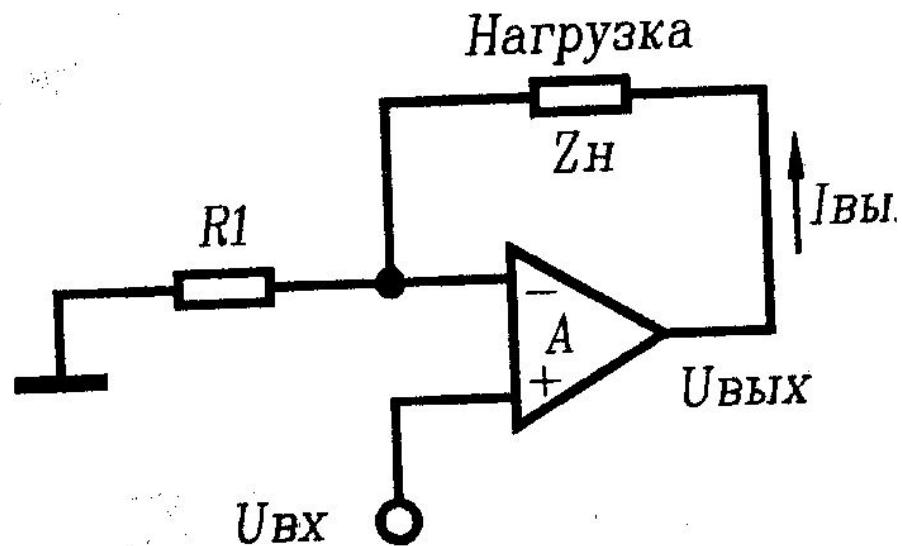


## 3.2.3. Стабилизаторы тока



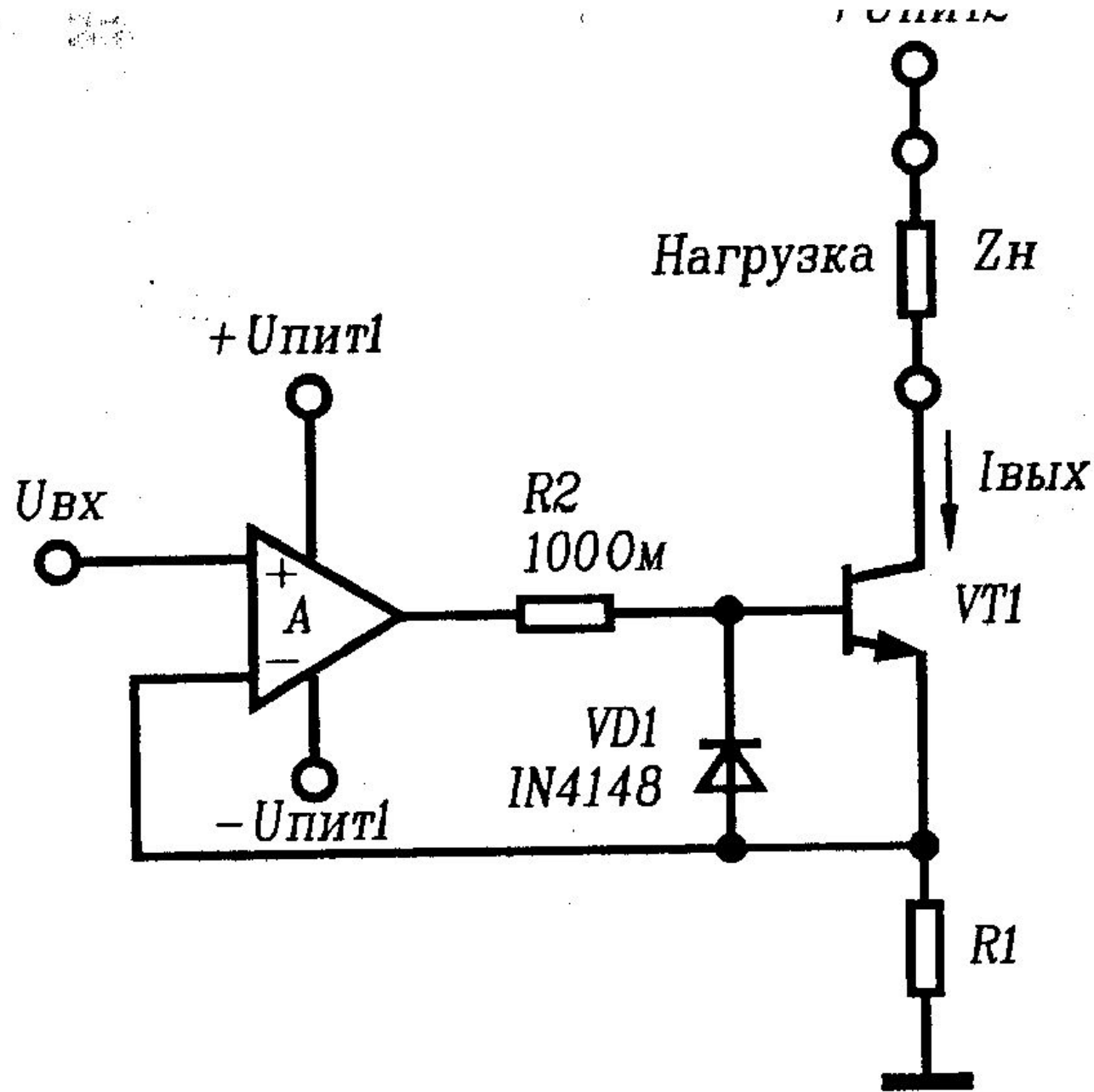
(Инвертирующий)

$$I_{ВЫХ} = - \frac{U_{ВХ}}{R1}$$



(Неинвертирующий)

$$I_{ВЫХ} = \frac{U_{ВХ}}{R1}$$



$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}$$

$$U_{\text{ВХ}} > 0$$

Рис. 4.12. Однополярный источник тока.

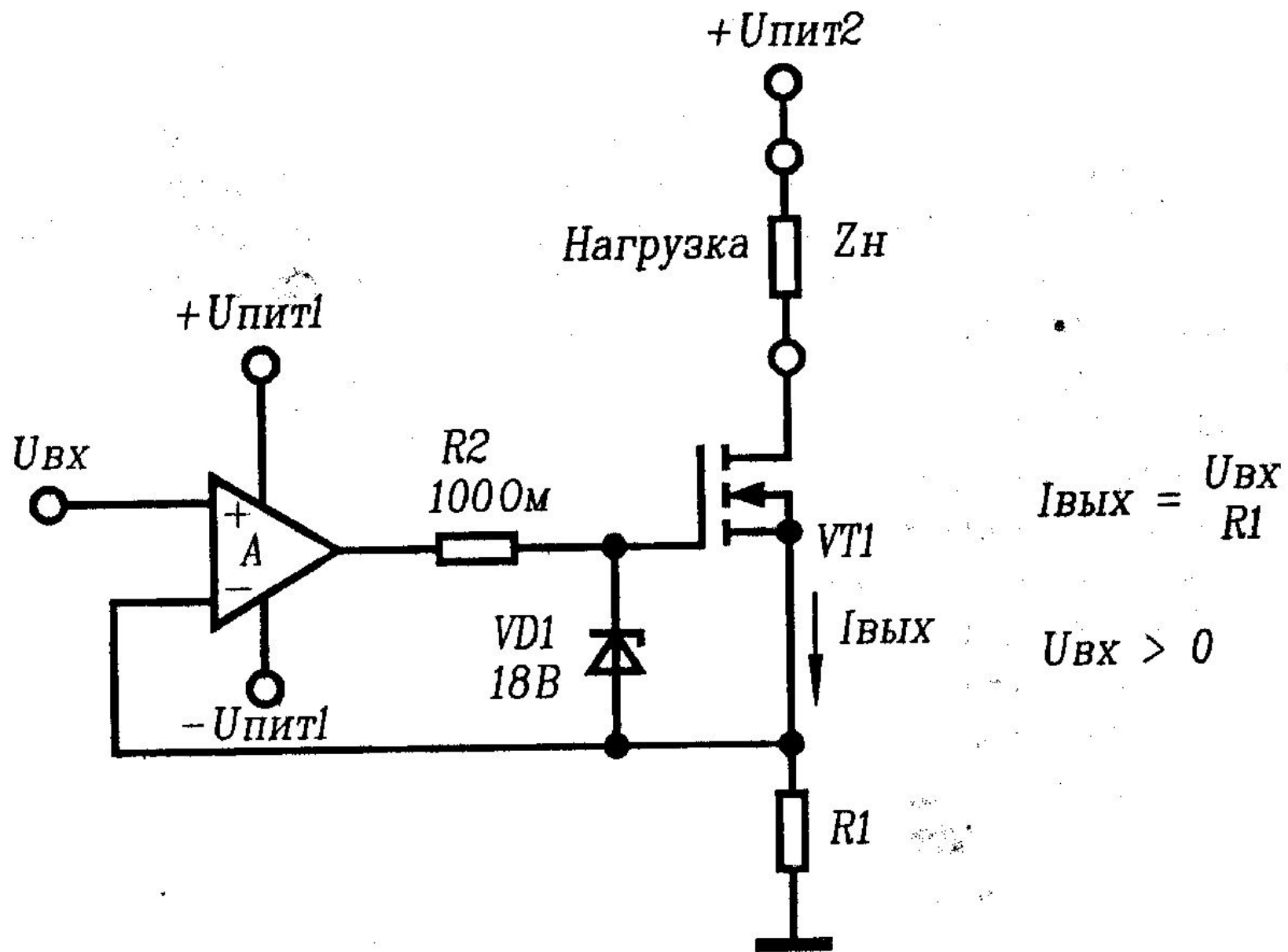
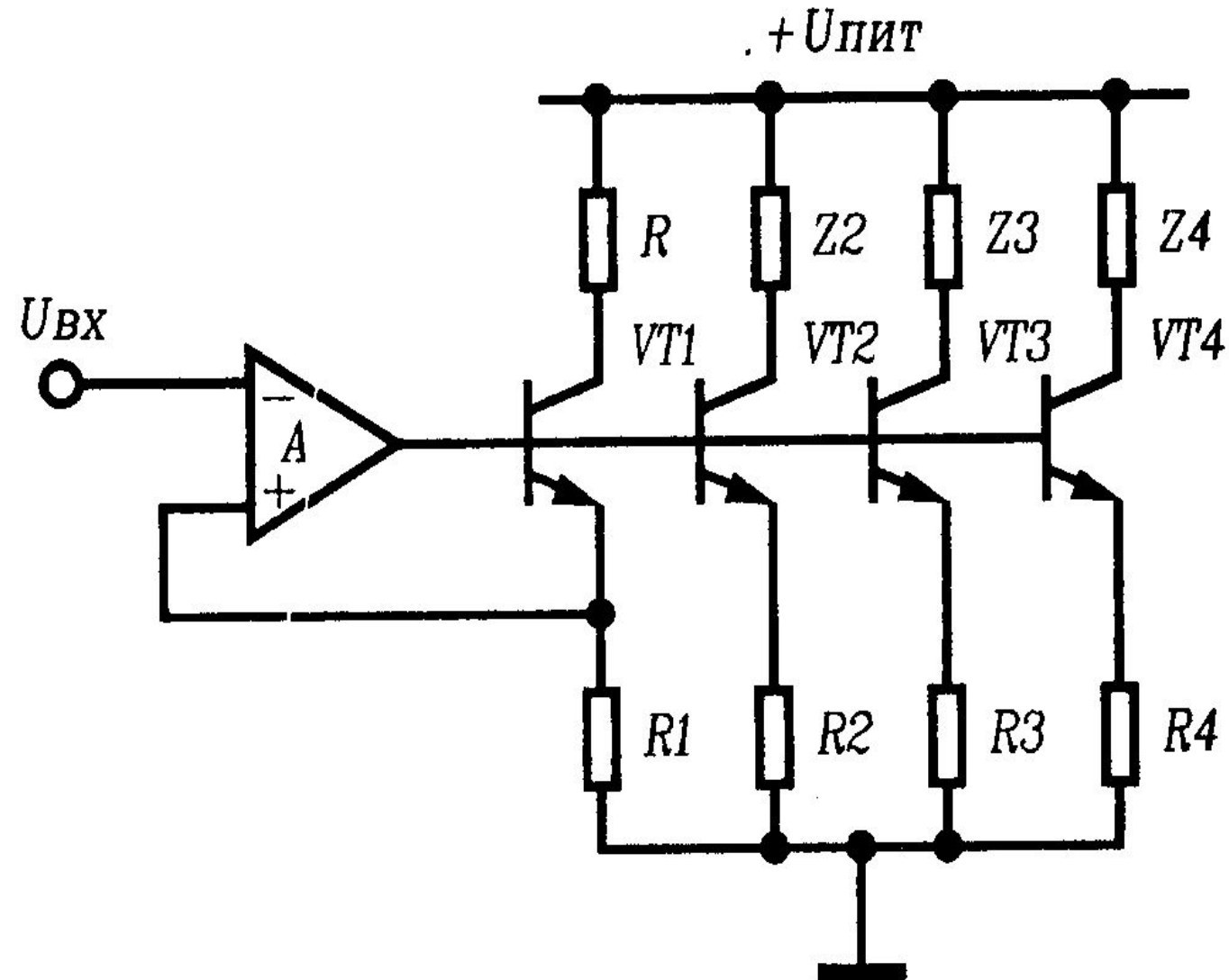


Рис. 4.13. Применение МОП-транзистора в источнике тока.

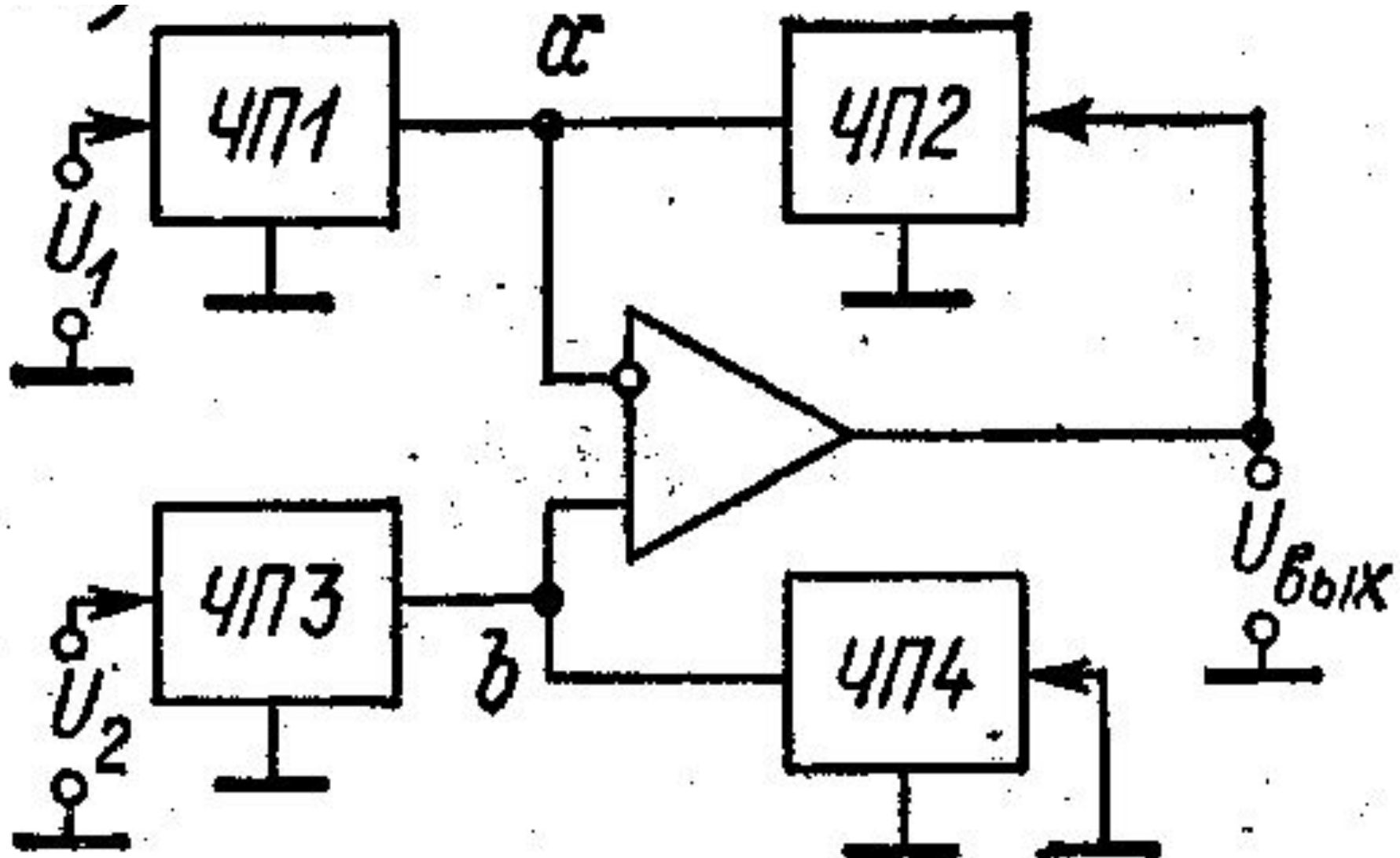
# Подключение нескольких нагрузок с помощью согласованных транзисторов



### 3.3 Операционные преобразователи

- Под **операционным преобразователем** понимают устройство, передаточная функция которого определяется отношением двух операторных иммитансов (сопротивлений или проводимостей).
- В общем случае операционными преобразователями называют такие линейные преобразователи, **передаточная функция которых** для каждого из входных сигналов **представляет собой отношение двух операторных полиномов**

# Структурная схема операционного преобразователя



**Для  
каждого 4-  
полюсник**

**а**

$$\begin{cases} U_1 = A \cdot U_2 + B \cdot I_2; \\ I_1 = C \cdot U_2 + D \cdot I_2 \end{cases}$$

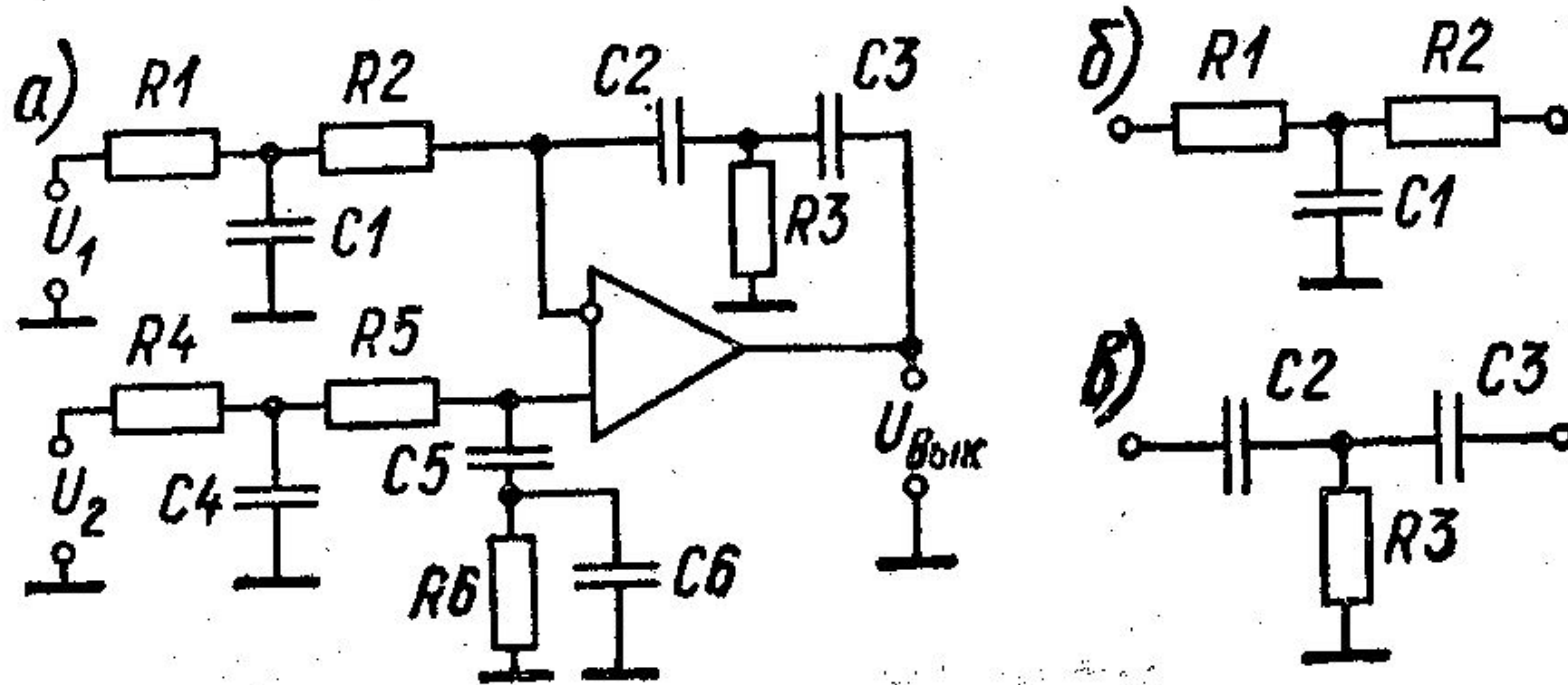
$$W_1(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_1(p)} = -\frac{B_2}{B_1};$$

$$W_2(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_2(p)} =$$

**Если 1, то  
 $W_2(p) = -W_1(p)$**

$$= \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{A_1 + B_1 \cdot A_2 / B_2}{A_3 + B_3 \cdot A_4 / B_4}.$$

## Схема преобразователя с двойным интегрированием



2. Схемы преобразователя, выполняющего двойное интегрирование (а), и используемых в нем трехполюсников (б и в)



$$W_1(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_1(p)} = \frac{1}{p^2 C_2 C_3 (R_1 + R_2) R_3} \times$$

$$\times \frac{1 + p(C_2 + C_3)R_3}{1 + pC_1 R_1 R_2 / (R_1 + R_2)}$$

$$\text{Если: } (C_2 + C_3) \cdot R_3 = \frac{C_1 \cdot R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

$$W_1(p) = \frac{1}{p^2 C_2 C_3 (R_1 + R_2) R_3}$$

**Если \_выбрать**

$$C_1 = C, C_2 = C_3 = \frac{C}{2},$$

**$R_3 = R, R_1 = R_2 = 2 \cdot R$ , то :**

$$W_1(p) = -\frac{1}{p^2 \cdot C^2 \cdot R^2}$$

## 3.4 Активные фильтры

**Активными называют фильтры, состоящие из резисторов, конденсаторов и активных элементов, например усилителей.**

- Основная идея их создания в том, чтобы **построить фильтры без катушек индуктивностей** (которые громоздки), но несмотря на это **обладающие хорошей избирательностью.**
- Последнего удастся достигнуть **благодаря компенсации потерь энергии в резисторах фильтра с помощью активных элементов - чаще усилителей, охваченных ОС.**

# По полосе рабочих частот фильтры разделяют на:

- ФНЧ;
- ФВЧ;
- полосовые;
- заградительные.

# Аппроксимация характеристик

Передаточная функция любого фильтра может быть представлена отношением двух операторных полиномов:

$$K(p) = \frac{A(p)}{B(p)}$$

**Аппроксимация характеристики** любого фильтра сводится к **выбору коэффициентов** этих полиномов, которые обеспечат наилучшее приближение в том или ином смысле к требуемым **АЧХ или ФЧХ**

**Функция  $K(p)$**  любого фильтра однозначно определяется **нулями** и **полюсами** полиномов числителя и знаменателя.

**Число полюсов** определяет **порядок** фильтра.

Фильтры, имеющие константу в числителе (нет зависимости от частоты), называются **полиномиальными**.

Для задания  
нормированный  
передачи:

АЧХ применяют  
коэффициент

$$y(x) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \Phi(x)^2}}$$

**Ф-функция  
фильтрации**

**Нормированная  
частота**

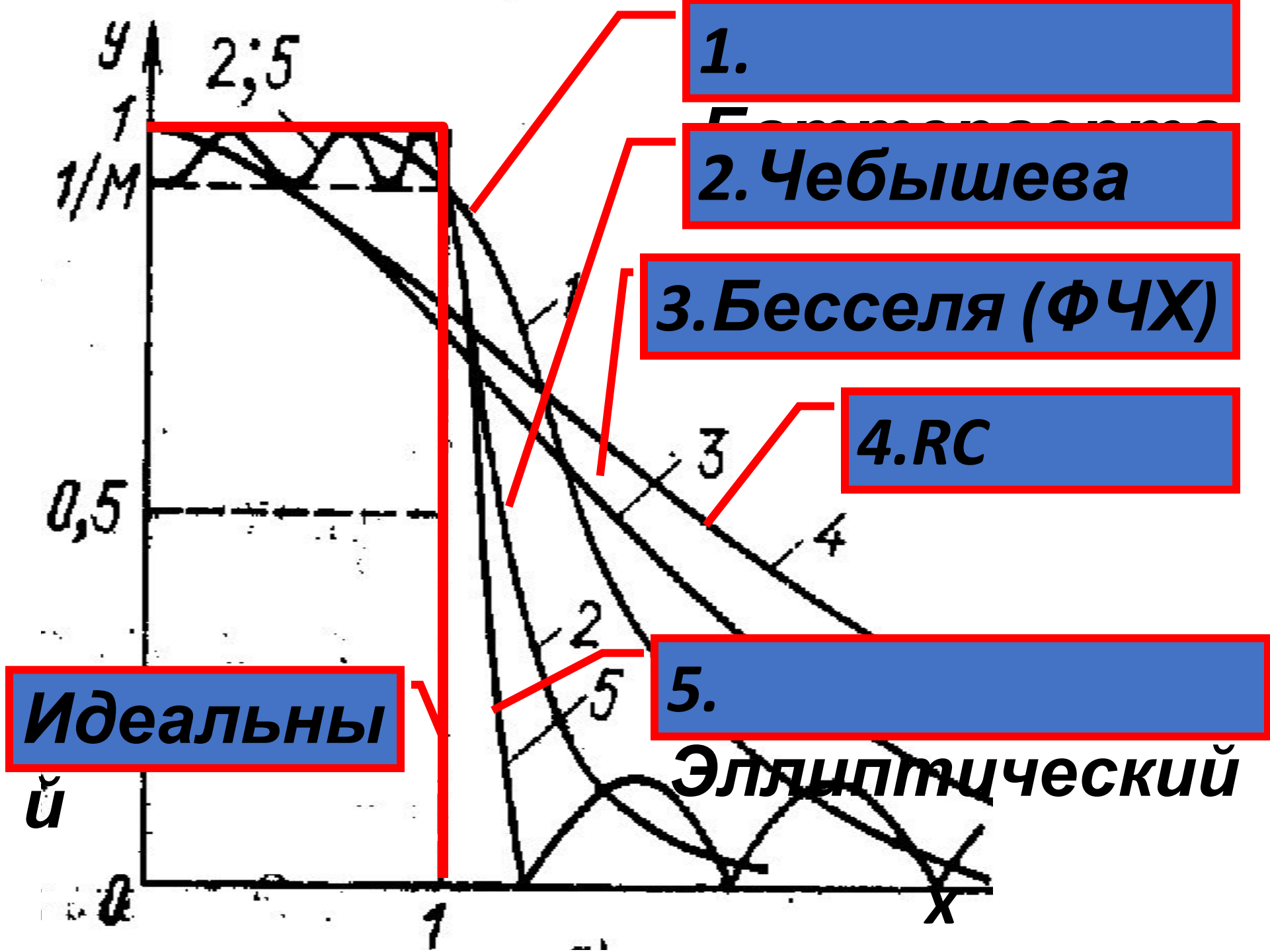
$$\varepsilon = \sqrt{M^2 - 1}$$

**Коэффициент  
частотных**



# Задачу аппроксимации решают для ФНЧ





1. Butterworth

2. Чебышева

3. Бесселя (ФЧХ)

4. RC

Идеальны

5.

Эллиптический

# Особенности фильтров

- **Баттерворта** - максимально плоская АЧХ в ПП,
- **Чебышева** - равномерные пульсации в ПП, их отсутствие в ПЗ,
- **Инверсный Чебышева** - равномерные пульсации в ПЗ, их отсутствие в ПП,
- **Эллиптический** - пульсации в ПП и ПЗ, максимально крутой переход от ПП к ПЗ,
- **Бесселя** - аппроксимация идеальной ФЧХ, отсутствие выброса на ПХ.

Для увеличения крутизны спада можно включить  $n$  таких **фильтров** **последовательно**. Передаточная функция такого фильтра имеет вид

$$K(P) = \frac{1}{(1 + \alpha P)^n}.$$

Коэффициент  $\alpha$  учитывает тот факт, что для получения заданной частоты среза всего фильтра, каждое звено должно быть настроено на частоту среза в  $\alpha$  раз большую

$$\alpha = \sqrt[n]{\sqrt{2} - 1}.$$

Такой фильтр называют фильтром с критическим затуханием. Он имеет крутизну спада  **$20n$  дБ/дек.**

При его практической реализации необходимо ставить буферы (разделяющие усилители с высоким входным и малым выходным сопротивлениями), иначе каждое последующее звено будет сильно нагружать предыдущее, нарушая его нормальную работу.

Передаточная функция ФНЧ в общем виде может быть записана как

$$K(P) = \frac{K_0}{1 + c_1P + c_2P^2 + \dots + c_nP^n},$$

где  $c_1, \dots, c_n$  – *положительные вещественные коэффициенты*.

Порядок фильтра  $n$  обуславливает окончательный наклон АЧХ –  **$20n$  дБ/дек**. Однако в полосе пропускания и вблизи частоты среза поведение фильтра существенно зависит от коэффициентов  $c_1, \dots, c_n$ .

В настоящее время разработано несколько различных типов фильтров, оптимальных с точки зрения различных критериев:

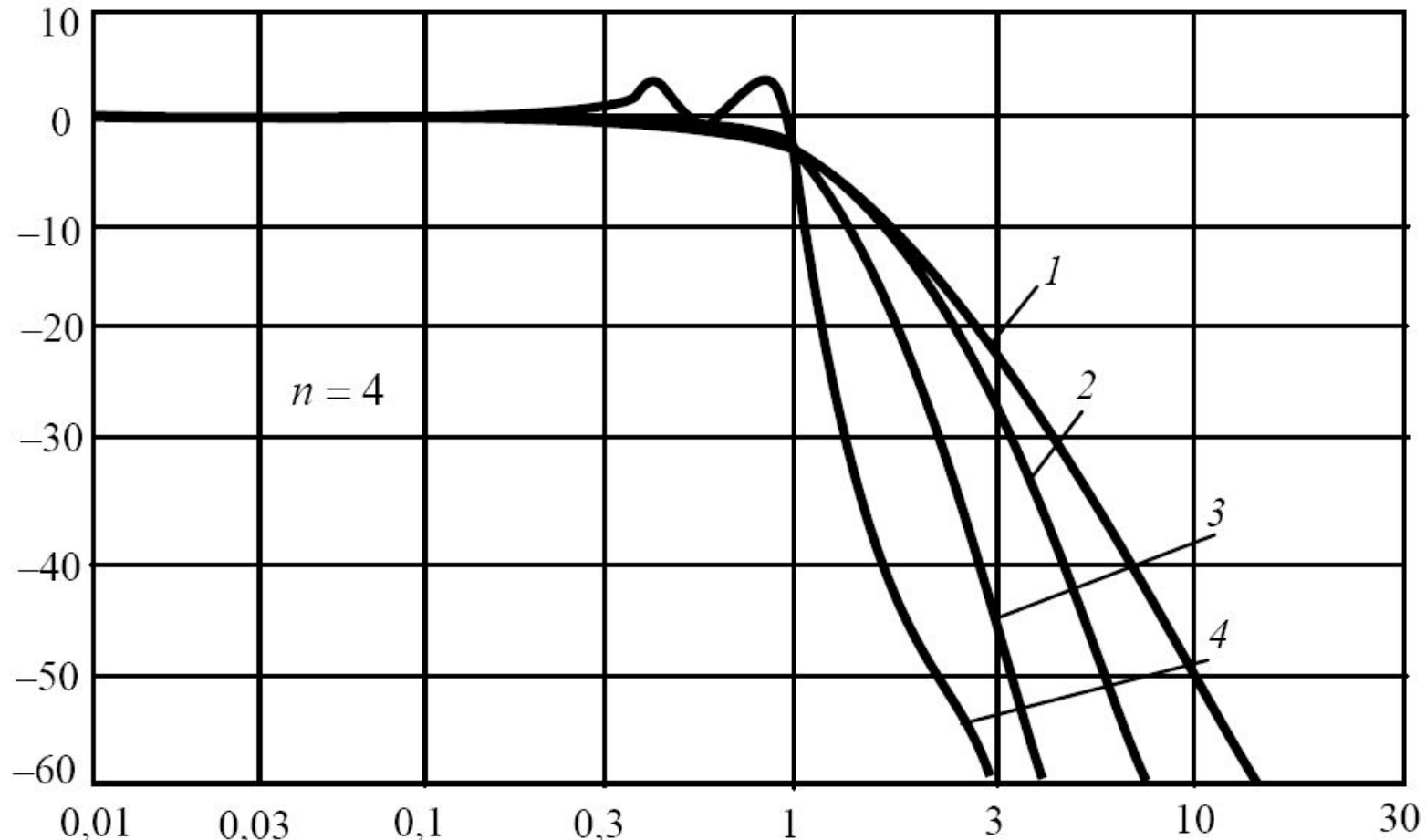
1. Фильтр **Баттерворта** – это фильтр с максимально плоской характеристикой в полосе пропускания.
2. Фильтр **Чебышева** – это фильтр с наибольшей крутизной спада АЧХ вблизи  $\omega_c$ .
3. Фильтр **Бесселя** – это фильтр с наилучшей формой ФЧХ в полосе пропускания, а значит, с наименьшими искажениями формы сигналов в этой полосе частот.

Математически все эти фильтры отличаются разным набором коэффициентов  $c_1, c_2, c_3, c_4$ , которые берутся из тщательно разработанных таблиц для каждого порядка  $n$  и каждого типа фильтра.

$$K(P) = \frac{K_0}{(1 + a_1P + b_1P^2)(1 + a_2P + b_2P^2) \dots},$$

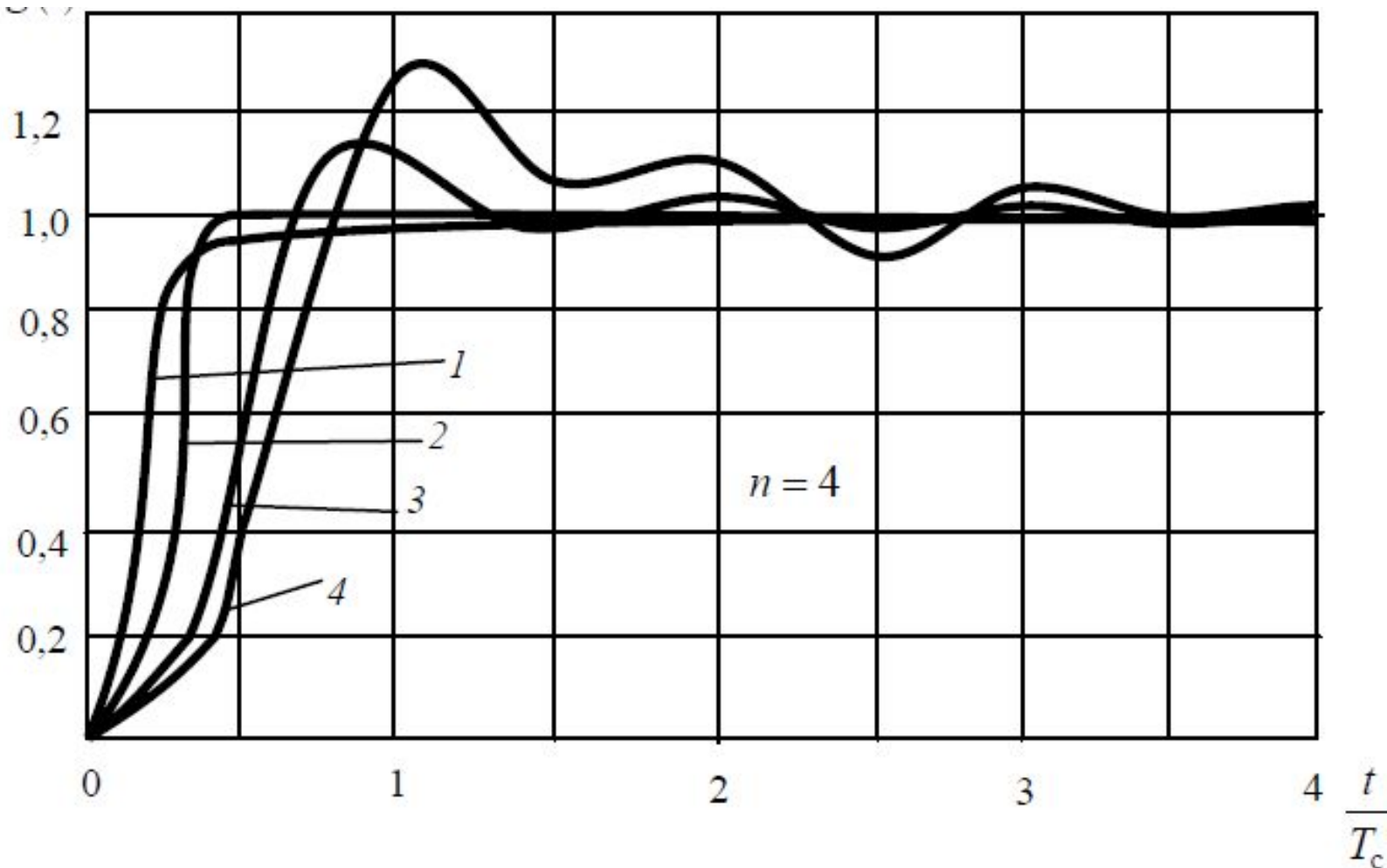
где  $a_i, b_i$  – положительные вещественные коэффициенты. Для нечётных порядков фильтра коэффициент  $b_1$  равен нулю.

$|K(j\Omega)|$ , дБ



1 – фильтр с критическим затуханием; 2 – фильтр Бесселя;  
3 – фильтр Баттерворта; 4 – фильтр Чебышева с неравномерностью 3 дБ;  
 $T_c = 2\pi / \omega_c$

# ПХ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ n-порядка



1 – фильтр с критическим затуханием; 2 – фильтр Бесселя;  
3 – фильтр Баттерворта; 4 – фильтр Чебышева с неравномерностью 3 дБ;  
 $T_c = 2\pi / \omega_c$



Для полиномиальных фильтров нормированную АЧХ представляют произведением множителей **первого** и **второго** порядков:

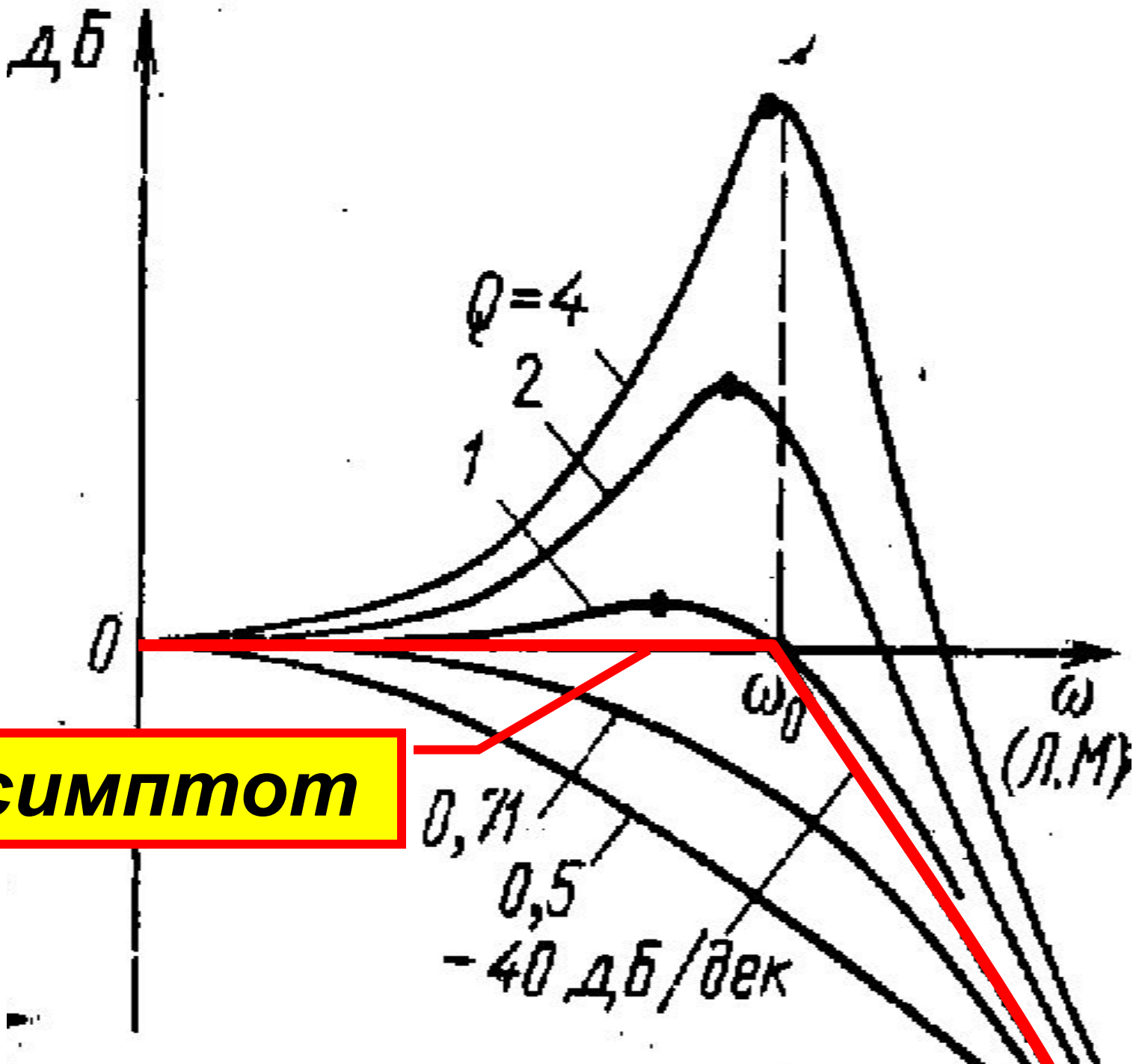
$$y_1(p) = a / (p + a), \quad y_2(p) = c / (p^2 + bp + c).$$

Нормированная передаточная  
функция звена ФНЧ **второго**  
порядка:

$$y(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + \frac{\omega_0}{Q}p + \omega_0^2} = \frac{1}{\frac{p^2}{\omega_0^2} + \frac{1}{Q\omega_0}p + 1},$$

$$y(\omega) = \omega_0^2 / \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 \omega_0^2 / Q^2}.$$

$$\omega^* = \omega_0 \sqrt{1 - 1/2Q^2}, \quad y_m = Q / \sqrt{1 - 1/4Q^2}.$$



**Асимптот**

**ы**

## Переход к ФВЧ

$$\omega \rightarrow \frac{1}{\omega}, \omega_0 \rightarrow \frac{1}{\omega_0}, p \rightarrow \frac{1}{p}$$

$$y(p) = p^2 / \left( p^2 + \frac{\omega_0}{Q} p + \omega_0^2 \right).$$

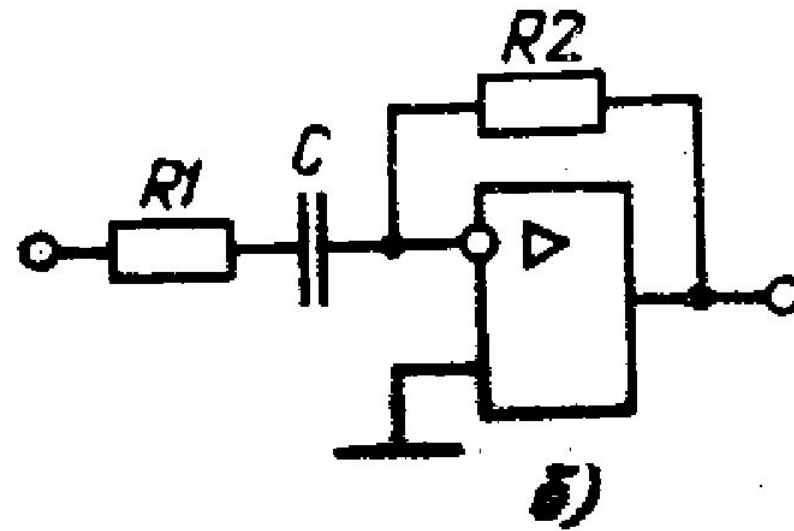
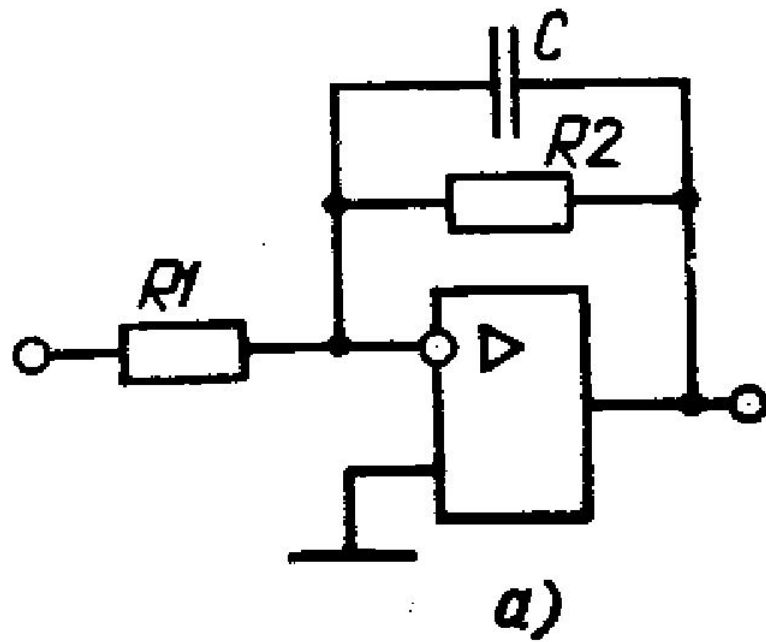
Графики ЛАЧХ по форме совпадают, их необходимо **повернуть на 180°** вокруг вертикальной оси, т.е. изменить направление отсчета частоты.

# Звенья активных фильтров каскадного типа на усилителях с ОС

- Фильтры каскадного типа создаются путем последовательного соединения **базовых звеньев** первого и второго порядка.

- Звенья обычно строят на основе **ОУ**. Последние имеют большое входное сопротивление и малое выходное, а поэтому одновременно **обеспечивают хорошую развязку звеньев**, исключая их взаимовлияние.
- **Каскадный метод реализации применяется чаще других.** Он обеспечивает простоту расчета, практического осуществления и настройки.

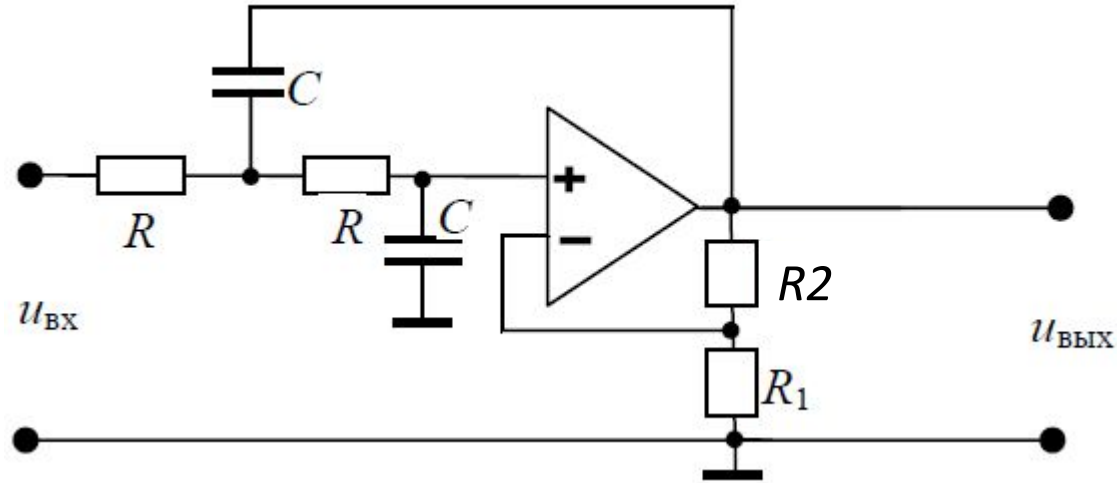
# Звенья ФНЧ и ФВЧ первого порядка



**Звено второго порядка на  
усилителе с конечным  $K$   
(фильтр *Sallen-Key*)**



## Схема ФНЧ 2-порядка Саллена-Кея



$$K(P) = \frac{\alpha}{1 + \omega_c RC(3 - \alpha) P + (\omega_c RC)^2 P^2}.$$

$$\alpha = 1 + \frac{R2}{R1}, R2 = (\alpha - 1)R1.$$

Изменяя всего один параметр  $\alpha$ , можно настроить схему на любой из вышеперечисленных типов фильтра. Все необходимые данные для такой настройки приведены ниже в табл. 4.

## Настройка схемы ФНЧ 2-порядка Саллена-Кея

Тип фильтра	$a$	$b$	$\alpha$	Нормировочный коэффициент частоты, $f_H = \frac{1}{\sqrt{b}}$
С критическим затуханием	1,287	0,414	1	1,56
Бесселя	1,362	0,618	1,268	1,27
Баттерворта	1,414	1,000	1,586	1
Чебышева 0,5 дБ	1,361	1,383	1,842	0,85
Чебышева 2 дБ	1,181	1,778	2,114	0,74

Для реализации выбранного типа фильтра нужно:

- 1) осуществить указанное в таблице значение  $\alpha$ ;
- 2) обеспечить необходимую постоянную времени фильтра  $RC$ .

$$\alpha = 1 + \frac{R2}{R1}$$

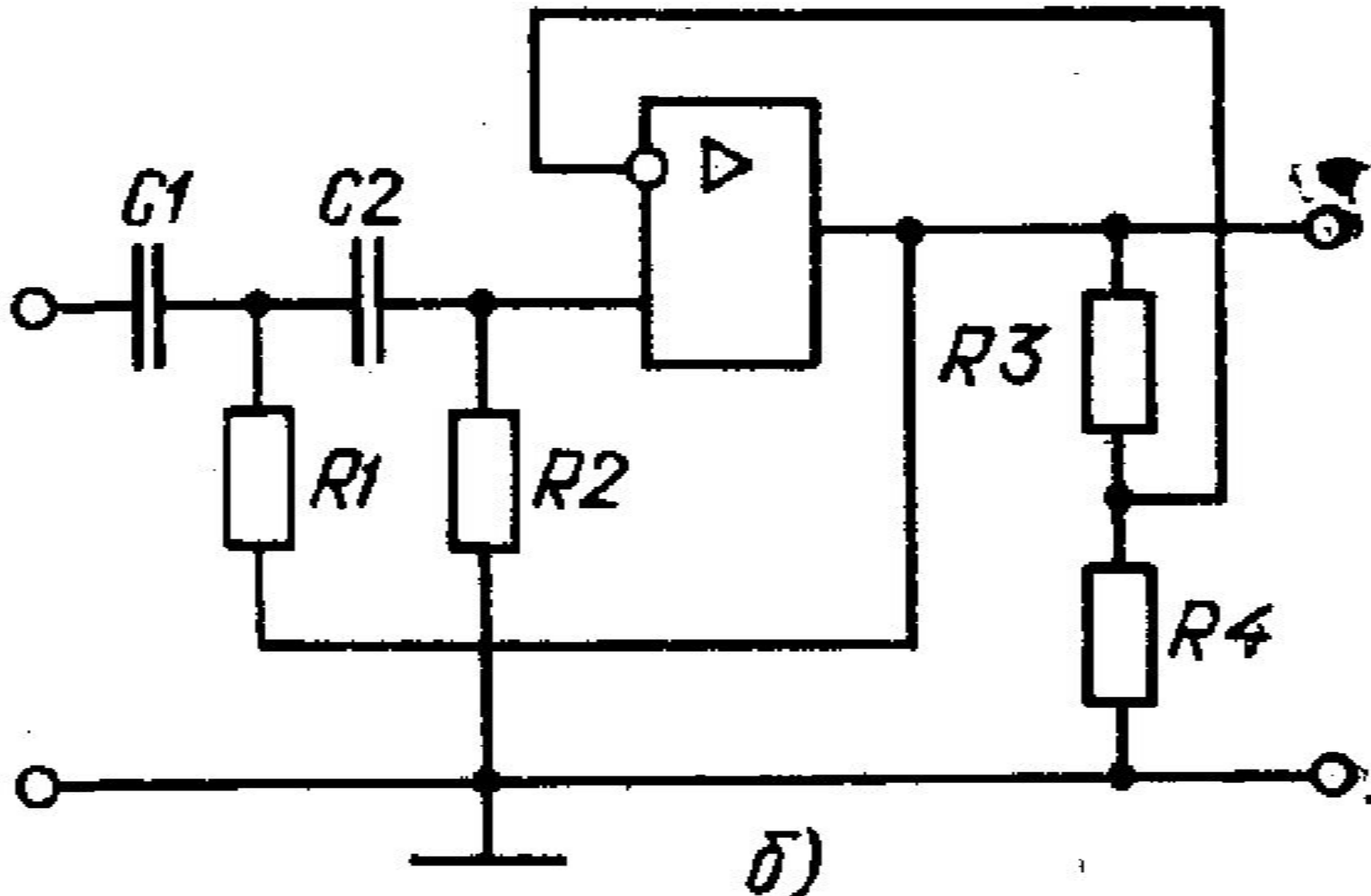
$$RC = \frac{\sqrt{b}}{2\pi \cdot f_C} = \frac{1}{2\pi \cdot f_H \cdot f_C}$$

**Замечание:**

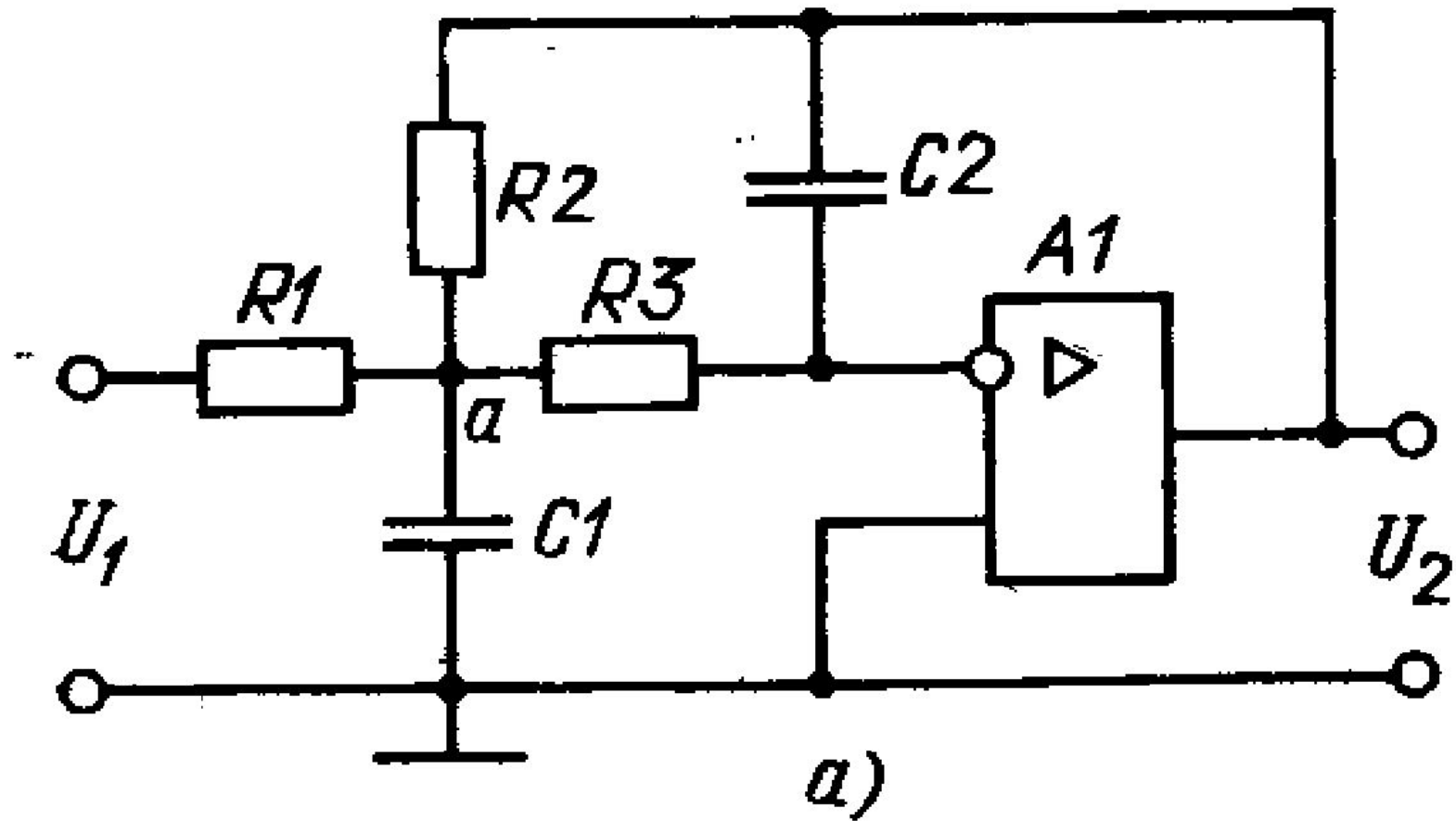
При  $\alpha = 3$  схема работает в режиме генератора с частотой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot RC}$$

# Звено ФВЧ (фильтр Sallen-Key)



Звено ФНЧ второго порядка на усилителе с неограниченным К (звено с многопетлевой ОС - фильтр Рауха)



$$W(p) = \frac{R2 / R1}{1 + p \cdot C2(R2 + R3 + R2 \cdot \frac{R3}{R1}) + p^2 \cdot C1 \cdot C2 \cdot R2 \cdot R3}$$

# Р1. Тема 4. Схемы нелинейного преобразования на ОУ

*«СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ 2»*

*© Школа Н.Ф.*

***Лекция №5+ 2017 г.***

## 4.1. Аналоговые перемножители

**Аналоговыми перемножителями напряжений** называют схемы (интегральные микросхемы), предназначенные для выполнения операции перемножения двух сигналов и выдачи результата перемножения в форме напряжения.

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_x \cdot U_y}{U_r} = K_{\text{п}} U_x U_y$$

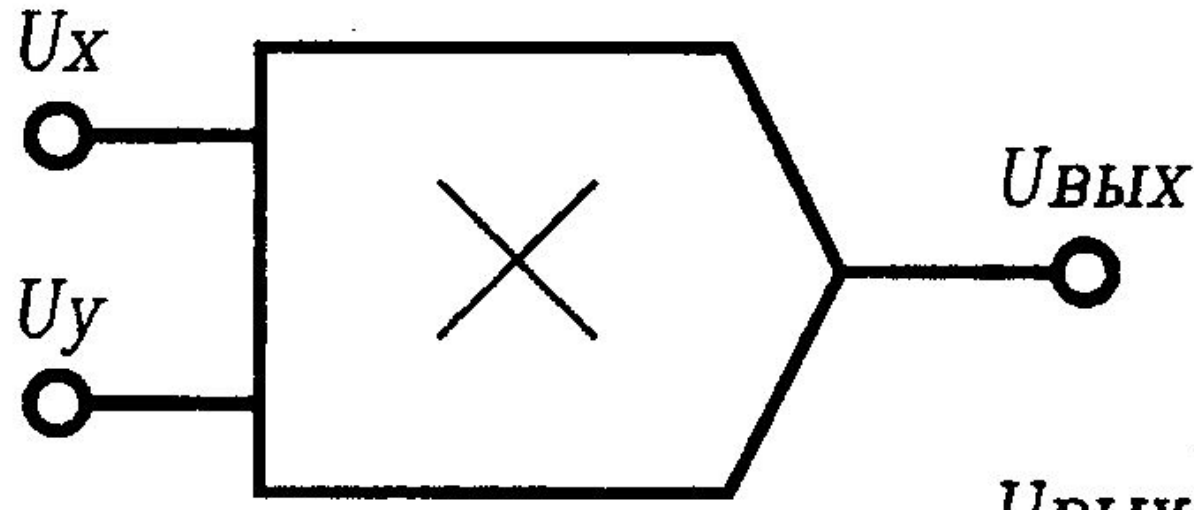
где  $U_r = K_{\text{п}}^{-1}$  — масштабирующее напряжение.

# Применение:

- СХЕМЫ для **возведения в квадрат**;
- извлечения **квадратного корня**;
- измерения **мощности**;
- **управляемые напряжением схемы**, например усилители или фильтры;
- **узлы управления амплитудой** колебаний генератора;
- **схемы определения среднеквадратичного значения** и **линеаризующие** схемы.

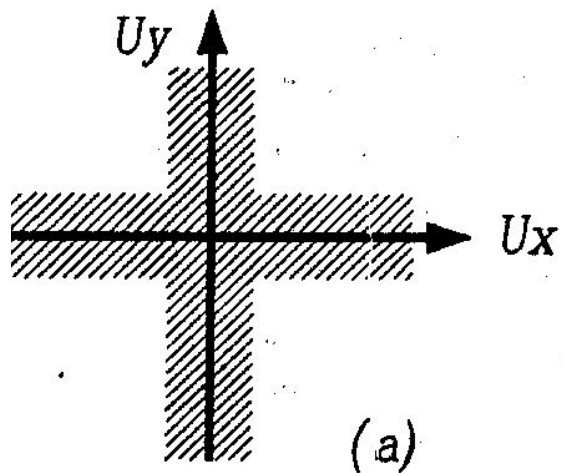


# Принцип работы и погрешности перемножителя.

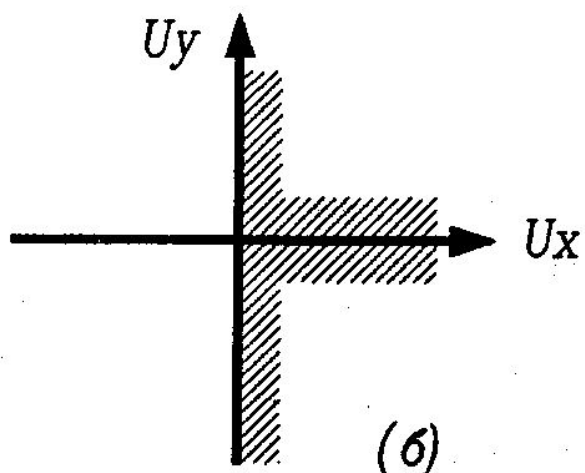


Особенностью операции перемножения является то, что **полярность выходного напряжения определяется полярностями двух входных напряжений**, каждое из которых может быть как **положительным**, так и

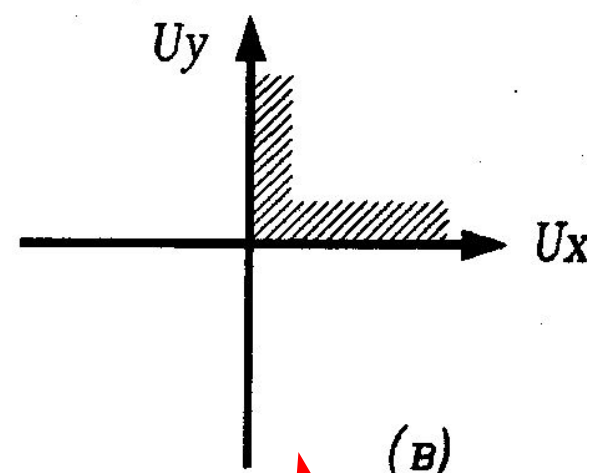
# Знак перемножаемых величин



**Четырех  
квadrантн  
ый**



**Двух  
квadrантн  
ый**



**Одно  
квadrантн  
ый**

## Погрешности реального перемножителя

- Поскольку в аналоговых перемножителях выходное напряжение зависит от двух входных напряжений, то **его характеристики могут сложным образом зависеть от этих напряжений.**
- В реальном перемножителе **выходное напряжение** оказывается пропорциональным не только **произведению входных сигналов**, но и **самим входным сигналам**, поэтому для его оценки обычно пользуются формулой:

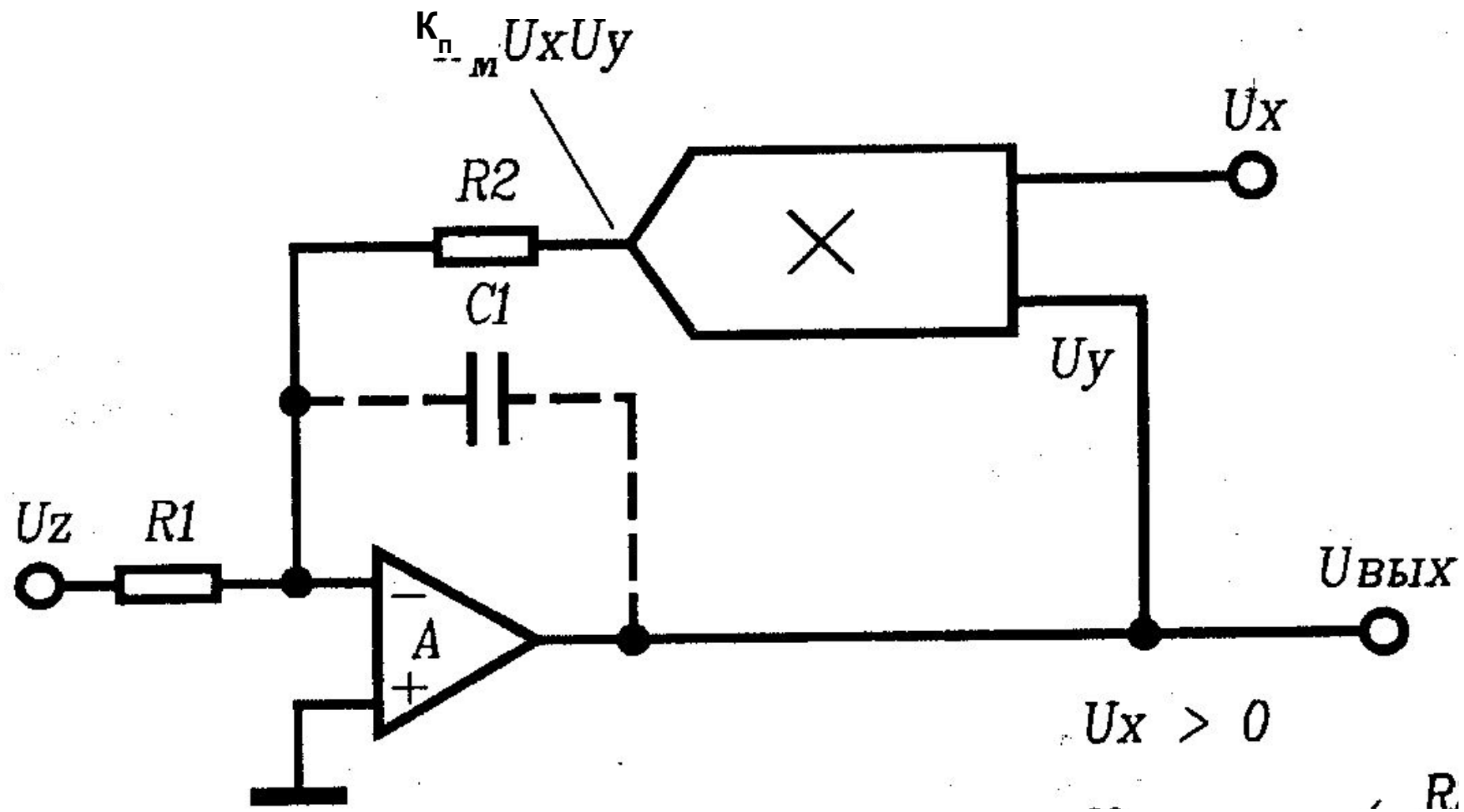
$$U_{\text{вых}} = K_{\text{п}} U_x U_y + K_x U_x + K_y U_y + K_0,$$

- где  $K_{\text{п}}$  — постоянный коэффициент передачи умножителя;
- $K_x$ ,  $K_y$  — коэффициенты, определяющие смещение, зависящее от уровня входных сигналов  $U_x$  и  $U_y$ ,
- $K_0 = U_{\text{см}}$  — смещение нулевого уровня.

Для получения высокой точности перемножения сигналов в микросхемах перемножителей вводятся по крайней мере **четыре регулировки**:

- установка требуемого коэффициента передачи  $K_p$ ;
- устранение прямого прохождения сигналов  $U_x$  и  $U_y$ ;
- регулировка смещения нулевого уровня.

# Делитель на основе перемножителя.



$$U_{oc} = K_{\pi} \cdot U_x \cdot U_y;$$

$$\beta_{сп} = \frac{U_{oc}}{U_y} = K_{\pi} \cdot U_x;$$

$$\frac{1}{\beta_{сп}} = \frac{1}{K_{\pi} \cdot U_x};$$

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{K_{\pi} \cdot U_x};$$

$$U_{вых} = -\frac{R2}{R1} \cdot \frac{1}{K_{\pi}} \cdot \frac{U_{вх}}{U_x}.$$

# Погрешности реального делителя

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \cdot \frac{1}{K_{\text{п}}} \cdot \frac{U_{\text{СМ\_ВХ}}}{U_{\text{х}}} + \frac{1}{K_{\text{п}}} \cdot \frac{U_{\text{СМ\_ВЫХ}}}{U_{\text{х}}}.$$

**При уменьшении  $U_{\text{х}}$  погрешность увеличивается!**

Для типичных значений  $R_1 = R_2$ ,  $k_{\text{м}} = 0,1 \text{ В}^{-1}$ ,  $U_{\text{СМ.ВЫХ}} = 10 \text{ мВ}$  и  $U_{\text{СМ.ВХ}} = 5 \text{ мВ}$  погрешность равна:

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{0,1 U_{\text{х}}} [(1 + 1) \cdot 5 \text{ мВ} + 10 \text{ мВ}] .$$

Например, при  $U_{\text{х}} = 0,1 \text{ В}$  погрешность составляет 2 В !



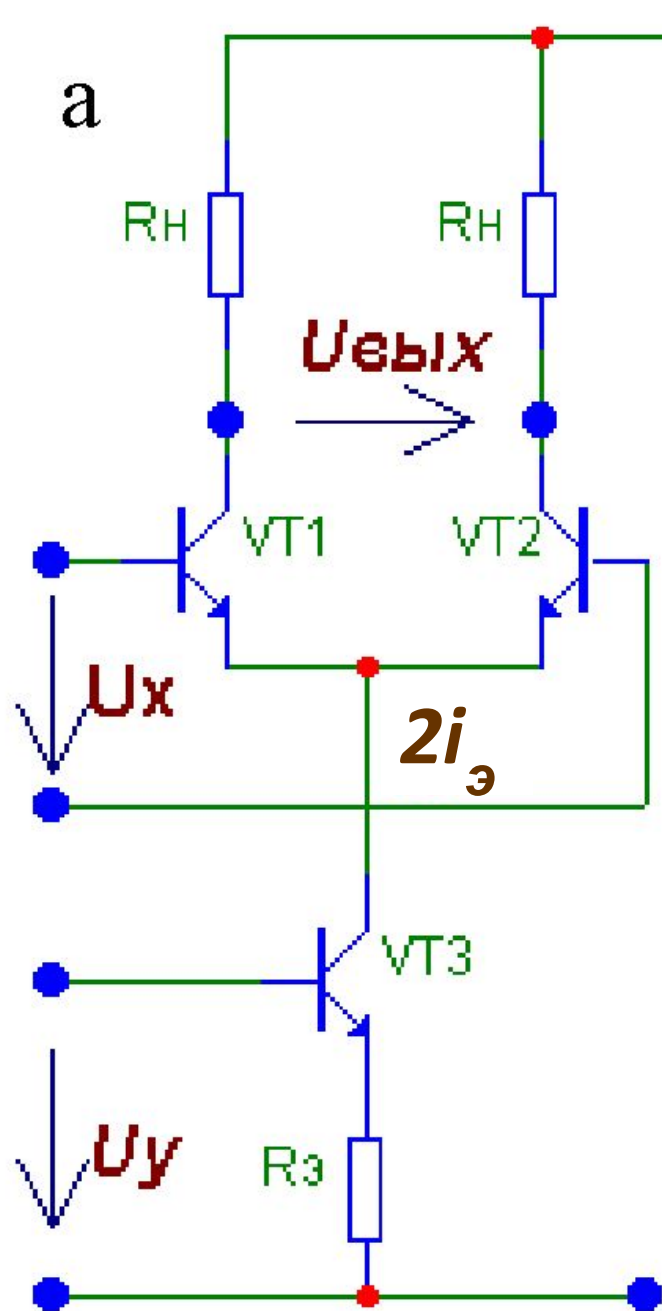
## **Основные схемы перемножителей**

- На основе **управляемого источника тока дифференциального каскада (метод переменной крутизны)**;
- с **управляемым сопротивлением канала ПТ**;
- **логарифмирующий-антилогарифмирующий**;
- **импульсный с модуляцией**;
- на основе **умножающего ЦАП**.

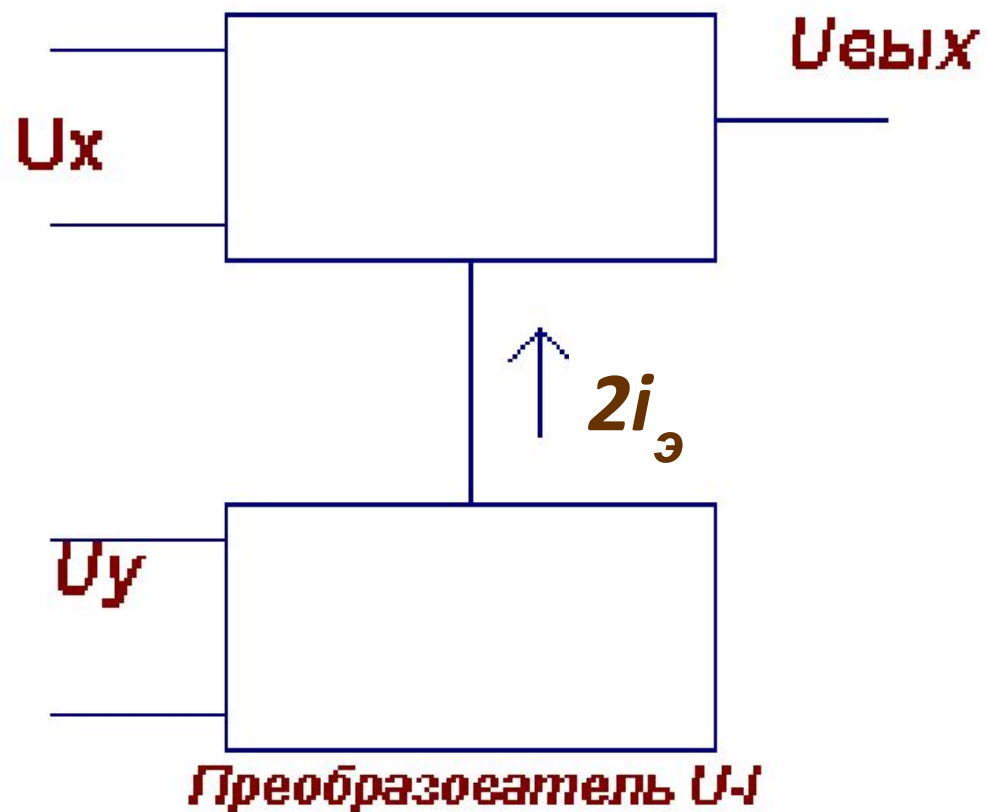
## *Схема построения перемножителей на принципе переменной крутизны*

Базовая схема перемножителя с переменной крутизной приведена на рис. а, а его упрощенная структурная схема изображена на рис. б. Этот метод основан **на зависимости крутизны биполярного транзистора от тока эмиттера.**

# Базовая схема перемножителя



б Дифференциальный каскад



Выходное напряжение дифференциального каскада пропорционально произведению крутизны  $S$  на входное напряжение  $U_x$

$$U_{\text{вых}} = S R_H U_{\text{вх}},$$

где  $R_H$  – сопротивление нагрузки.

$$S = \frac{\partial i_{\text{э}}}{\partial U_{\text{бэ}}} = \frac{i_{\text{э}}}{\varphi_T}$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{i_{\text{э}}}{\varphi_T} R_H U_x = \frac{R_H}{R_{\text{э}} \varphi_T} U_x U_y = K_n U_x U_y$$

$$K_n = \frac{R_H}{R_{\text{э}} \varphi_T}$$

Масштабирующий коэффициент  $K_n$  представляет статический параметр и его значение принято равным **0,1**

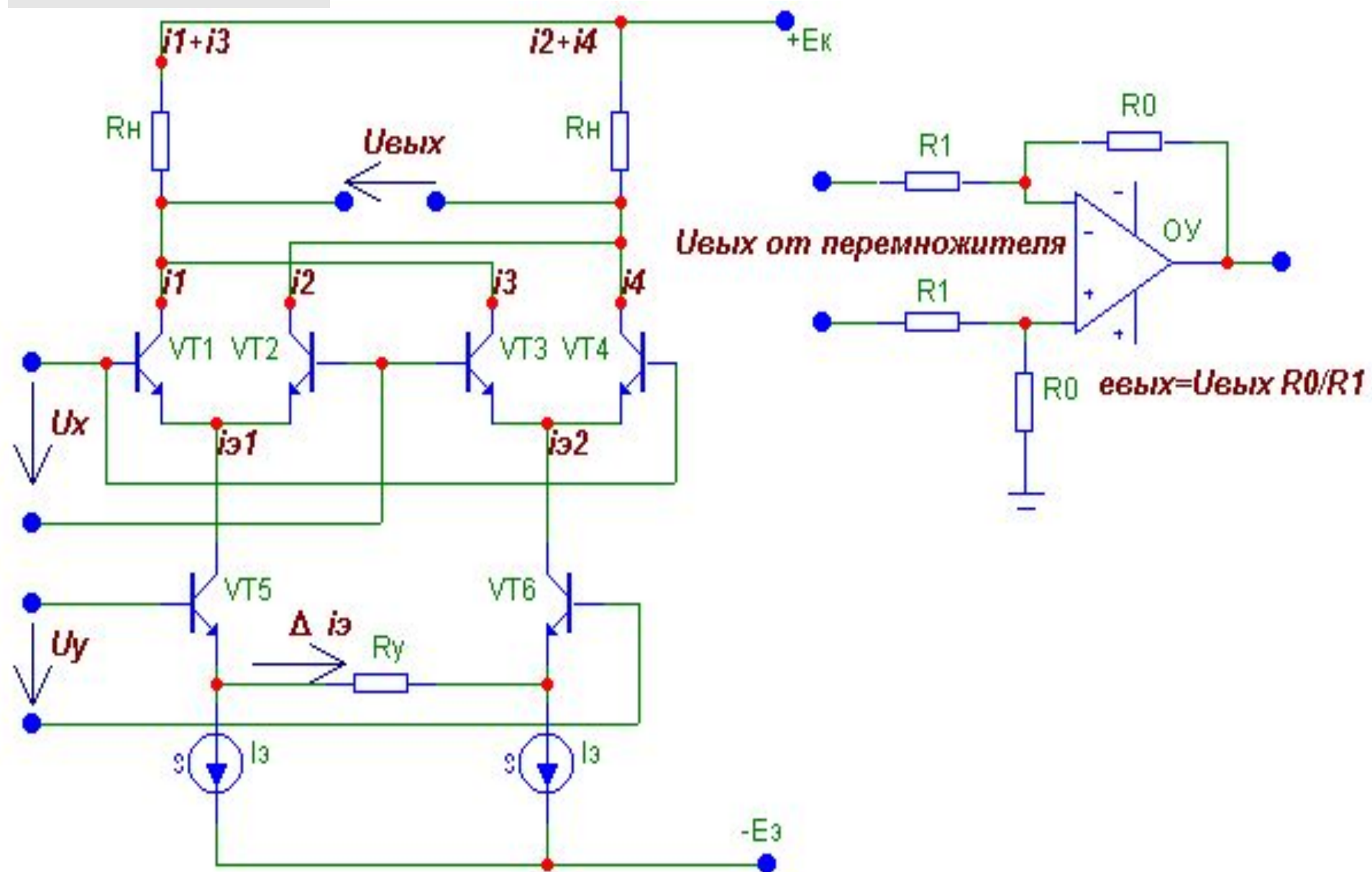
**B<sup>-1</sup>**.

## Недостатки базовой схемы:

- входной дифференциальный каскад имеет симметричный выход, **не** позволяющий **применять заземленную нагрузку**;
- преобразователь напряжения  $U_y$  в ток  $i$  имеет несимметричный вход и, следовательно, на вход  $U_y$  можно подавать сигнал только одной полярности, т. е. **преобразователь может быть только двухквadrантным**;
- входной сигнал  $U_x$  связан с коллекторным током и напряжением эмиттерного перехода экспоненциальной зависимостью, которая **вносит нелинейность, даже при очень малом уровне напряжении  $U_x$** .

## Усложненная схема перемножителя

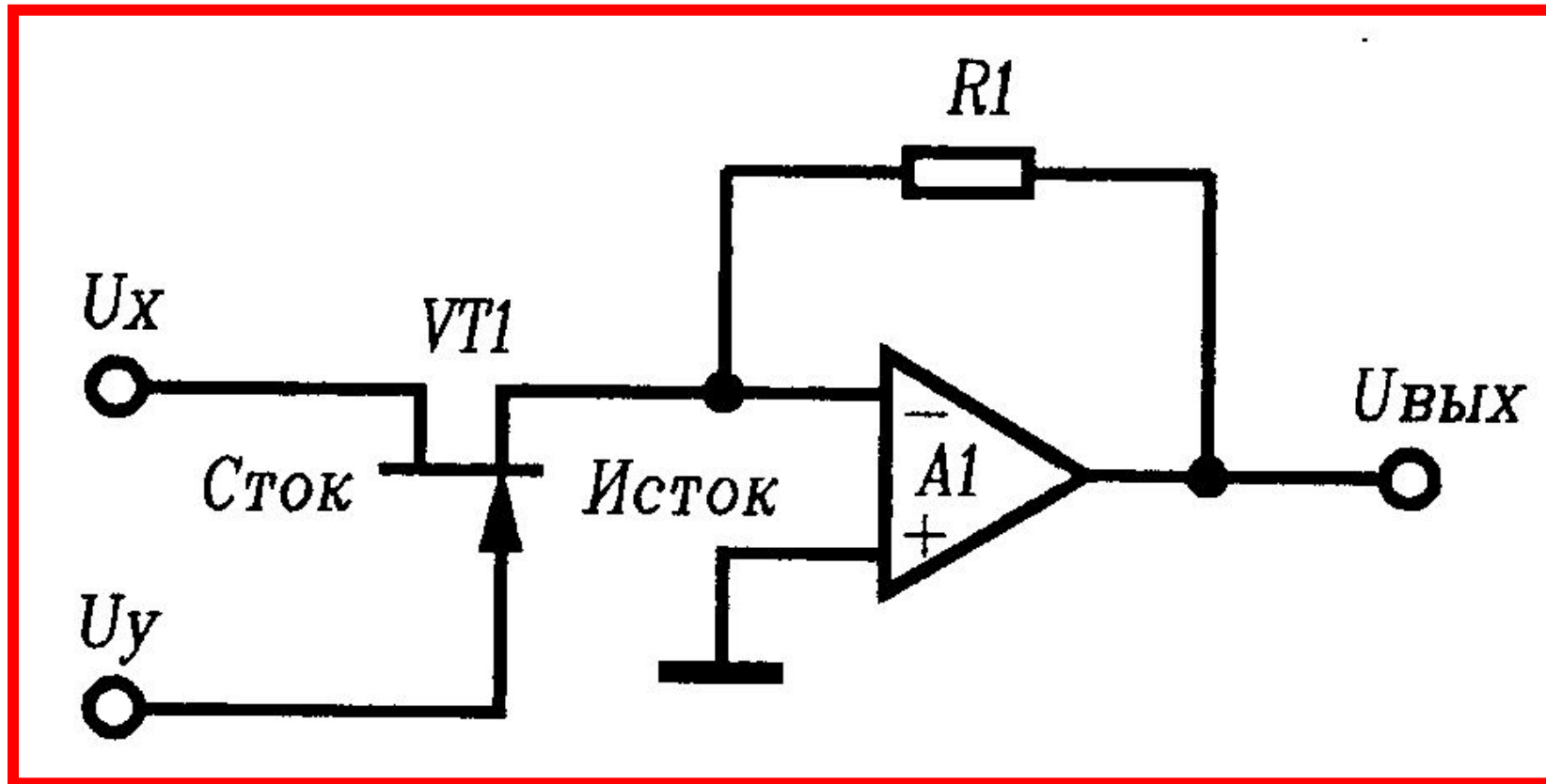
- Для создания симметричного входа по сигналу  $U_y$  базовую схему перемножителя дополняют вторым дифференциальным каскадом, входы которого включены параллельно входам первого. Коллекторные выходы второго каскада соединены перекрестно с коллекторными выходами первого каскада, как показано на рис.
- Благодаря симметричному входу сигнала  $U_y$  усовершенствованный перемножитель может работать во всех четырех квадрантах, т. е. становится **четыреквадрантным**.



Школа Н.Ф.:

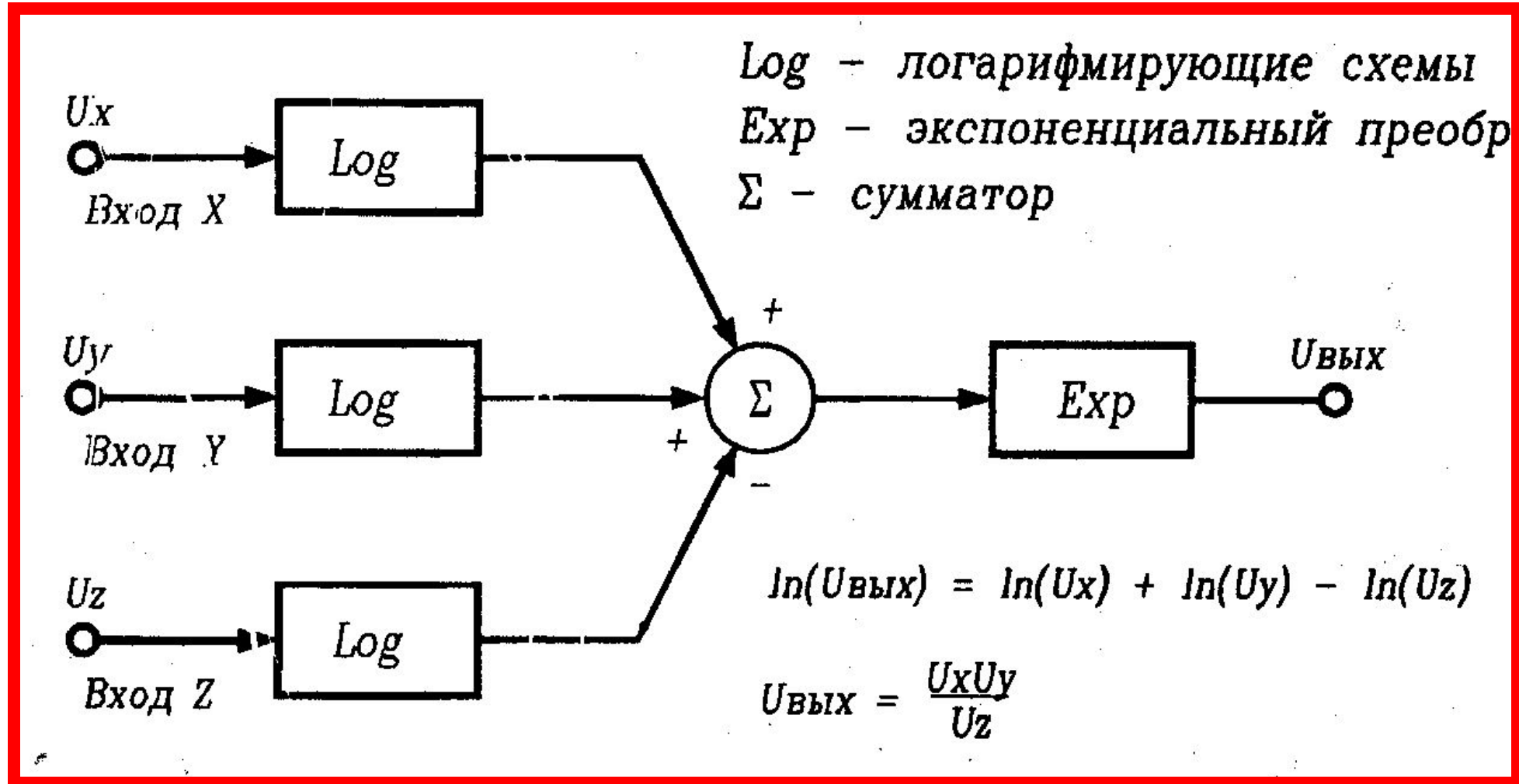
ФАКУЛЬТАТИВНО

# с управляемым сопротивлением канала ПТ





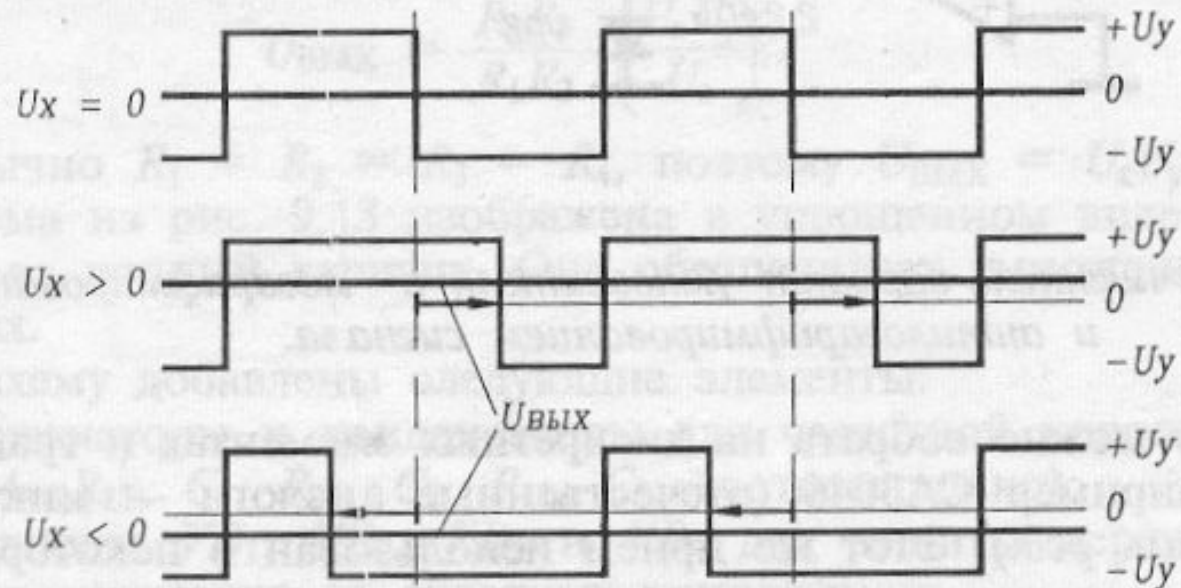
# логарифмирующий- антилогарифмирующий



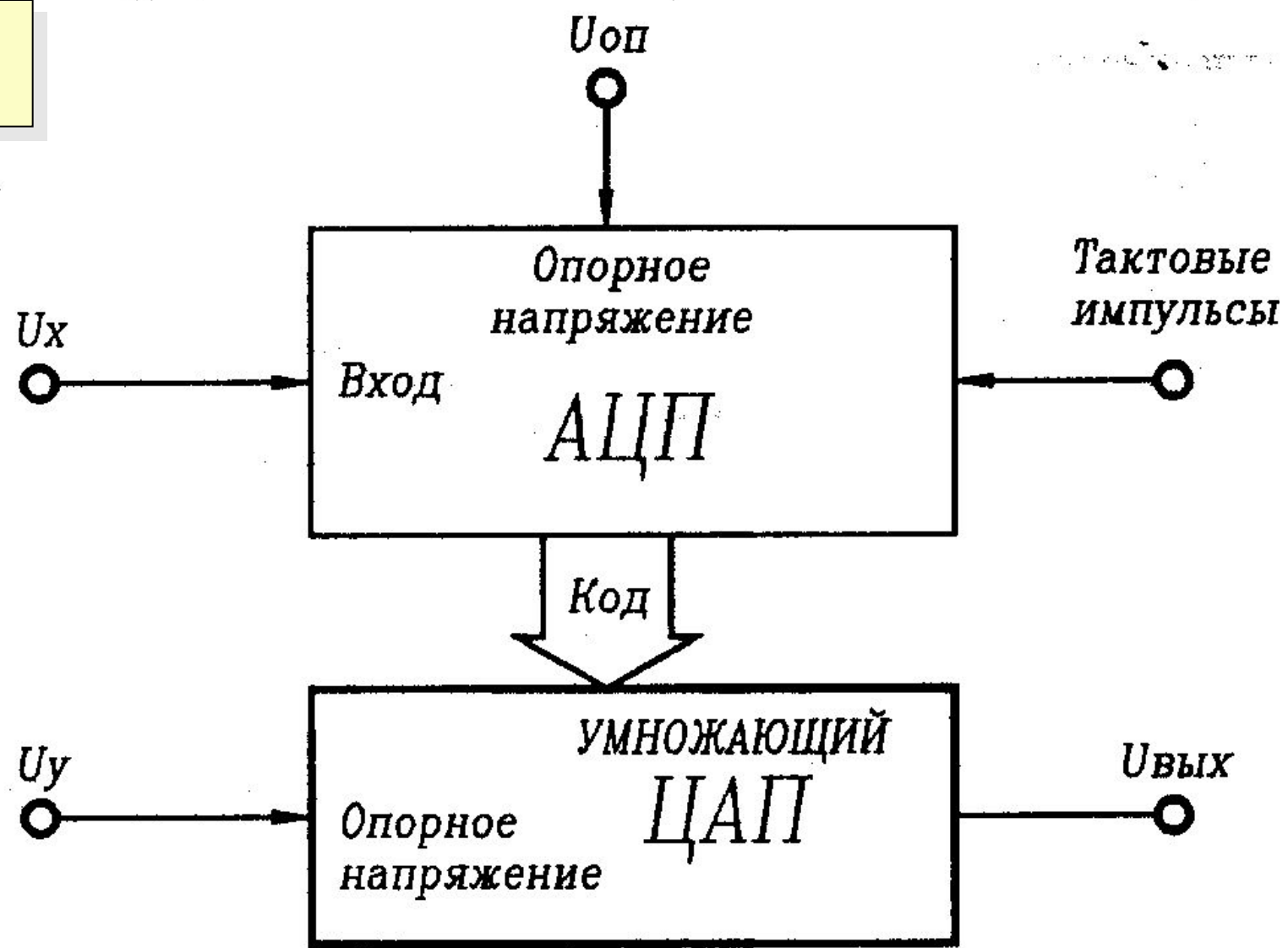
# ИМПУЛЬСНЫЙ С МОДУЛЯЦИЕЙ



Диаграммы напряжений в точке P



на  
основ  
е  
умно  
жающ  
его  
ЦАП



$$U_{вых} = \frac{U_x U_y}{U_{оп}}$$

# Параметры перемножителя

- **погрешность** перемножения (**абсолютная и относительная**), которая определяется следующими соотношениями:

$$\Delta_H = U_{\text{ВЫХ}} - (U_x U_y) / 10$$

$$\delta_H = \frac{\Delta_H}{10} 100\% = 10 \Delta_H \%$$

- **нелинейность** перемножения — максимальная разность между фактическим и теоретическим значениями выходного сигнала;

- **напряжение смещения нулевого уровня** - напряжение на выходе перемножителя при нулевом значении напряжений на входах  $U_x = U_y = 0$ ;
- **входные токи** перемножителя  $I_{вх\ x}$  и  $I_{вх\ y}$ ;
- **полоса пропускания** при малом уровне сигнала на одном из входов и постоянном напряжении — на другом;
- **максимальное значение выходного напряжения**  $U_{вых.макс}$ ;
- **максимальный выходной ток**  $I_{вых.макс}$ .

# AD534—SPECIFICATIONS (@ T<sub>A</sub> = +25°C, ±V<sub>S</sub> = 15 V, R ≥ 2 kΩ)

Model	AD534J			AD534K			AD534L			Units		
	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max			
<b>MULTIPLIER PERFORMANCE</b>												
Transfer Function	$\frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z_2$			$\frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z_2$			$\frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10 V} + Z_2$					
Total Error <sup>1</sup> (-10 V ≤ X, Y ≤ +10 V) T <sub>A</sub> = min to max			±1.0			±0.5			±0.25	%		
Total Error vs. Temperature			±0.022			±0.015			±0.008	%/°C		
Scale Factor Error (SF = 10.000 V Nominal) <sup>2</sup>			±0.25			±0.1			±0.1	%		
Temperature-Coefficient of Scaling Voltage			±0.02			±0.01			±0.005	%/°C		
Supply Rejection (±15 V ± 1 V)			±0.01			±0.01			±0.01	%		
Nonlinearity, X (X = 20 V p-p, Y = 10 V)			±0.4			±0.2			±0.10	±0.12	%	
Nonlinearity, Y (Y = 20 V p-p, X = 10 V)			±0.2			±0.1			±0.005	±0.1	%	
Feedthrough <sup>3</sup> , X (Y Nulled, X = 20 V p-p 50 Hz)			±0.3			±0.15			±0.05	±0.12	%	
Feedthrough <sup>3</sup> , Y (X Nulled, Y = 20 V p-p 50 Hz)			±0.01			±0.01			±0.003	±0.1	%	
Output Offset Voltage			±5			±2			±2	±10	mV	
Output Offset Voltage Drift			200			100			100		μV/°C	
<b>DYNAMICS</b>												
Small Signal BW (V <sub>OUT</sub> = 0.1 rms)			1			1			1		MHz	
1% Amplitude Error (C <sub>LOAD</sub> = 1000 pF)			50			50			50		kHz	
Slew Rate (V <sub>OUT</sub> 20 p-p)			20			20			20		V/μs	
Settling Time (to 1%, ΔV <sub>OUT</sub> = 20 V)			2			2			2		μs	
<b>NOISE</b>												
Noise Spectral-Density SF = 10 V			0.8			0.8			0.8		μV/√Hz	
SF = 3 V <sup>4</sup>			0.4			0.4			0.4		μV/√Hz	
Wideband Noise f = 10 Hz to 5 MHz			1			1			1		mV/rms	
f = 10 Hz to 10 kHz			90			90			90		μV/rms	
<b>OUTPUT</b>												
Output Voltage Swing			±11			±11			±11		V	
Output Impedance (f ≤ 1 kHz)			0.1			0.1			0.1		Ω	
Output Short Circuit Current (R <sub>L</sub> = 0, T <sub>A</sub> = min to max)			30			30			30		mA	
Amplifier Open Loop Gain (f = 50 Hz)			70			70			70		dB	
<b>INPUT AMPLIFIERS (X, Y and Z)<sup>5</sup></b>												
Signal Voltage Range (Diff. or CM Operating Diff.)			±10			±10			±10		V	
Offset Voltage X, Y			±5			±2			±2		mV	
Offset Voltage Drift X, Y			100			50			50		μV/°C	
Offset Voltage Z			±5			±2			±2		mV	
Offset Voltage Drift Z			200			100			100		μV/°C	
CMRR	60		80	70		90			90		dB	
Bias Current			0.8			0.8			0.8		μA	
Offset Current			0.1			0.1			0.05		0.2	μA
Differential Resistance			10			10			10		MΩ	

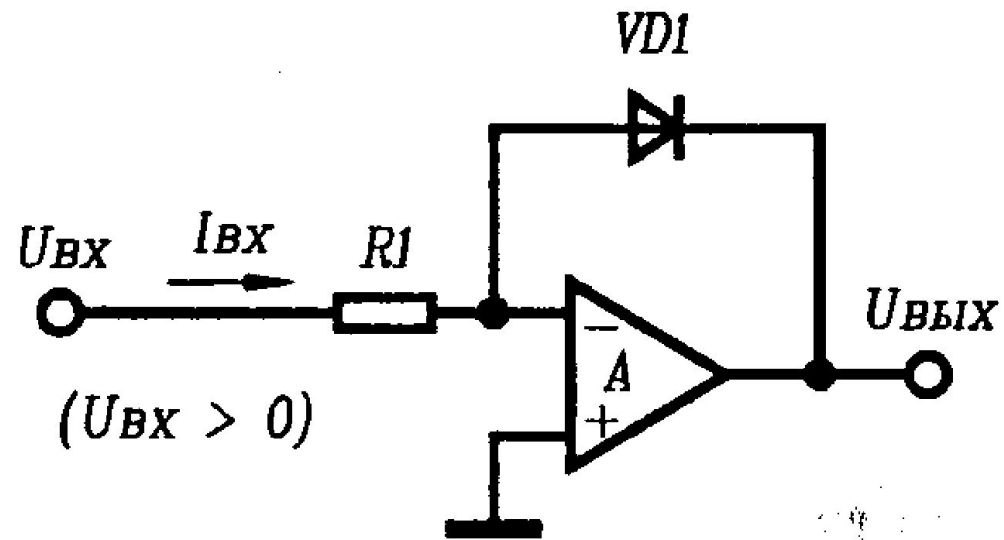
## 4.2. Функциональные преобразователи

4.2.1. Логарифмирующие и экспоненциальные преобразователи

- В логарифмирующих и экспоненциальных преобразователях для получения требуемой функциональной характеристики используются свойства смещенного в прямом направлении *рп*-перехода диода или биполярного транзистора.
- Логарифмирующие преобразователи применяются также для компрессии сигналов, имеющих большой динамический диапазон (речевых). Некоторые из устройств перекрывают диапазон входных сигналов в 7 декад.



# Логарифмирующие преобразователи



$$I = I_0 \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) ,$$

где  $I$  — ток через диод,  
 $U$  — напряжение на диоде,  
 $k$  — постоянная Больцмана,  
 $q$  — заряд электрона,  
 $I_0$  — обратный ток диода,  
 $T$  — температура в градусах Кельвина.

$$I_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/R_1 = -I_0(e^{\frac{qU_{\text{ВЫХ}}}{kT}} - 1),$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{kT}{q} \cdot \ln \left( \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 I_0} - 1 \right).$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 I_0} \right) = -\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{\text{ВХ}}}{I_0} \right).$$

## **Коэффициент передачи**

логарифмирующего преобразователя  
обычно определяется **в вольтах на декаду**  
**изменения** входного сигнала. Например:

**3-декадный** логарифмирующий  
усилитель должен работать при  
изменениях входного сигнала в диапазоне  
от 1 мВ до 1 В;

**7-декадный** логарифмирующий  
усилитель обеспечивает преобразование  
входных сигналов от 1 мкВ до 10 В.

Исключив резистор  $R1$ , можно превратить  
базовый логарифмирующий  
преобразователь в логарифмирующий

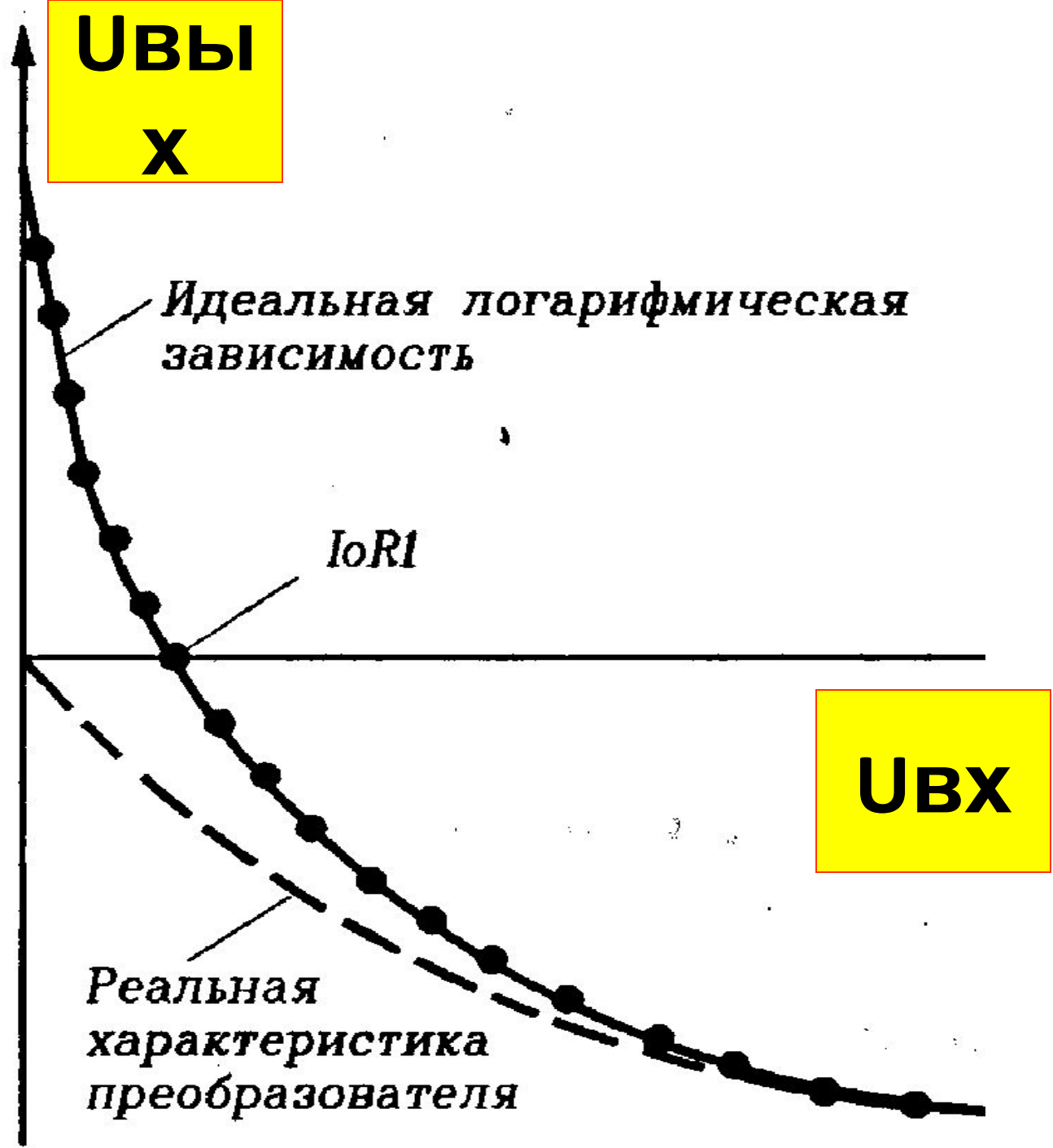
**U<sub>ВЫ</sub>**  
**X**

Идеальная логарифмическая  
зависимость

$I_0 R_l$

**U<sub>ВХ</sub>**

Реальная  
характеристика  
преобразователя



Учет объемного сопротивления диода  
приводит к соотношению

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{I_{\text{ВХ}}}{I_0} \right) - I_{\text{ВХ}} R_{\text{об}}$$

Учет погрешностей ОУ

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{\frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{СМ.ВХ}}}{R_1} - I_{\text{СМ.ВХ}}}{I_0} \right) + U_{\text{СМ.ВХ}}$$

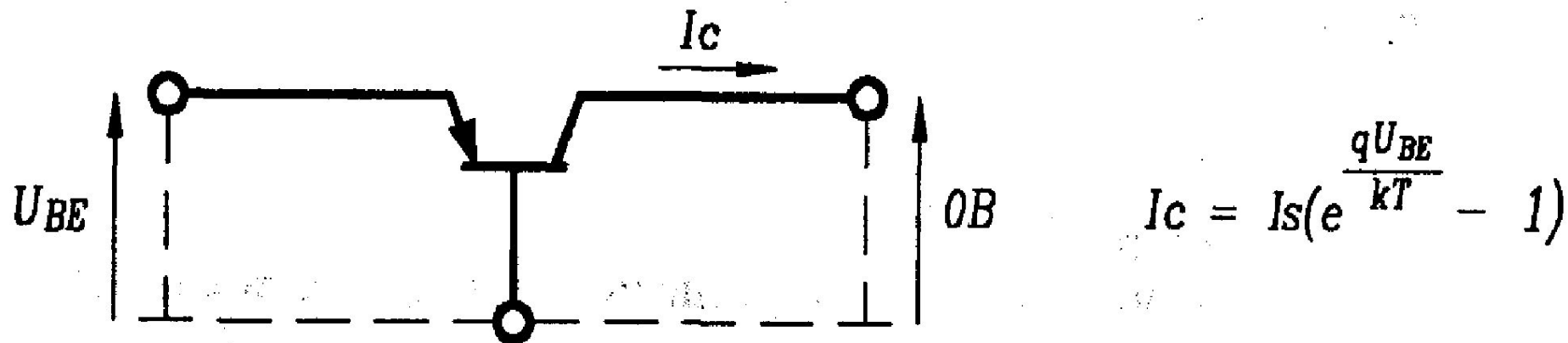
# Недостатки простейшего диодного преобразователя

- **чувствителен к температуре** (температура  $T$  входит в приведенные выше соотношения в явном виде,  $I_0$  также сильно зависит от температуры),
- **диоды не обеспечивают хорошей точности преобразования.** Построить на кремниевых диодах общего назначения логарифмирующие усилители, работающие в диапазоне более **3 декад**, практически невозможно.

# Преобразователи на биполярных транзисторах

Лучшие параметры **биполярного транзистора** обусловлены тем, что проводимость транзистора определяется **основными носителями** (электронами или дырками), а проводимость диода обеспечивают и электроны, и дырки.

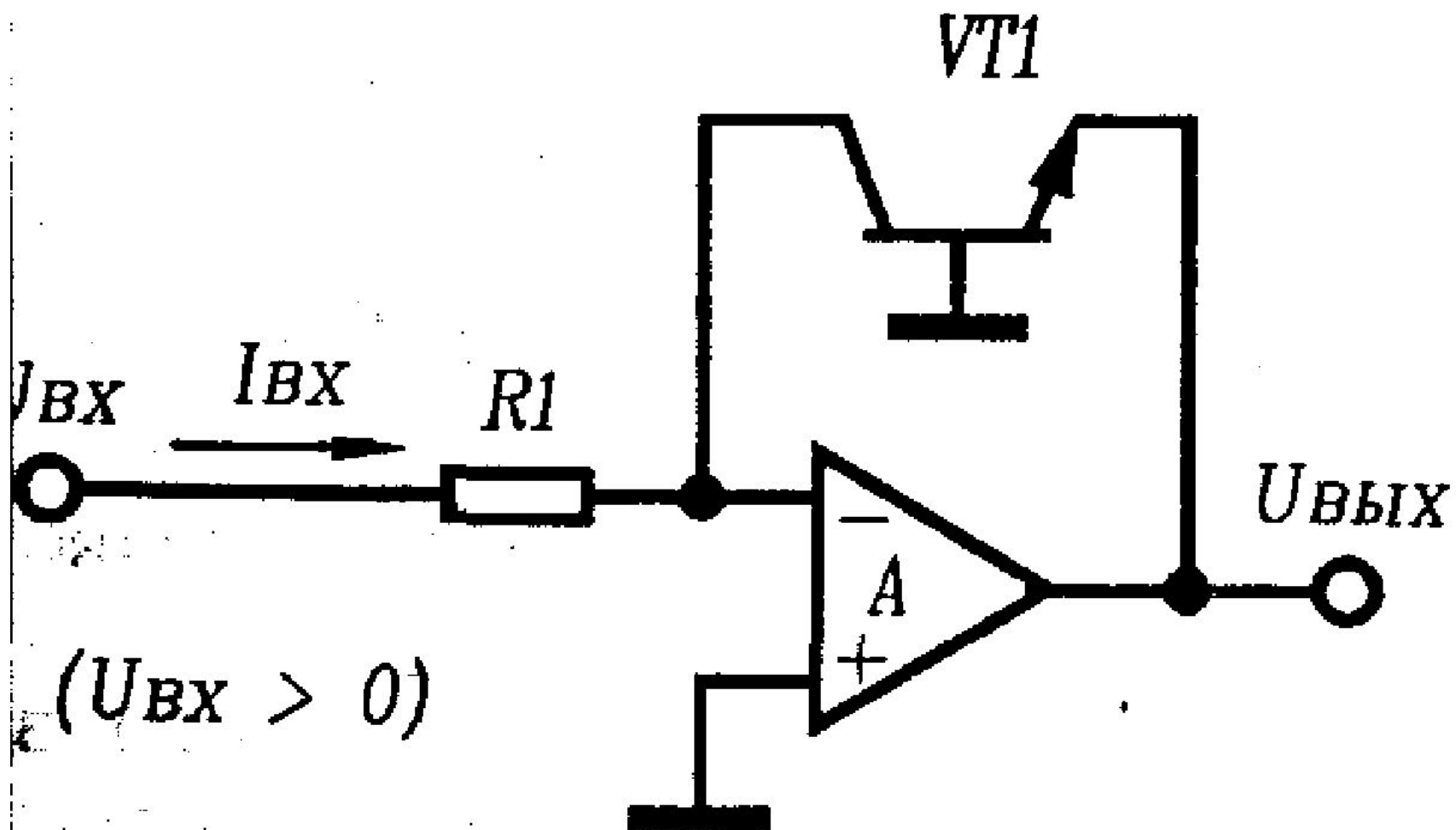
# Зависимость коллекторного тока от напряжения база-эмиттер при нулевом напряжении база-коллектор



Значение  $I_s$  для маломощных биполярных транзисторов общего назначения составляет около **0,1 пА** и **зависит от температуры**.



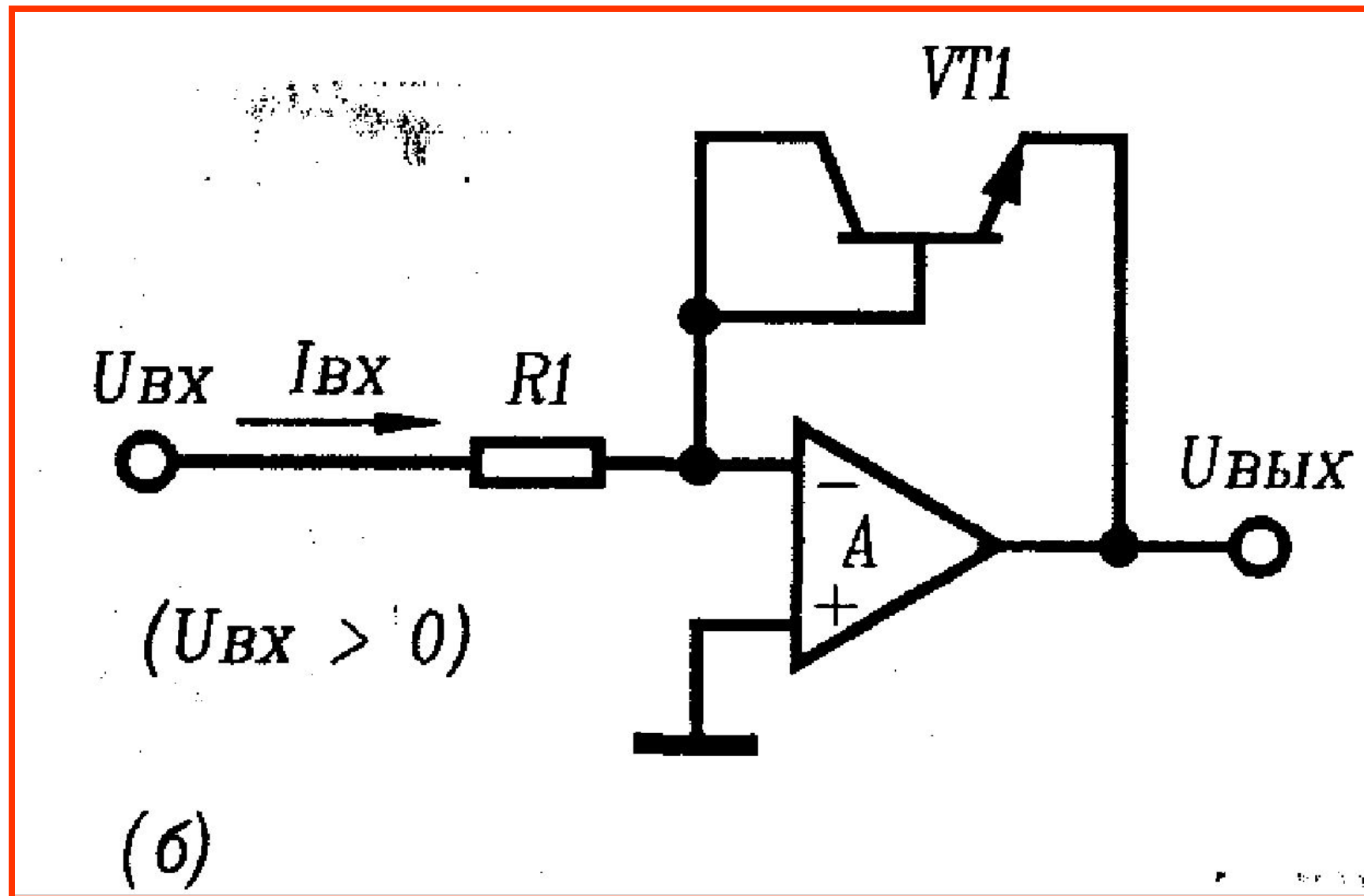
# Схема с заземленной базой



$(U_{BX} > 0)$

(a)

# Схема с диодным включением



$$I_{\text{BX}} \gg I_{\text{S}},$$

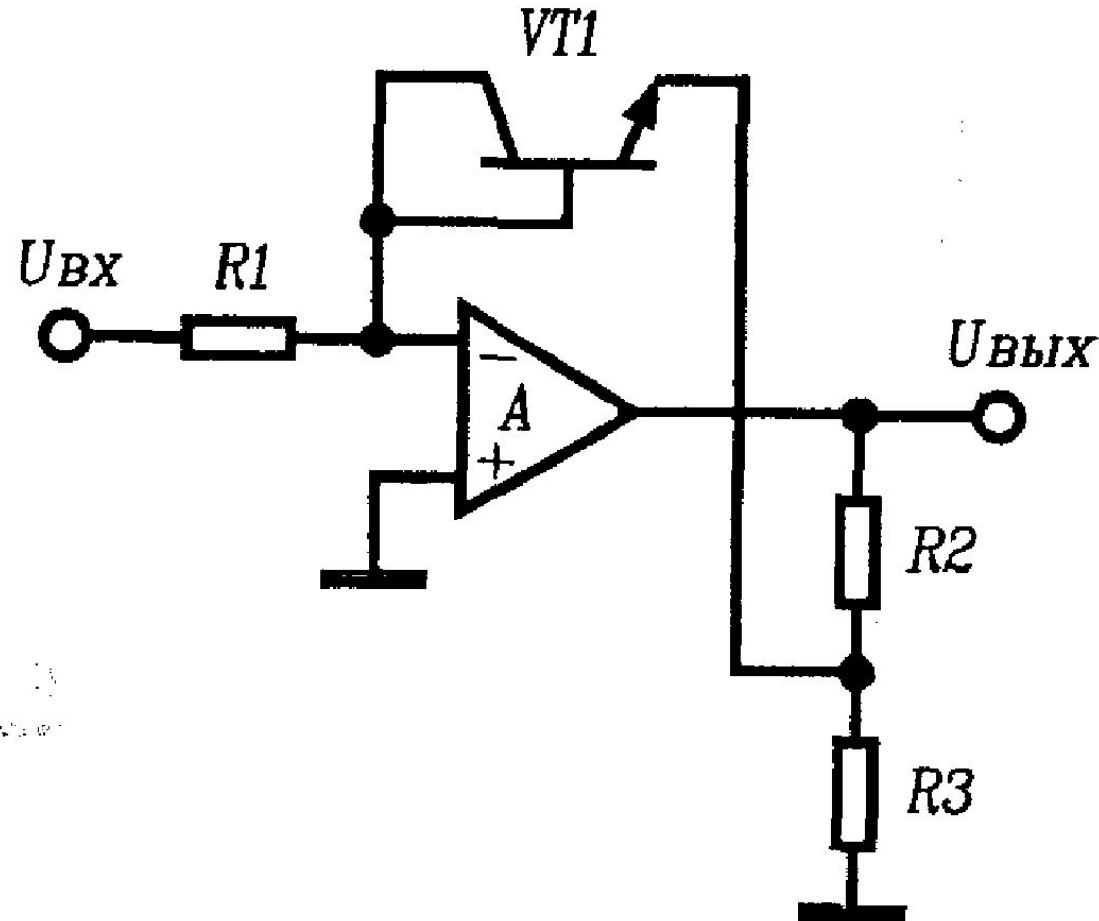
$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{kT}{q} \ln \left( \frac{U_{\text{BX}}}{R_1 I_{\text{S}}} \right) = -\frac{kT}{q \lg e} \lg \left( \frac{U_{\text{BX}}}{R_1 I_{\text{S}}} \right).$$

# Свойства двух основных схем логарифмирования

<b>Схема с заземленной базой</b>	<b>Диодное включение</b>
<b>Широкий диапазон логарифмирования, точность.</b>	<b>Диапазон логарифмирования ограничен 3 или 4 декадами, так как базовый ток суммируется с коллекторным током транзистора.</b>
<b>Склонность к самовозбуждению, устраняется введением в схему дополнительных резистора</b>	<b>Устойчивая динамическая характеристика.</b>

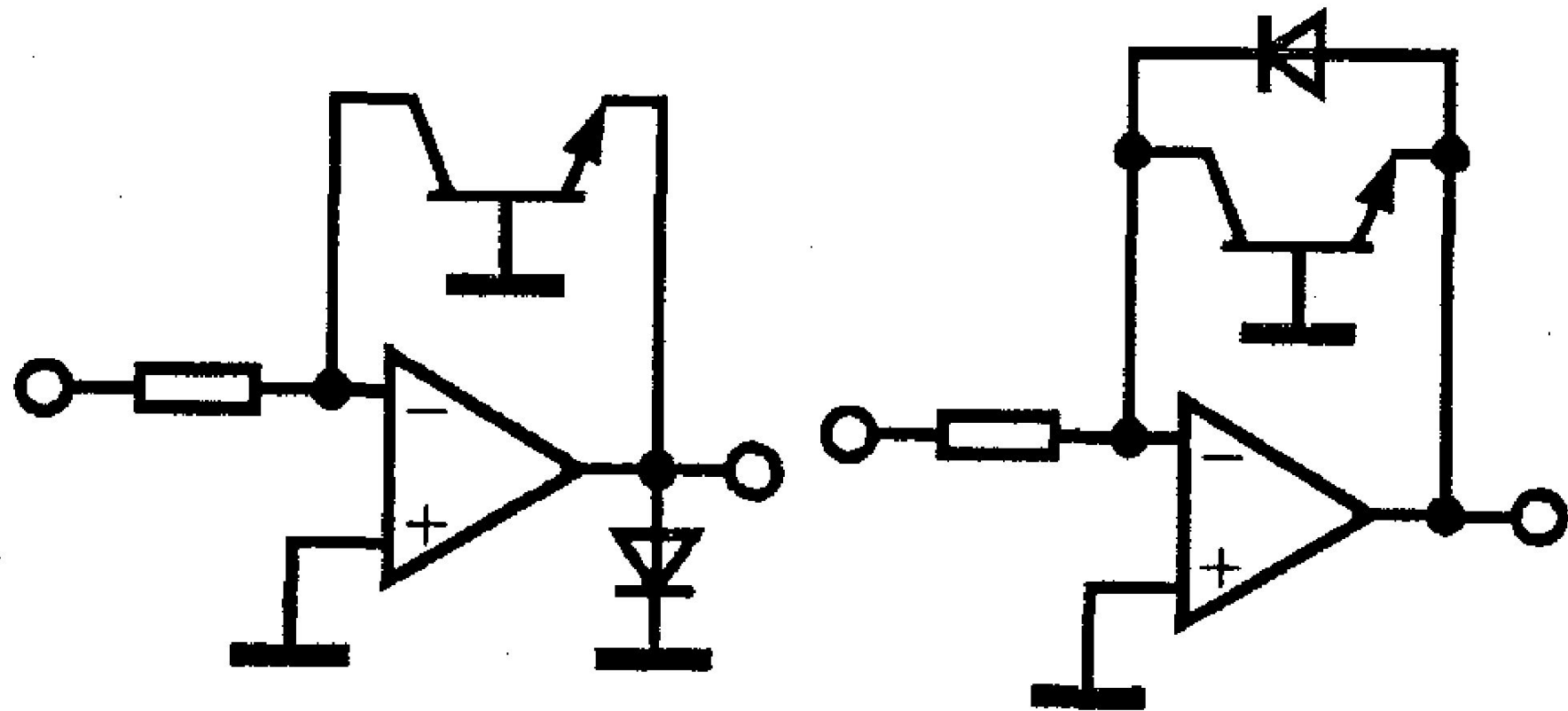
<p>Низкое быстродействие при малых</p>	<p>Более высокое быстродействие.</p>
<p>входных токах из-за введения дополнительного корректирующего конденсатора.</p>	<p>Полярность входного напряжения легко изменить на обратную, "перевернув" транзистор.</p>
<p>Эмиттер должен быть подключен к выходу ОУ. Для отрицательных входных напряжений используется транзистор дополнительный инвертирующий каскад.</p>	<p>Для получения хорошей точности логарифмирования применяется транзистор с большим значением <math>h_{21E}</math>.</p>

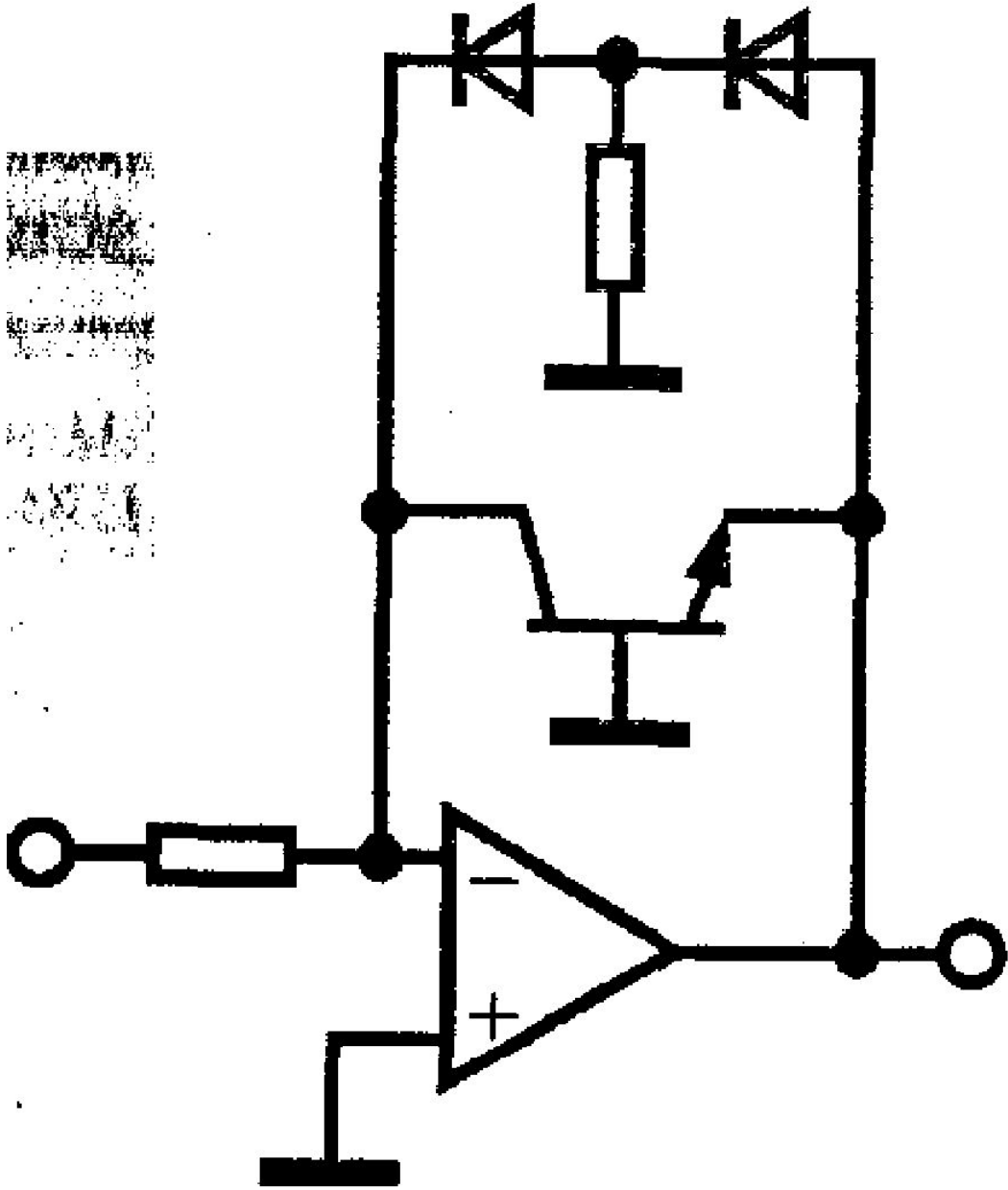
# Увеличение размаха выходного напряжения



$$U_{ВЫХ} = -\left(1 + \frac{R2}{R3}\right) \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{U_{ВХ}}{I_s R1}\right) = -59\text{mВ} \left(1 + \frac{R2}{R3}\right) \lg\left(\frac{U_{ВХ}}{I_s R1}\right)$$

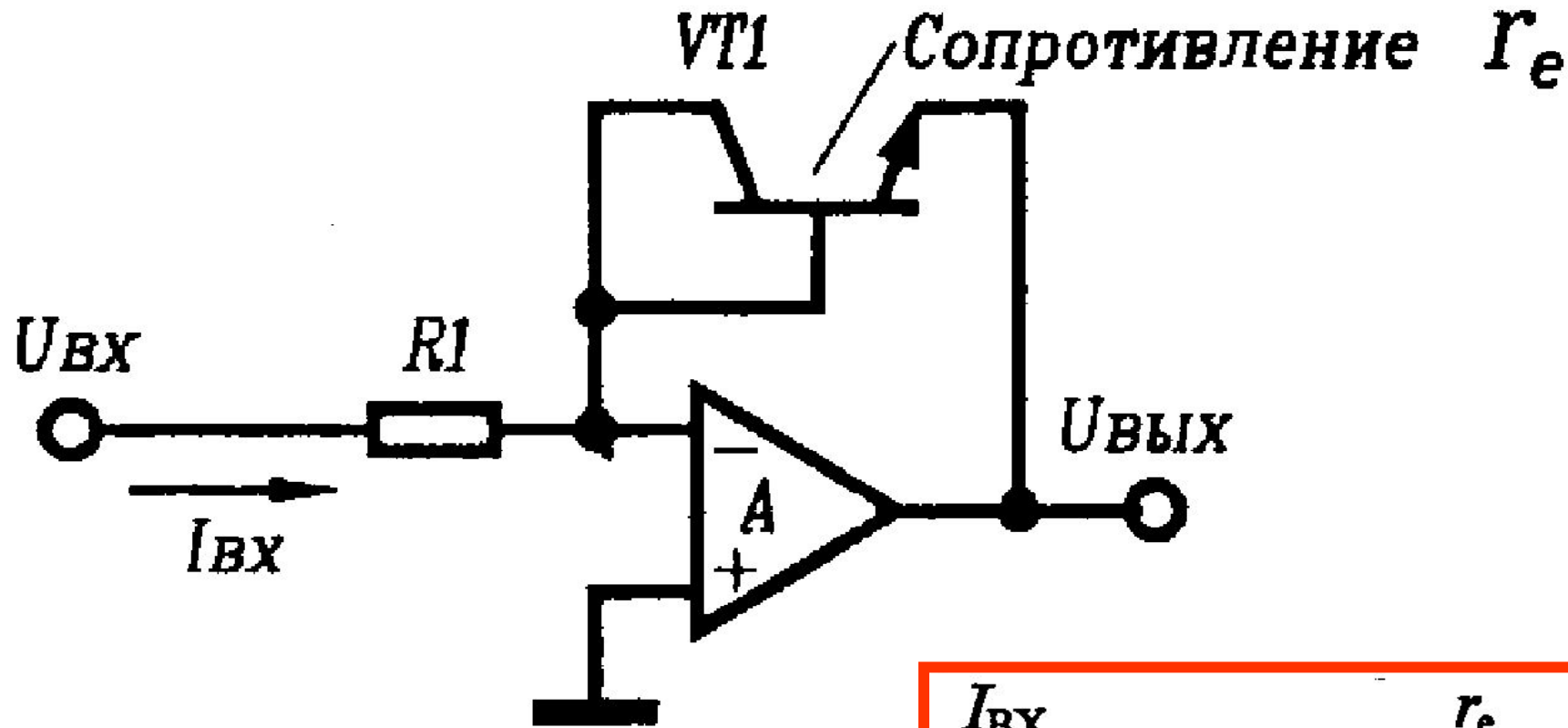
# Применение диодов для защиты транзисторов





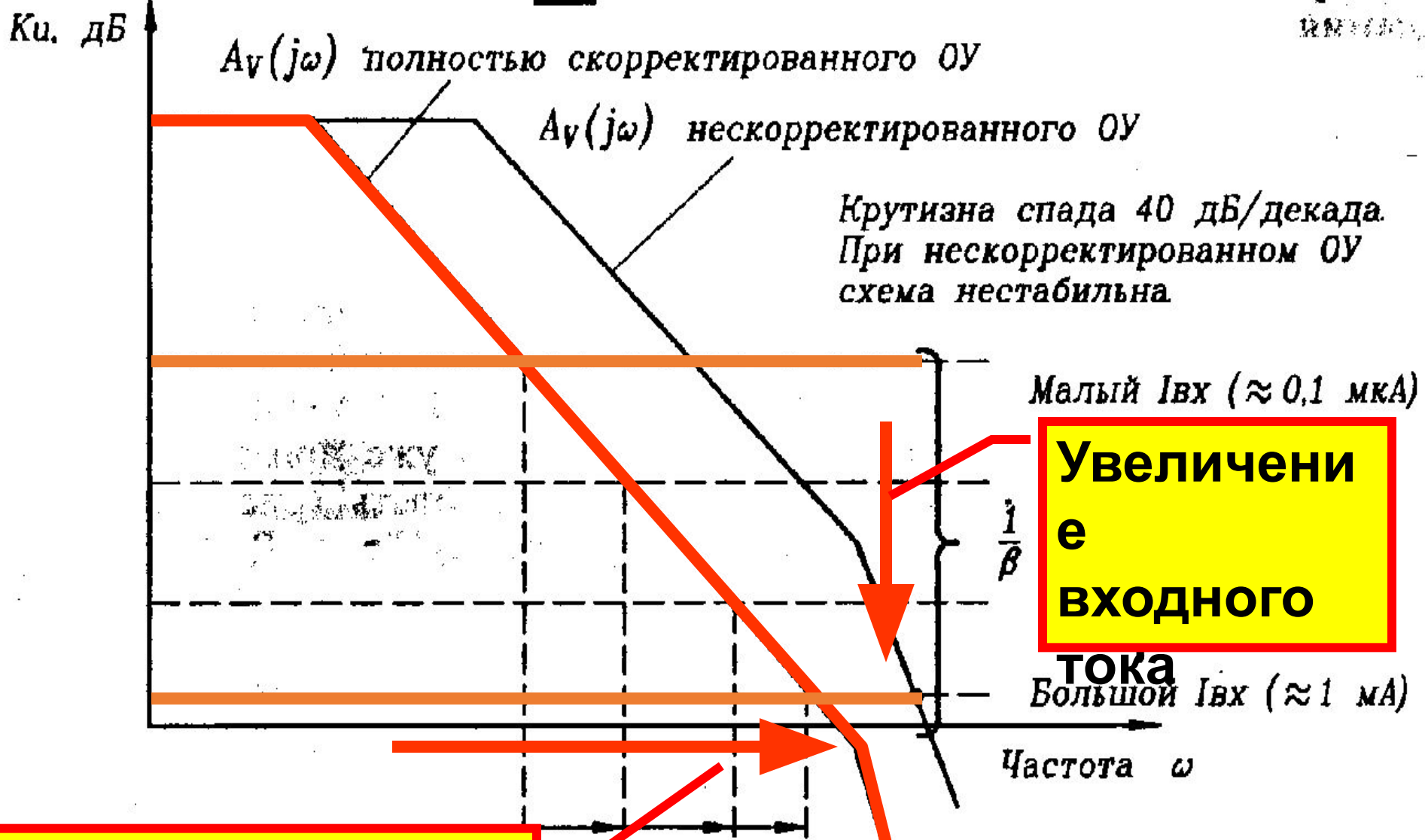


# УСТОЙЧИВОСТЬ



$$1/\beta = 1 + r_e / R_1$$

$I_{ВХ}$	$r_e$
100 нА	250 кОм
1 мкА	25 кОм
10 мкА	2,5 кОм
100 мкА	250 Ом
1 мА	25 Ом

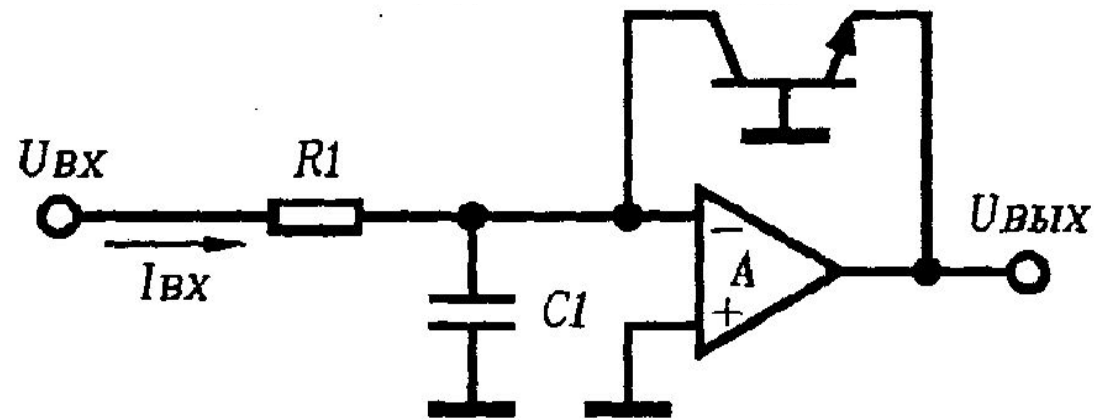


**Расширение  
полосы с  
ростом тока**

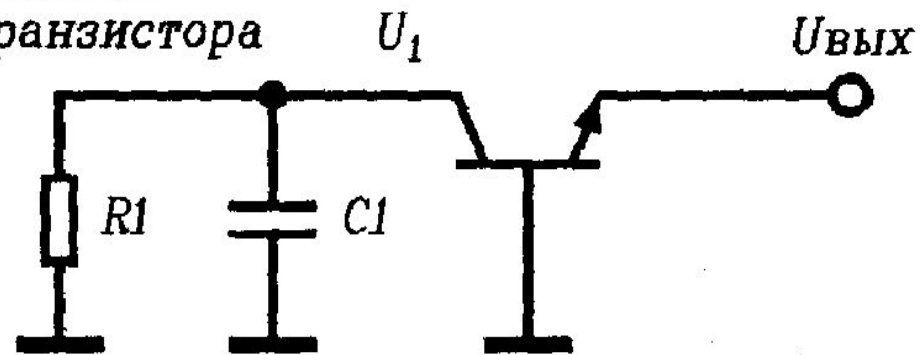
**Увеличени  
е  
ВХОДНОГО**

**ТОКА**

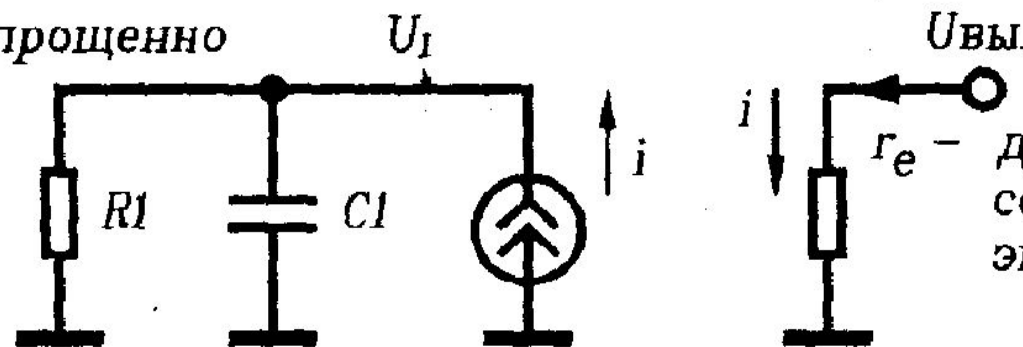
# Транзистор с заземленной базой



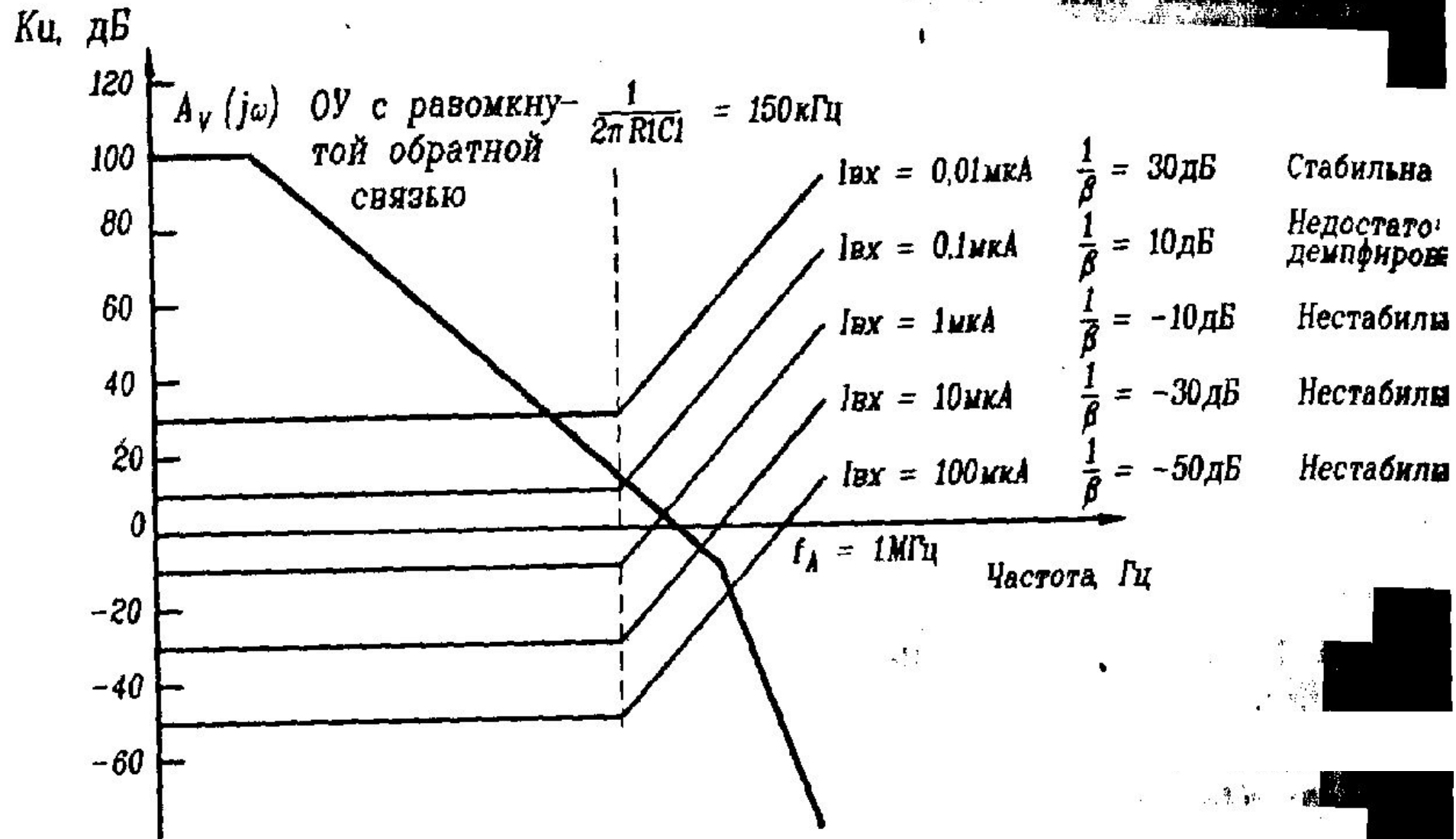
Эквивалентная  
схема транзистора



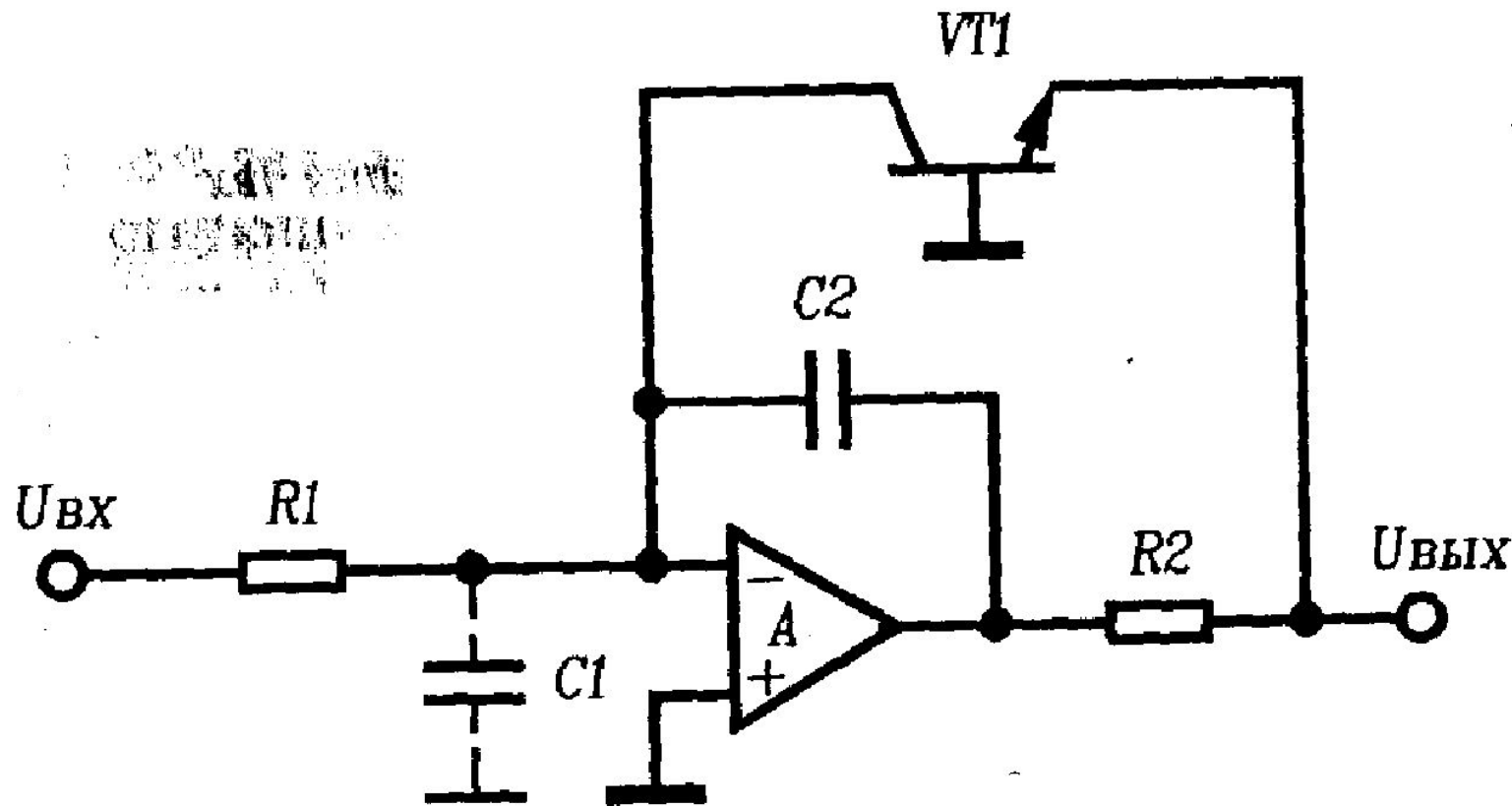
Более упрощенно



# Диаграмма Бode для схемы с заземленной базой

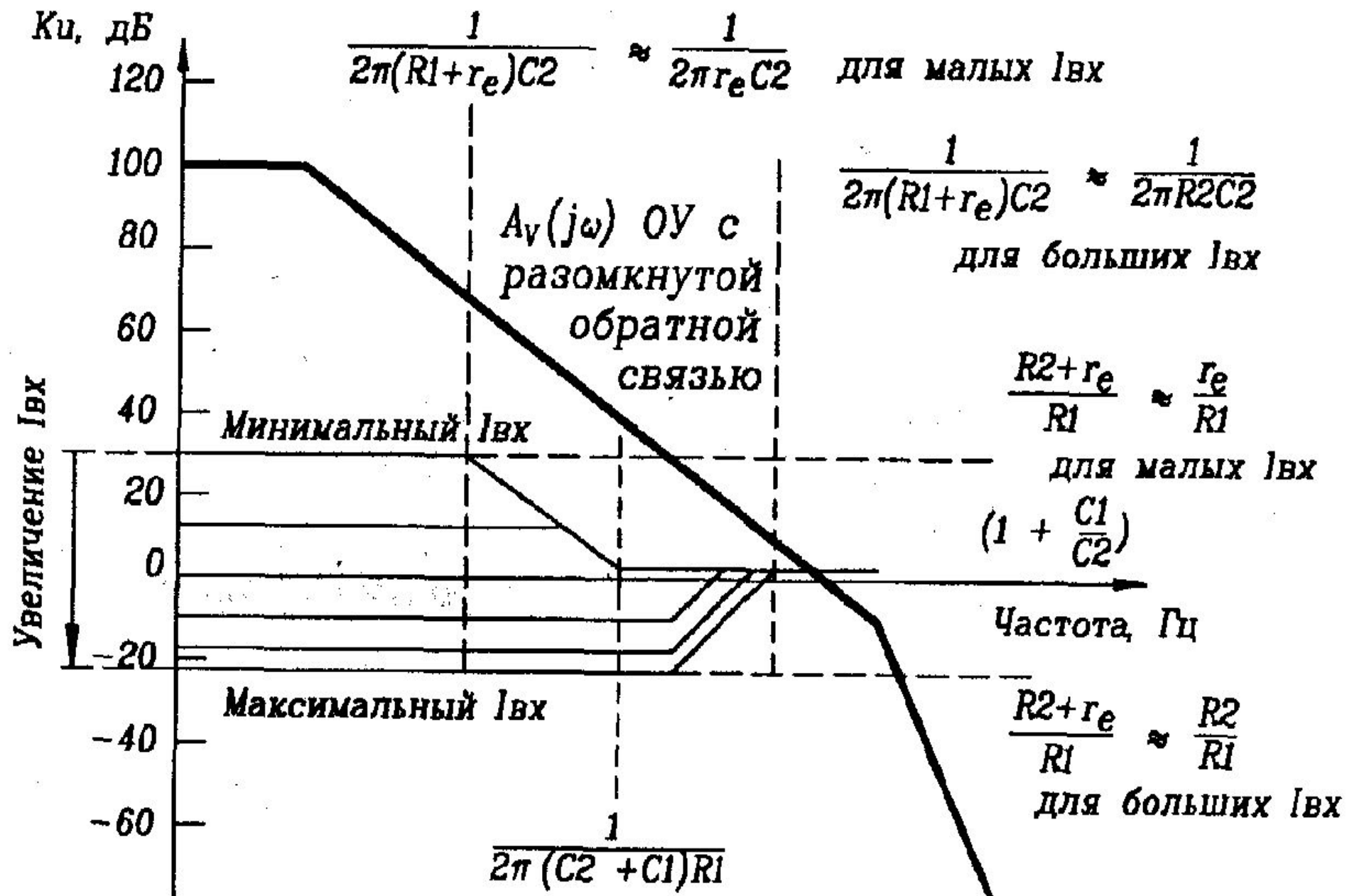


# Частотная коррекция логарифмического преобразователя

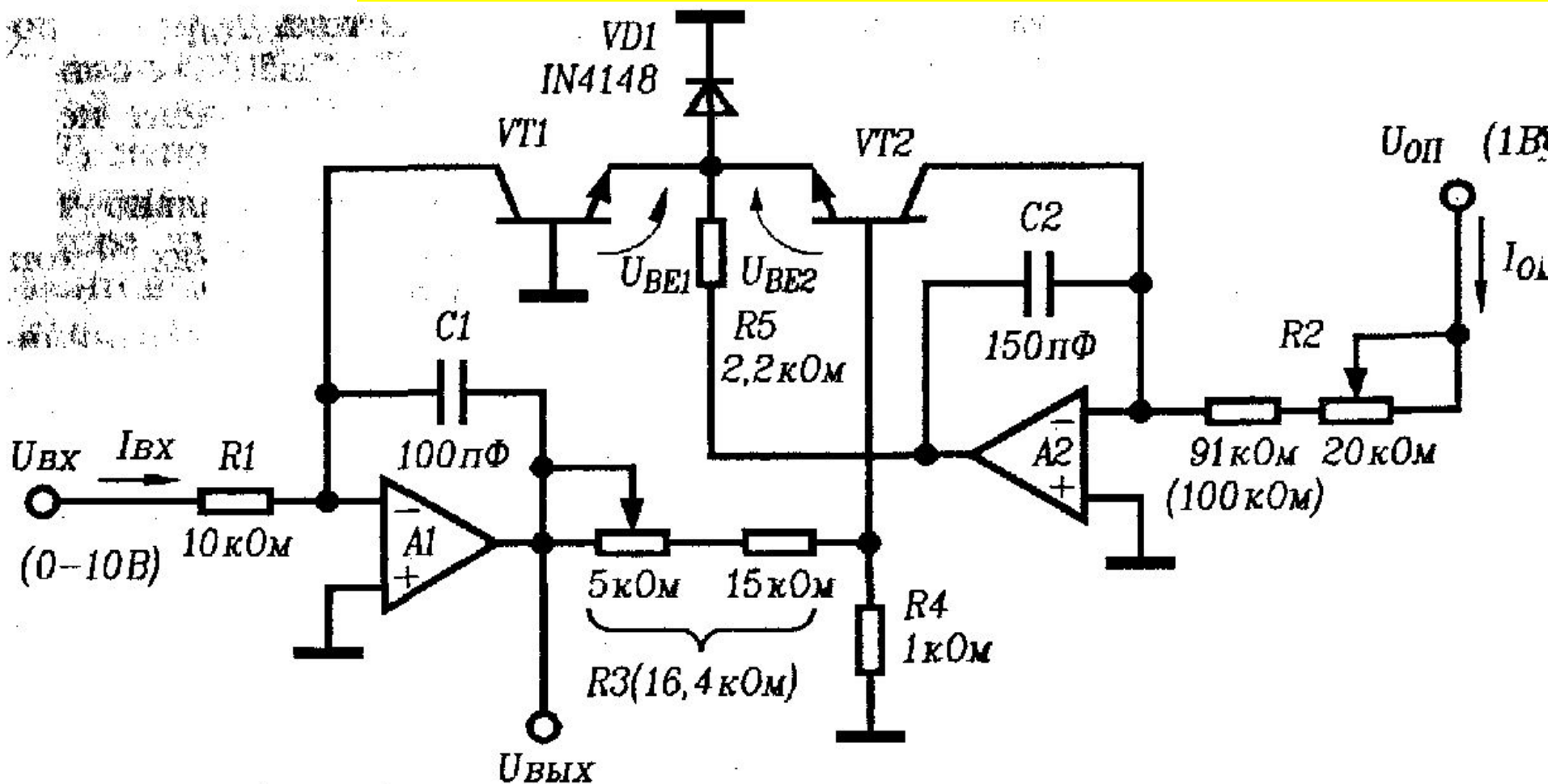


$$1/\beta(j\omega) = \frac{R_2 + r_e}{R_1} \cdot \frac{(1 + j\omega(C_1 + C_2)R_1)}{(1 + j\omega(R_2 + r_e)C_2)}$$

# Диаграмма Бode для скорректированной схемы с заземленной базой



# Практическая схема логарифмирующего усилителя



$A_1$  и  $A_2$  — полностью скорректированные ОУ с полевым входом,  
 $VT_1$  и  $VT_2$  — согласованная пара (например, LM394).

# Рекомендации по выбору элементов

## *Транзисторы*

При разработке схемы на дискретных компонентах можно использовать **согласованные транзисторные пары**, например **LM394** или **МАТ-01** (наиболее близкие отечественные аналоги — микросхемы серий **159** и **198**, а также транзисторные пары **2ТС393**, **КТС394**, **КТС395**).



## ***Операционный усилитель***

Входное **напряжения смещения** и **входные токи** ОУ ограничивают минимально возможную величину входного сигнала.

**Если схема имеет токовый вход, основная погрешность связана с входным током смещения ОУ. В этом случае применяют ОУ с входом на полевых транзисторах.**

В схемах **с входом по напряжению** вносимая ОУ погрешность равна:

$$U_{см.вх} + I_{см.вх}R_1.$$

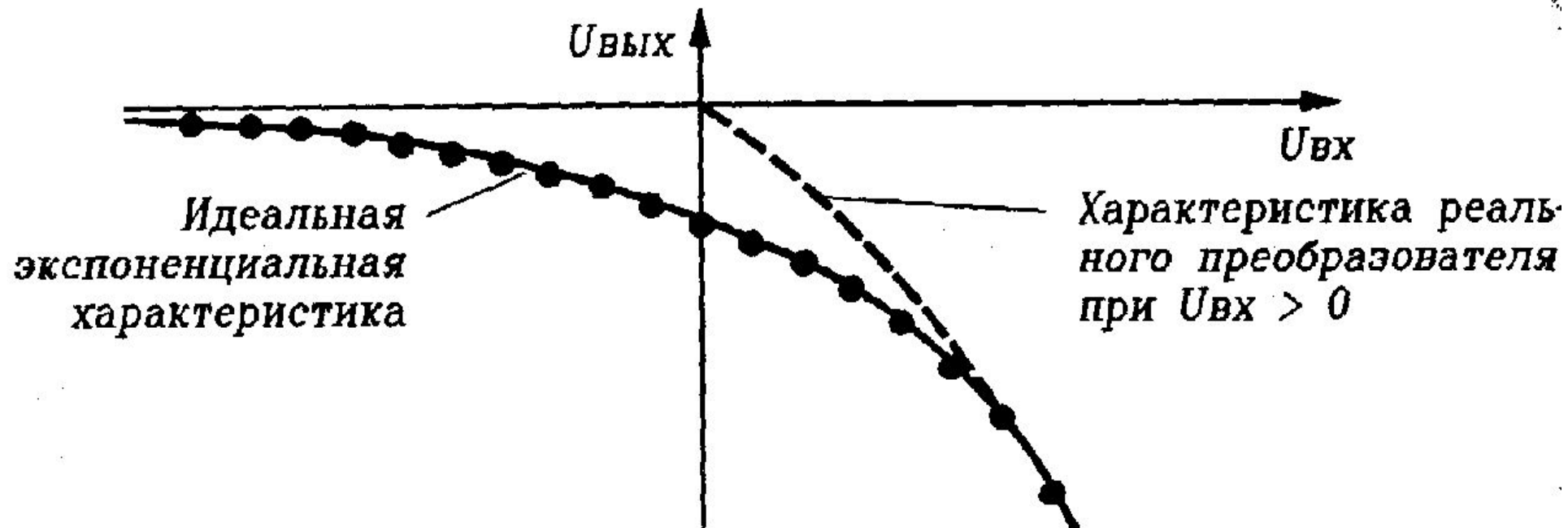
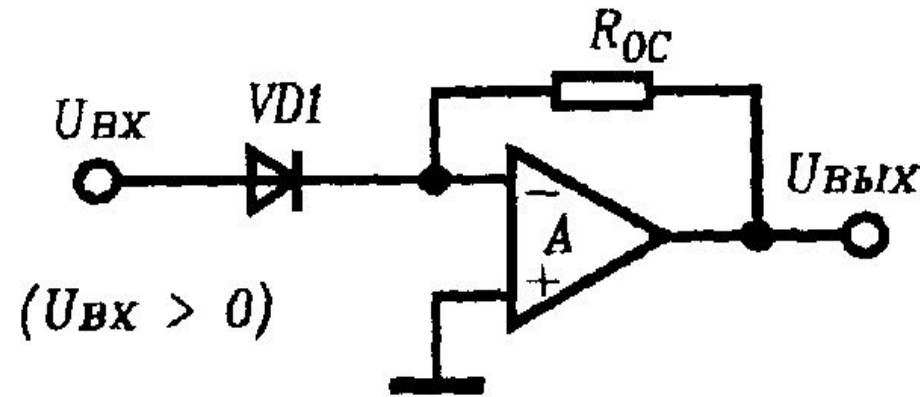
Если сбалансировать  $U_{см.вх}$  то основным источником погрешности может стать ток  $I_{см.вх}$  поэтому и здесь лучше выбрать **ОУ с полевыми транзисторами на входе.**

Для достижения очень **малых значений**  $I_{см.вх}$  можно использовать ОУ с **КМОП-входом** и периодической коррекцией дрейфа.

## ***Резисторы.***

Для температурной компенсации параметра  $kT/q$  используются термисторы с ТКС, примерно равным  $0,3\%/^{\circ}\text{C}$ .

# Экспоненциальные преобразователи. Основная схема



Исходные выражения для расчета передаточной характеристики:

$$I_{ВХ} = I_0 \left( e^{\frac{qU_{ВХ}}{kT}} - 1 \right) ,$$

$$I_{ВХ} = - \frac{U_{ВЫХ}}{R_{ос}} ;$$

---

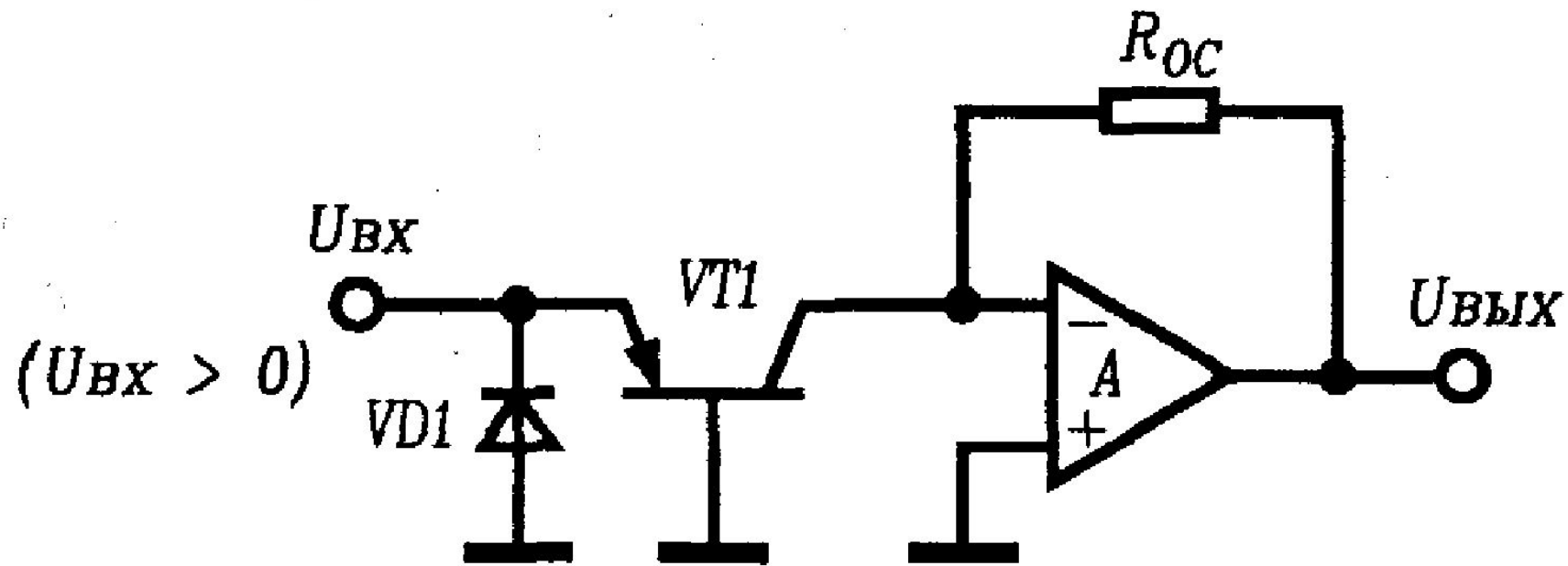
$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_0 R_{\text{ОС}} \left( e^{\frac{qU_{\text{ВХ}}}{kT}} - 1 \right) = -I_0 R_{\text{ОС}} e^{\frac{qU_{\text{ВХ}}}{kT}} \quad (\text{при } e^{\frac{qU_{\text{ВХ}}}{kT}} \gg 1)$$

С учетом смещения ОУ и его входных токов:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_0 R_{\text{ОС}} \left( e^{\frac{q}{kT}(U_{\text{ВХ}} - U_{\text{СМ.ВХ}})} \right) - I_{\text{СМ.ВХ}} R_{\text{ОС}} + U_{\text{СМ.ВХ}} ,$$

где  $I_{\text{СМ.ВХ}}$  — входной ток смещения ОУ,  
 $U_{\text{СМ.ВХ}}$  — входное напряжение смещения.

# Основная схема экспоненциального преобразователя на БПТ с заземленной базой



В экспоненциальных преобразователях обычно применяется включение **БПТ с заземленной базой**, которое обеспечивает лучшее соответствие передаточной характеристики экспоненте по сравнению с диодным включением транзистора.

Транзисторы весьма чувствительны к **большим обратным напряжениям база-эмиттер**, поэтому на входе схемы необходимо включать защитный диод для предохранения ее от отрицательных



**Входное напряжение не должно превышать 1В**, в противном случае ток базы транзистора может оказаться слишком большим, что приведет к выходу его из строя.

**Для расширения диапазона входных сигналов** можно было бы включить делитель напряжения. Однако сопротивления резисторов делителя должны быть очень малыми, чтобы избежать его шунтирования транзистором.

Для преобразования отрицательных входных напряжений вместо **рпр-транзистора** используют **прп-транзистор**.

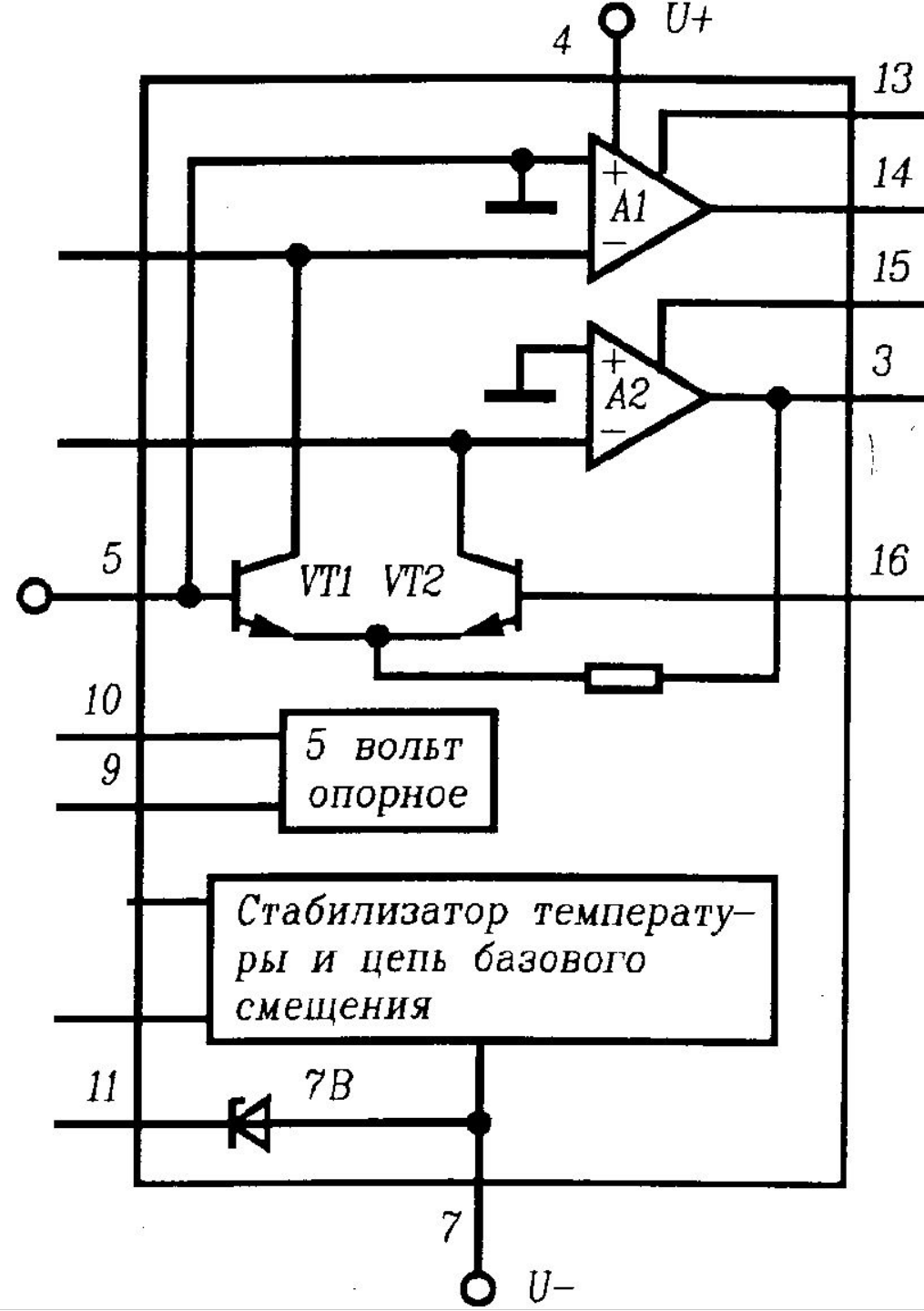
**Значения входного напряжения смещения и входного тока ОУ не столь критичны, как для логарифмирующего преобразователя, поскольку коэффициент передачи для малых входных сигналов в экспоненциальной схеме очень мал**

**Максимальный входной сигнал ограничен влиянием объемного сопротивления БПТ.**

Школа Н.Ф.:

ФАКУЛЬТАТИВНО

Промышленные  
логарифмирующие  
и  
экспоненциальные  
преобразователи  
(SSM-2100)

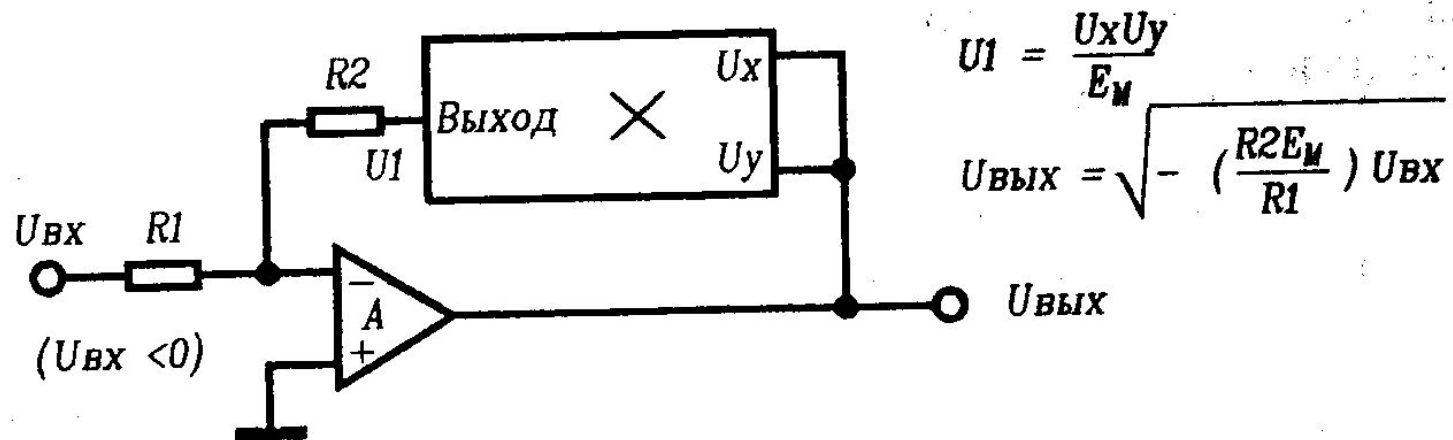
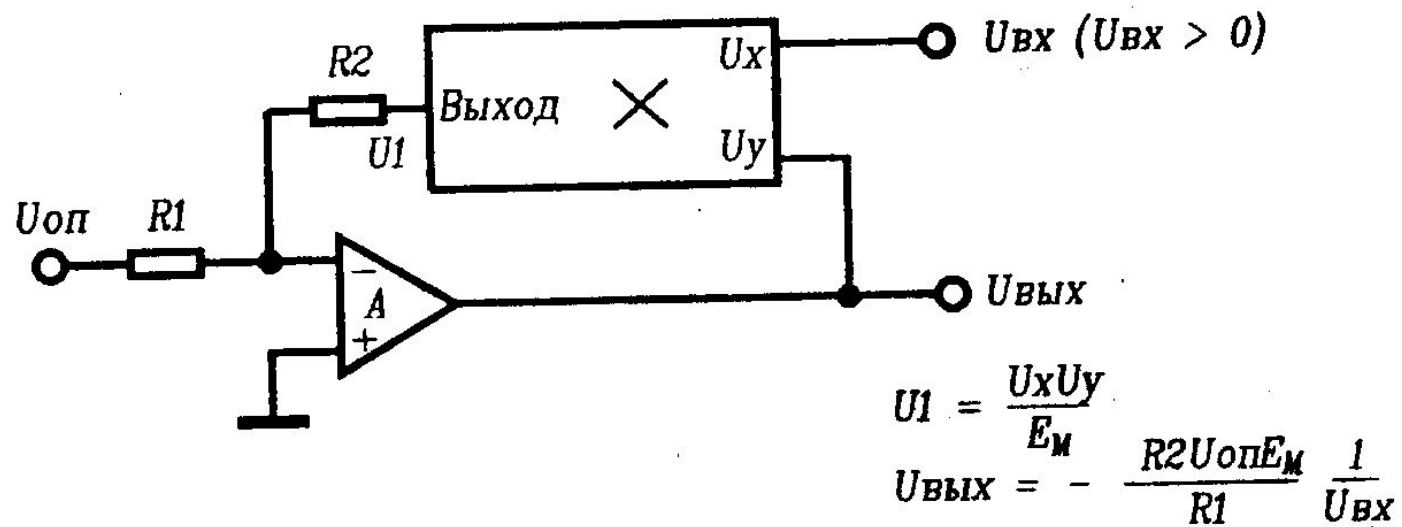
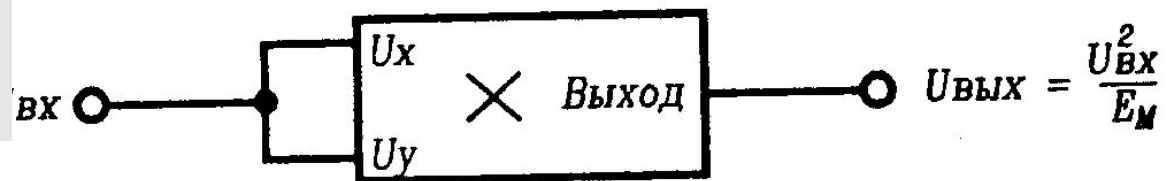


Параметр	SSM-2100	759N
<i>Передаточная функция</i>		
Тип	лог., эксп., лог. отношения	лог., эксп., лог. отношения
Зависимость	$V_K \ln \frac{I_1}{I_2}$	$V_K \lg \frac{I_1}{I_2}$
Масштабный коэффициент ( $V_K$ )	—	$f$ 2, 1, $\frac{2}{3}$ В/декада
<i>Диапазон входных сигналов</i>		
По напряжению	—	-1 мВ ... -10 В
По току	10 нА ... 1 мА	-1 нА ... -1 мА
<i>Погрешности</i>		
Соответствие форме кривой	0,4%	—
Погрешность масштабного коэффициента	—	1% <sup>А</sup>
Входное напряжение смещения	4 мВ	2 мВ <sup>А</sup>
Дрейф входного смещения	—	10 мкВ/°С
<i>Ширина полосы пропускания для малых сигналов (по уровню -3 дБ) при токах:</i>		
$I_{ВХ} = 1$ нА	—	250 Гц
$I_{ВХ} = 10$ нА	—	—
$I_{ВХ} = 100$ нА	—	—
$I_{ВХ} = 1$ мкА	—	100 кГц
$I_{ВХ} = 10$ мкА	—	200 кГц
$I_{ВХ} = 100$ мкА	—	—
$I_{ВХ} = 1$ мА	—	200 кГц

Школа Н.Ф.:

**ФАКУЛЬТАТИВНО**

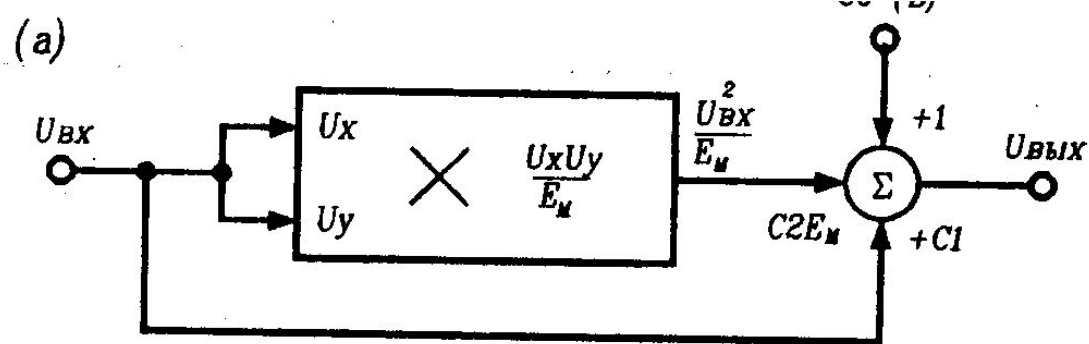
## **4.3. Функциональные преобразователи с аналоговыми перемножителями**



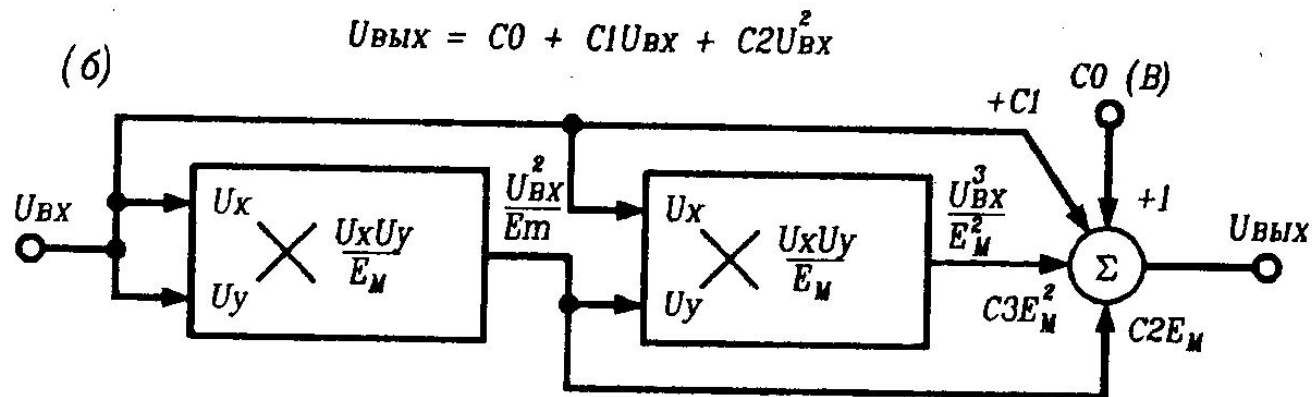
Школа Н.Ф.:

**ФАКУЛЬТАТИВНО**

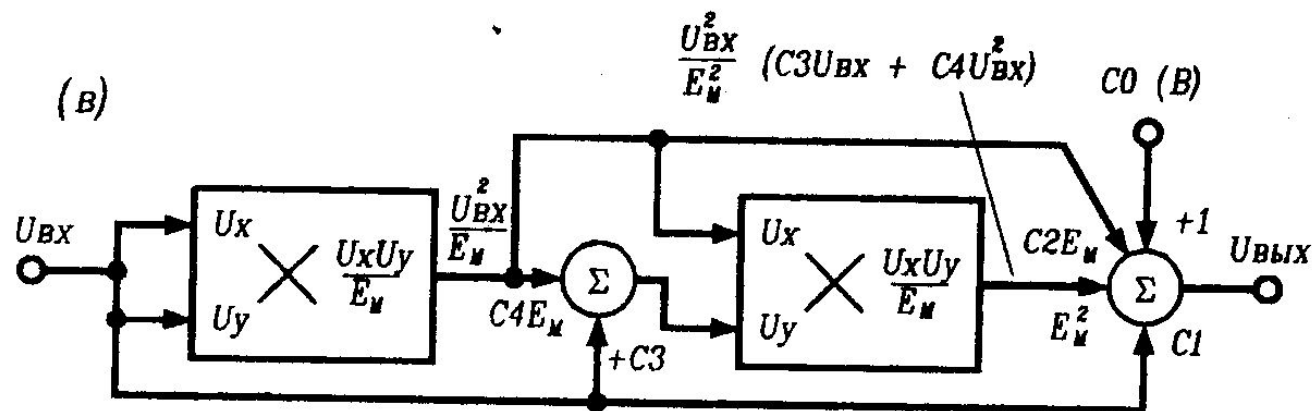
# **Синтез полиномов с использованием умножителей**



$$U_{ВЫХ} = C_0 + C_1 U_{ВХ} + C_2 U_{ВХ}^2$$



$$U_{ВЫХ} = C_0 + C_1 U_{ВХ} + C_2 U_{ВХ}^2 + C_3 U_{ВХ}^3$$



$$U_{ВЫХ} = C_0 + C_1 U_{ВХ} + C_2 U_{ВХ}^2 + C_3 U_{ВХ}^3 + C_4 U_{ВХ}^4$$

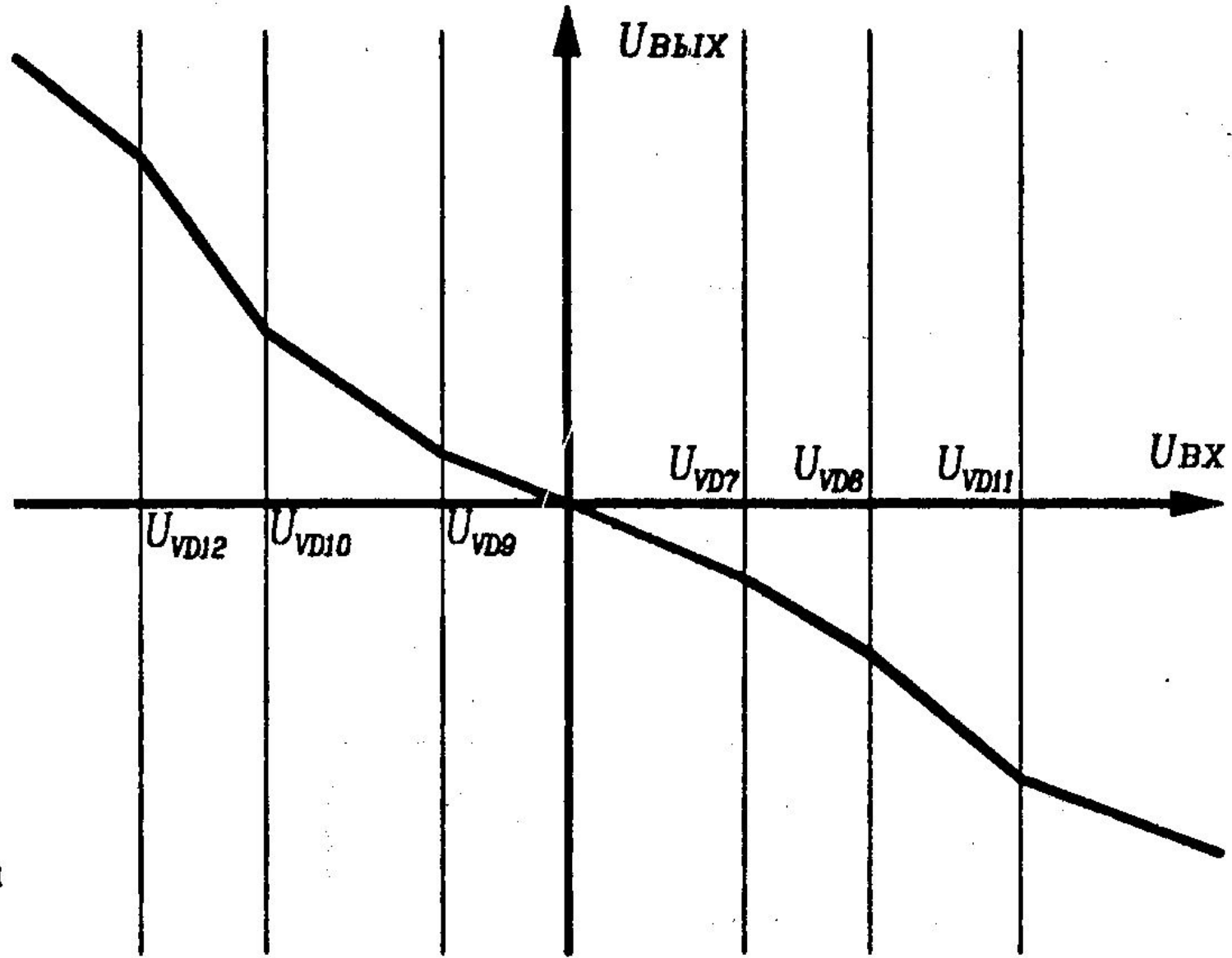


Школа Н.Ф.:

**ФАКУЛЬТАТИВНО**

## **4.4. Функциональные преобразователи с кусочно-линейной аппроксимацией**

Школа Н.  
Ф.:  
**ФАКУЛЬТА  
ТИВНО**

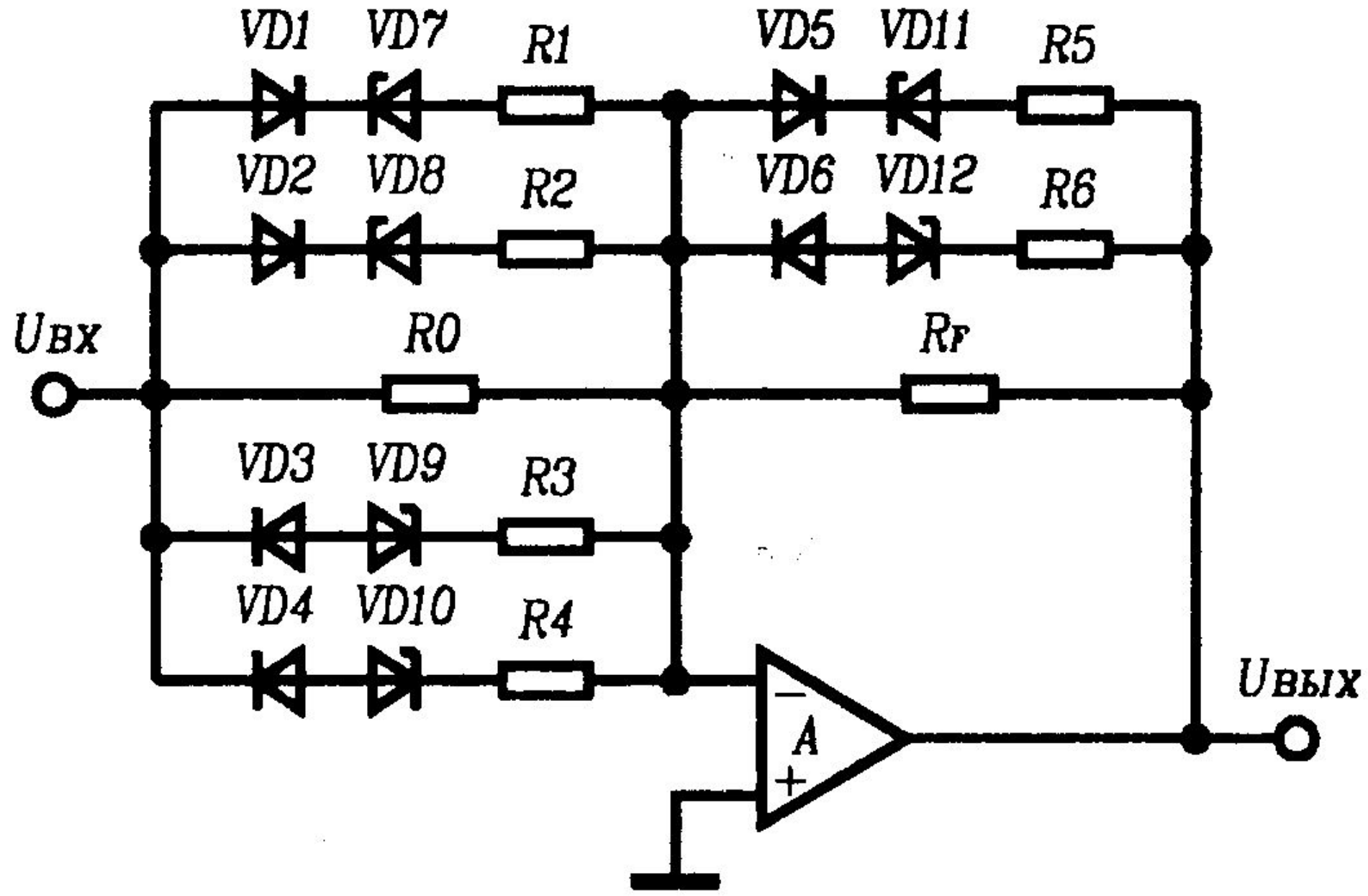


Наклон  
отрезка  
прямой

$$\left\{ \begin{array}{cccccc} \frac{-R_F \parallel R_6}{R_0 \parallel R_3 \parallel R_4} & \frac{-R_F}{R_0 \parallel R_3} & \frac{-R_F}{R_0} & \frac{-R_F}{R_0 \parallel R_1} & \frac{-R_F \parallel R_5}{R_0 \parallel R_1 \parallel R_2} \\ & \frac{-R_F}{R_0 \parallel R_3 \parallel R_4} & & \frac{-R_F}{R_0 \parallel R_1 \parallel R_2} & & \end{array} \right.$$

Школа Н.Ф.:

ФАКУЛЬТАТИВНО



# Р1. Тема 5. Измерительные схемы на ОУ

*«СХЕМОТЕХНИКА АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ 2»*

*© Школа Н.Ф.*

*Лекция №7 2018 г.*

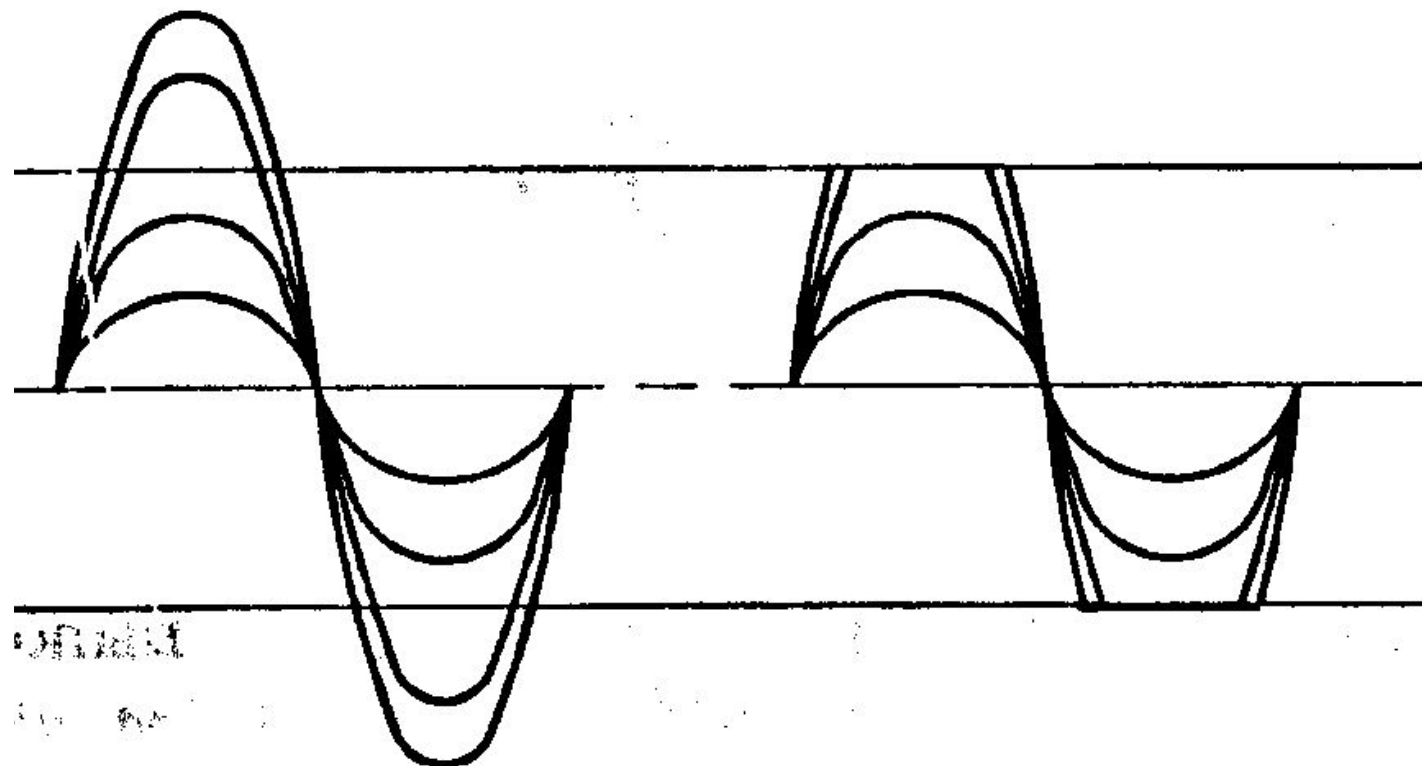
# 5. Ограничители, пиковые детекторы и выпрямители

## 5.1. Ограничители.

Ограничительными называются схемы, выходное напряжение которых не может превышать заданной величины.

Их называют фиксаторами и применяют для защиты от повышенного напряжения.

# Эффект ограничения

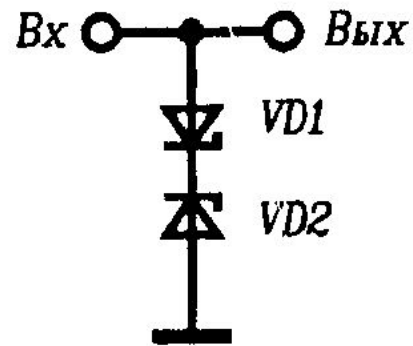


Положительный уровень ограничения

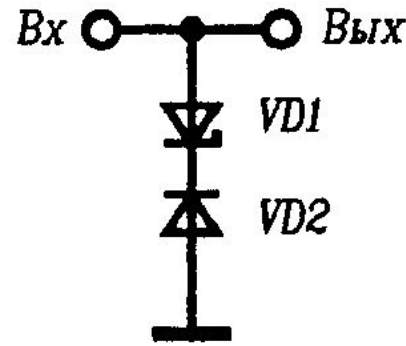
Отрицательный уровень ограничения

# Принцип ограничения

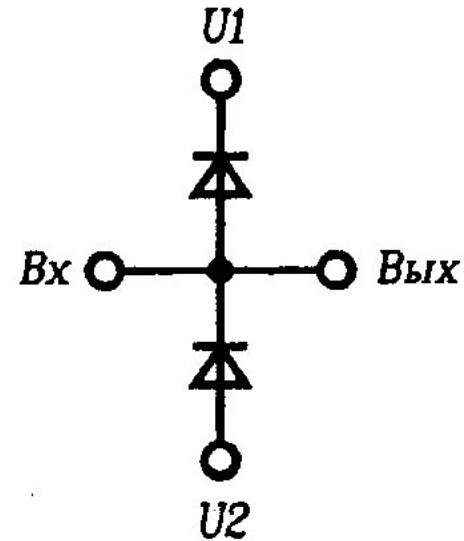
Источник сигнала должен  
иметь ограничитель тока



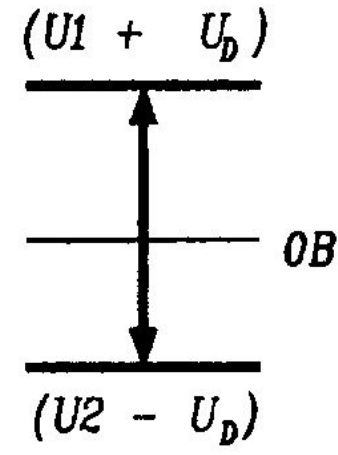
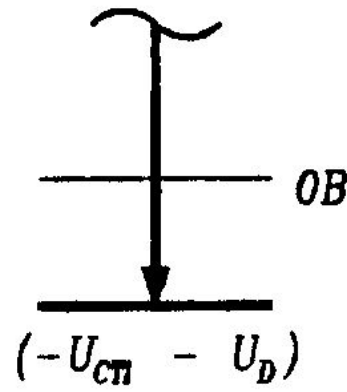
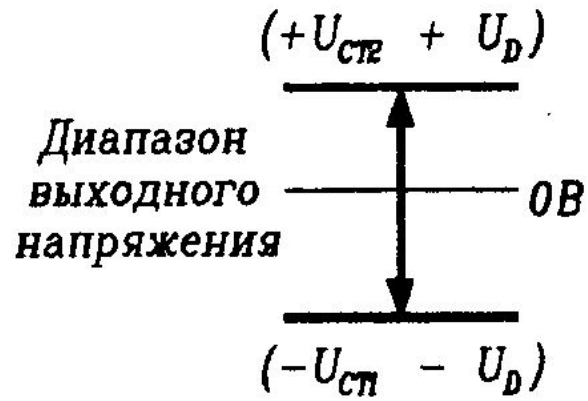
(a)



(б)

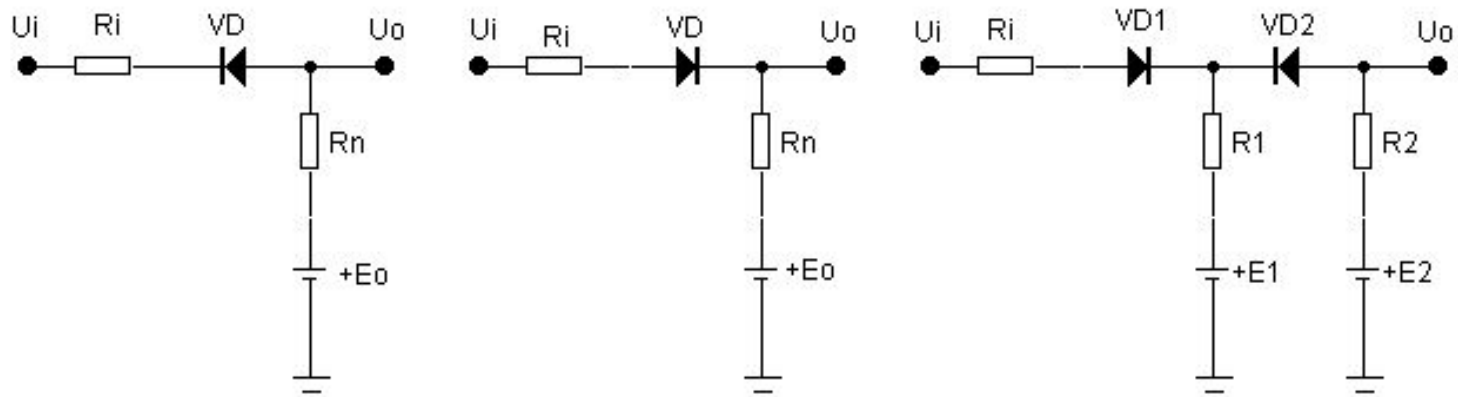


(в)

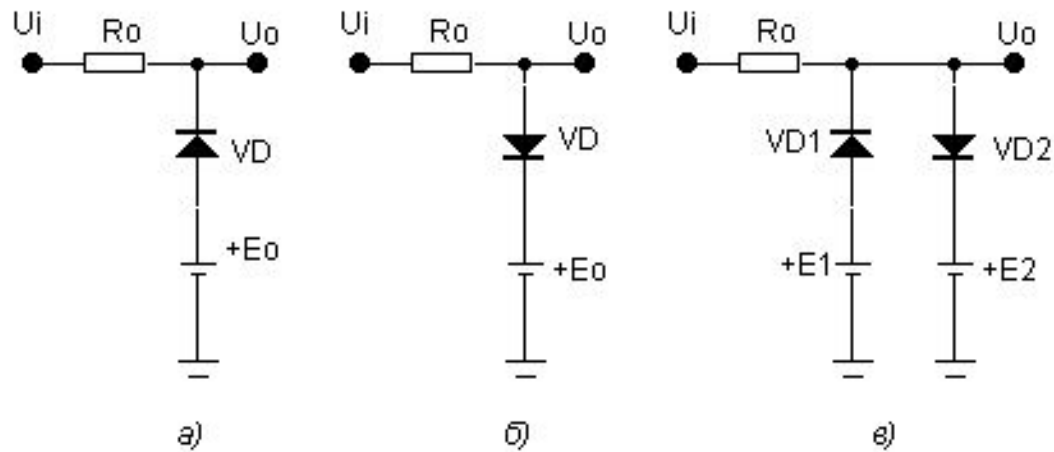


$U_D$  - прямое падение напряжения на диоде  
(около 0,7В для кремневых диодов)

# Примеры схем ограничения



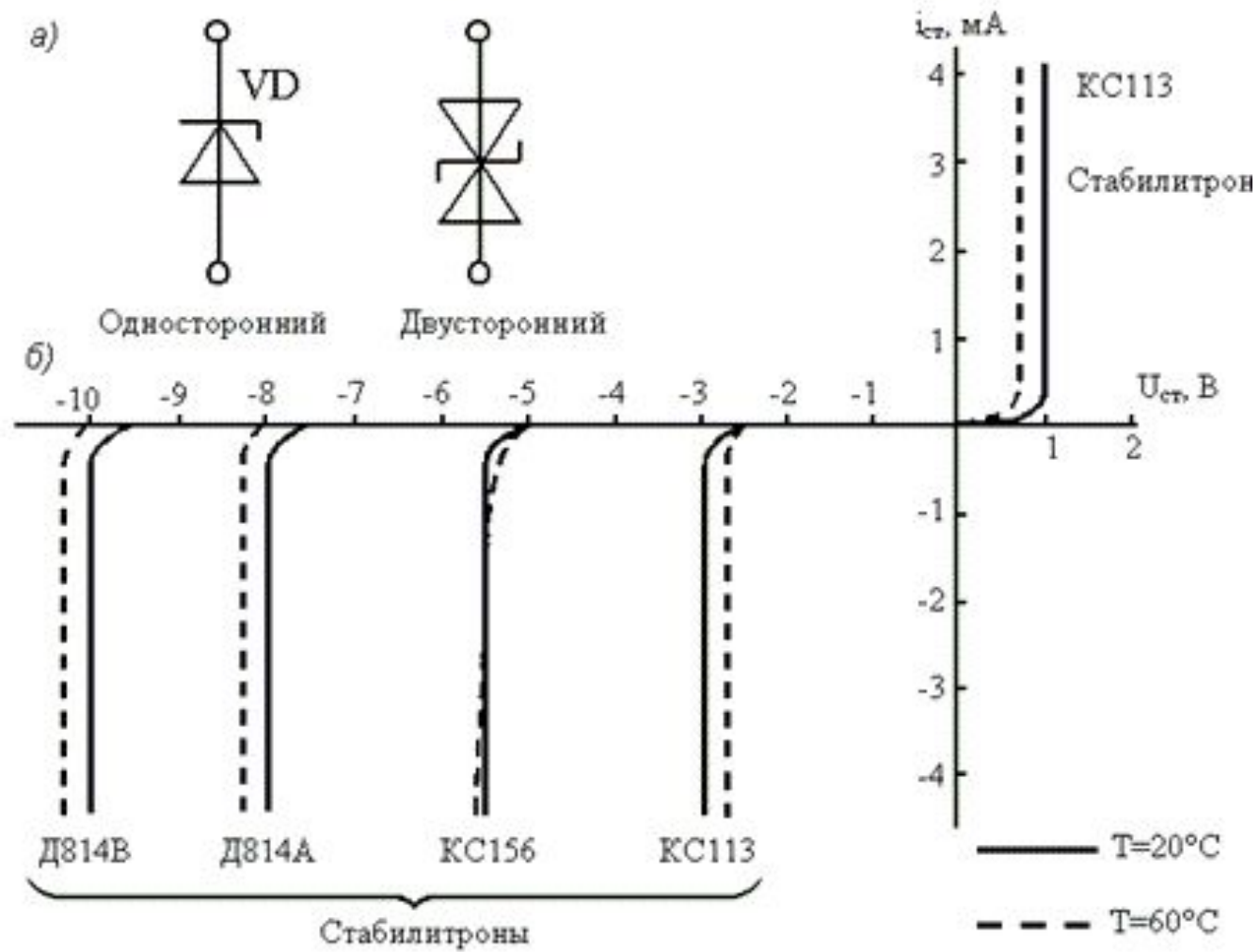
Последовательные диодные ограничители с ограничением сверху ( а ), снизу ( б ) и с двухсторонним ограничением ( в )



Параллельные диодные ограничители с ограничением снизу ( а ), сверху ( б ) и с двухсторонним ограничением ( в )

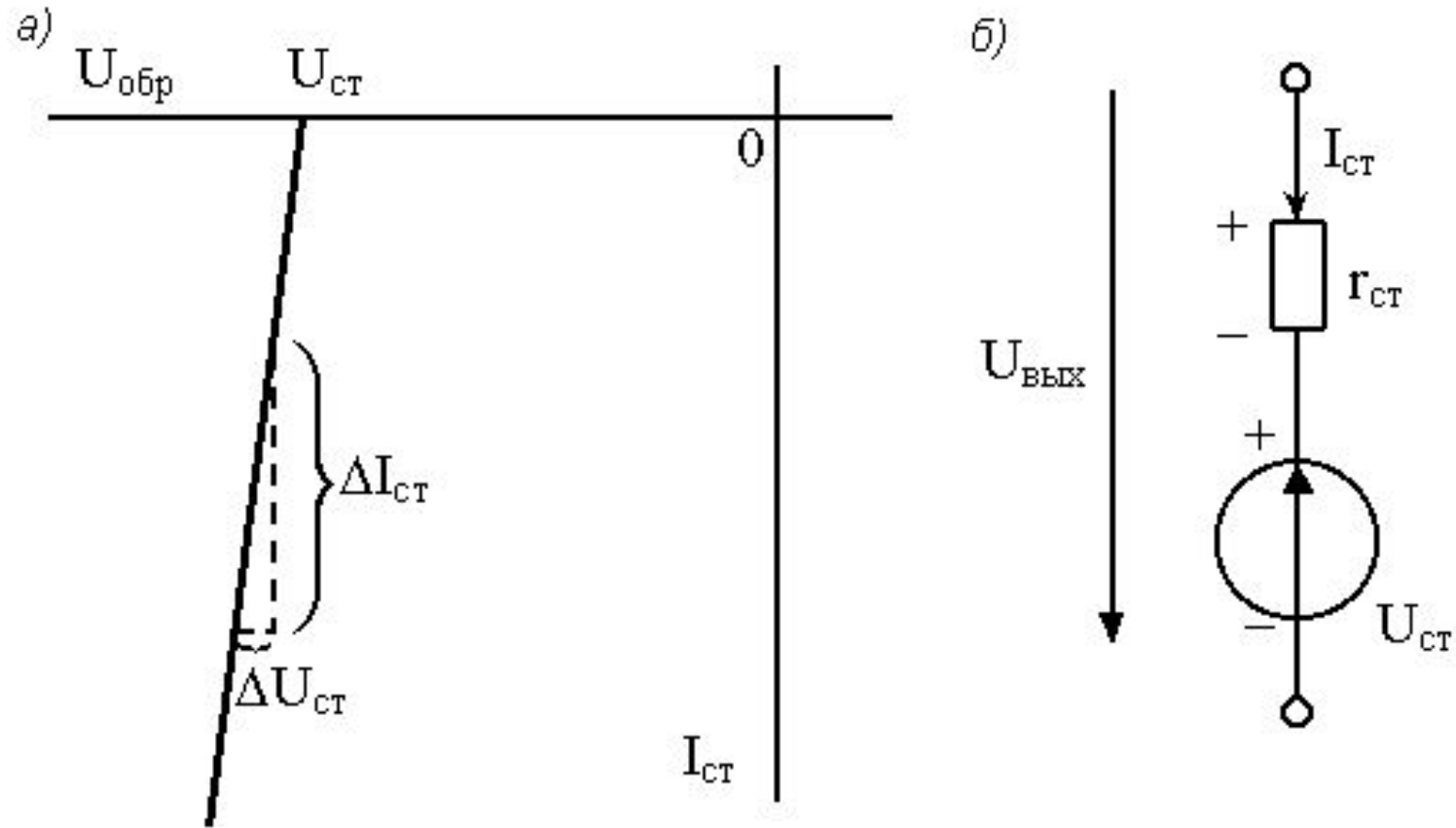


# Применение стабилитронов в схемах ограничения



Схематическое изображение стабилитронов ( а ) и их вольт-амперные характеристики ( б )

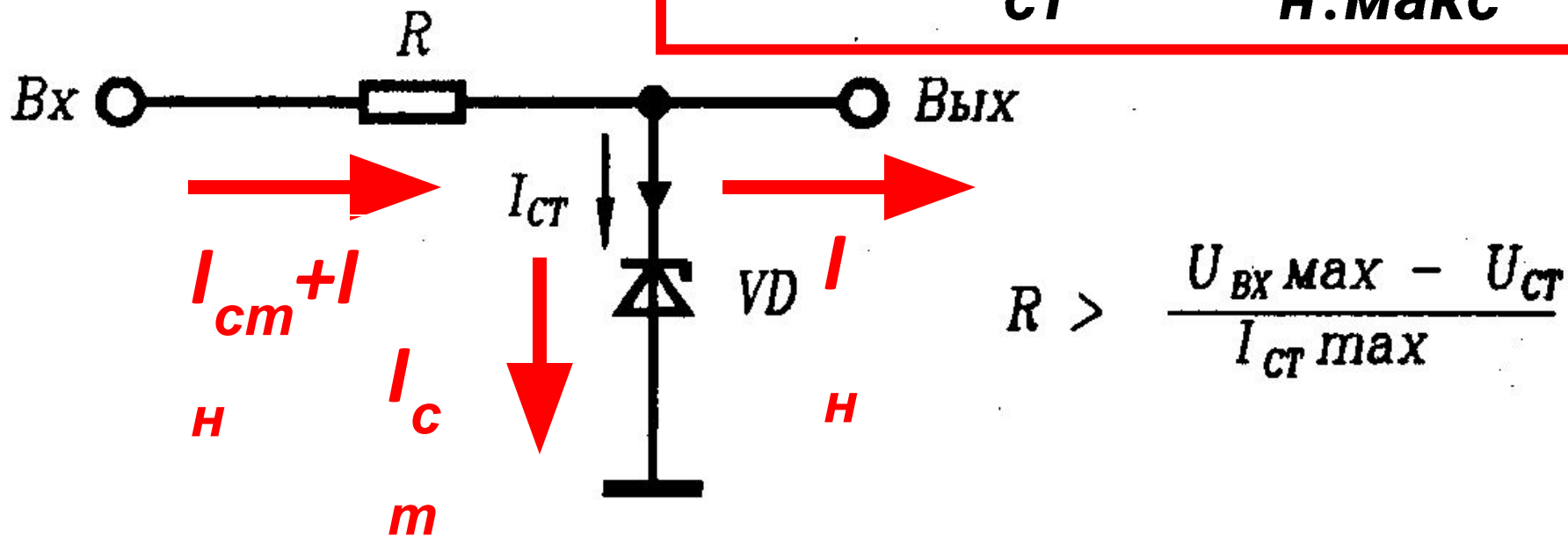
# Основные статические параметры стабилитрона



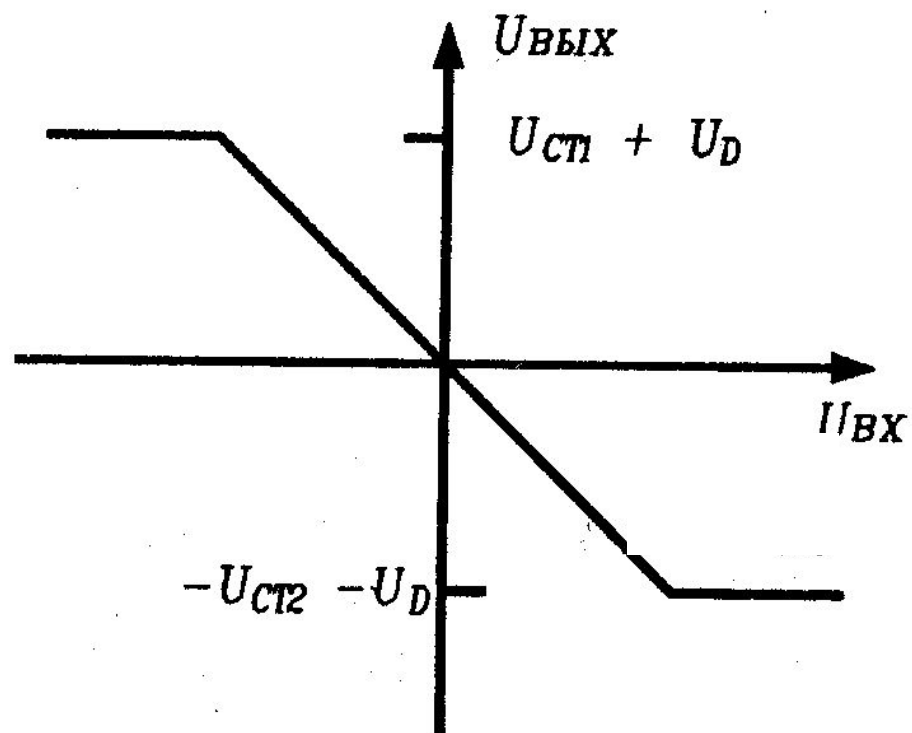
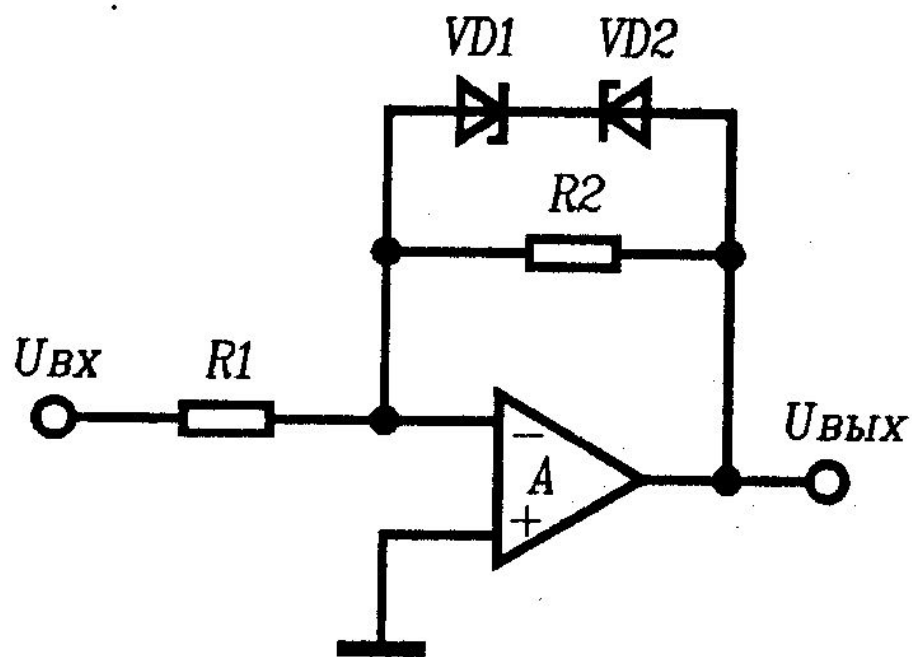
Линеаризованная характеристика стабилитрона ( а ) и его схема замещения ( б )

# Выбор ограничительного (гасящего) сопротивления

$$R = \frac{U_{\text{вх.макс}} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст}} + I_{\text{н.макс}}}$$



# Усилитель-ограничитель

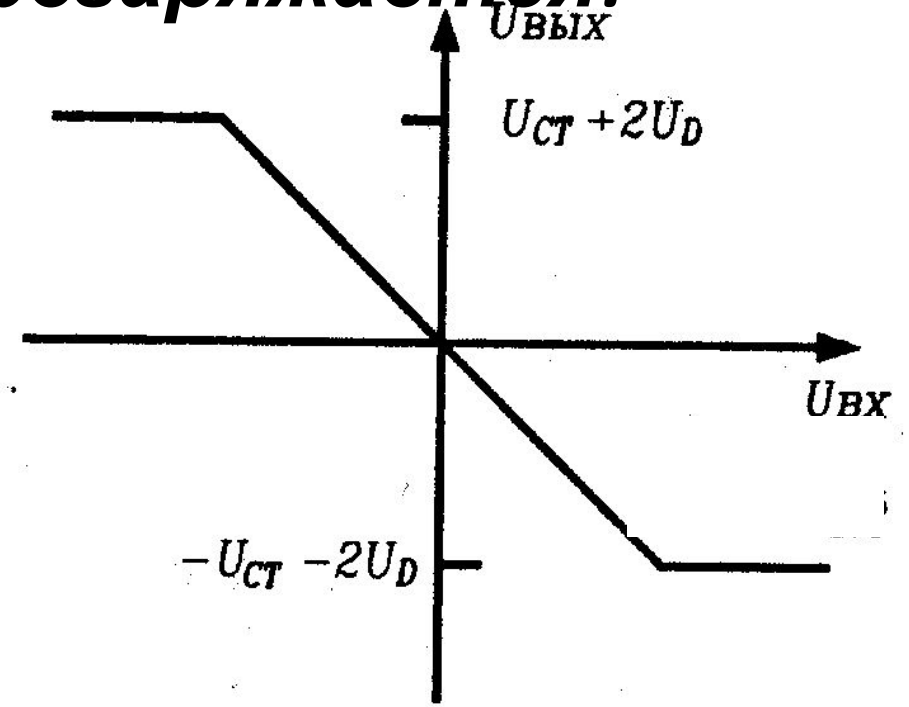
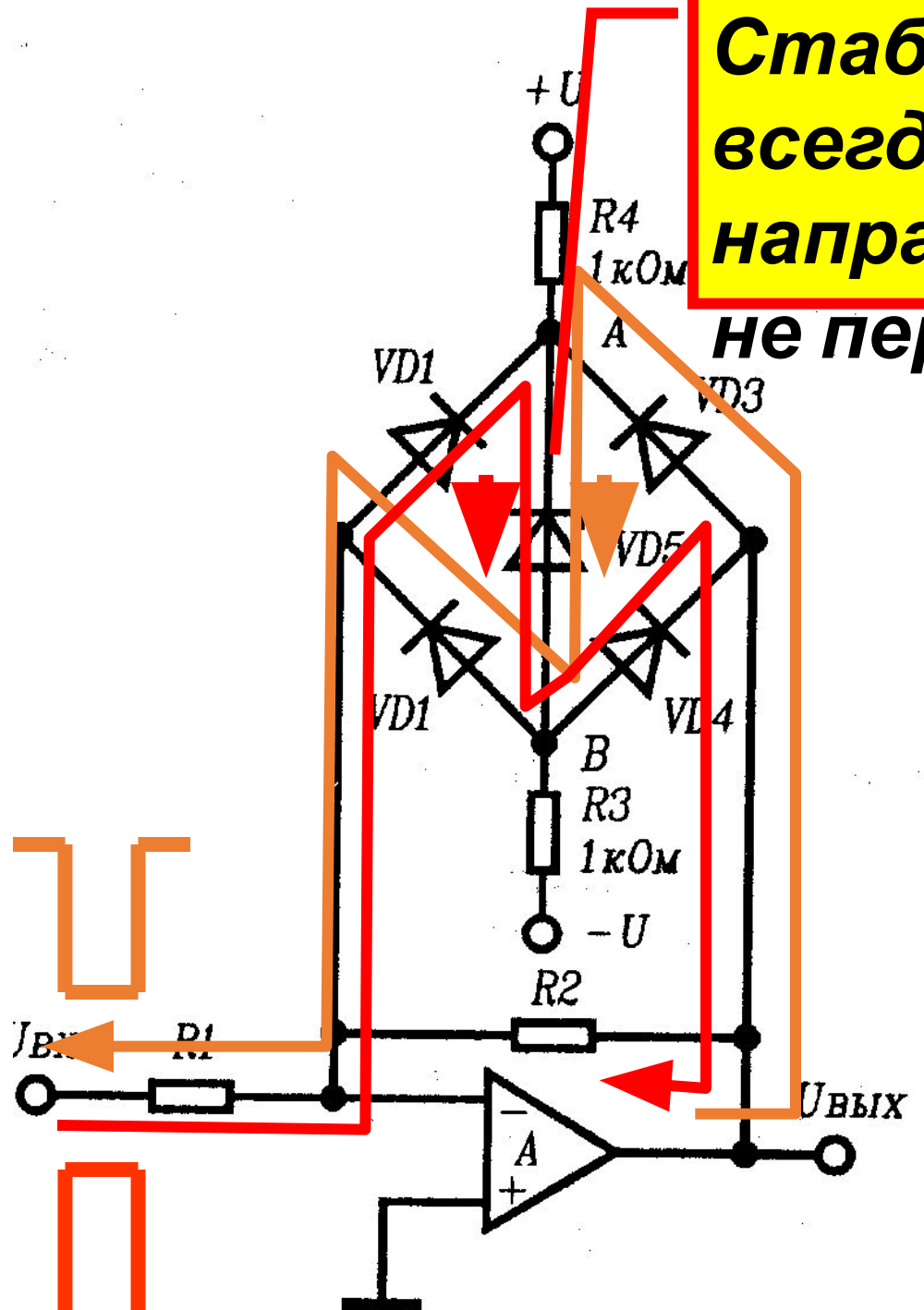


# Недостатки схемы

- Емкость *рп*- перехода **снижает быстродействие** из-за **шунтирования** резистора ОС и необходимости ее **перезаряда**;
- токи утечки диода **ограничивают чувствительность** усилителя.

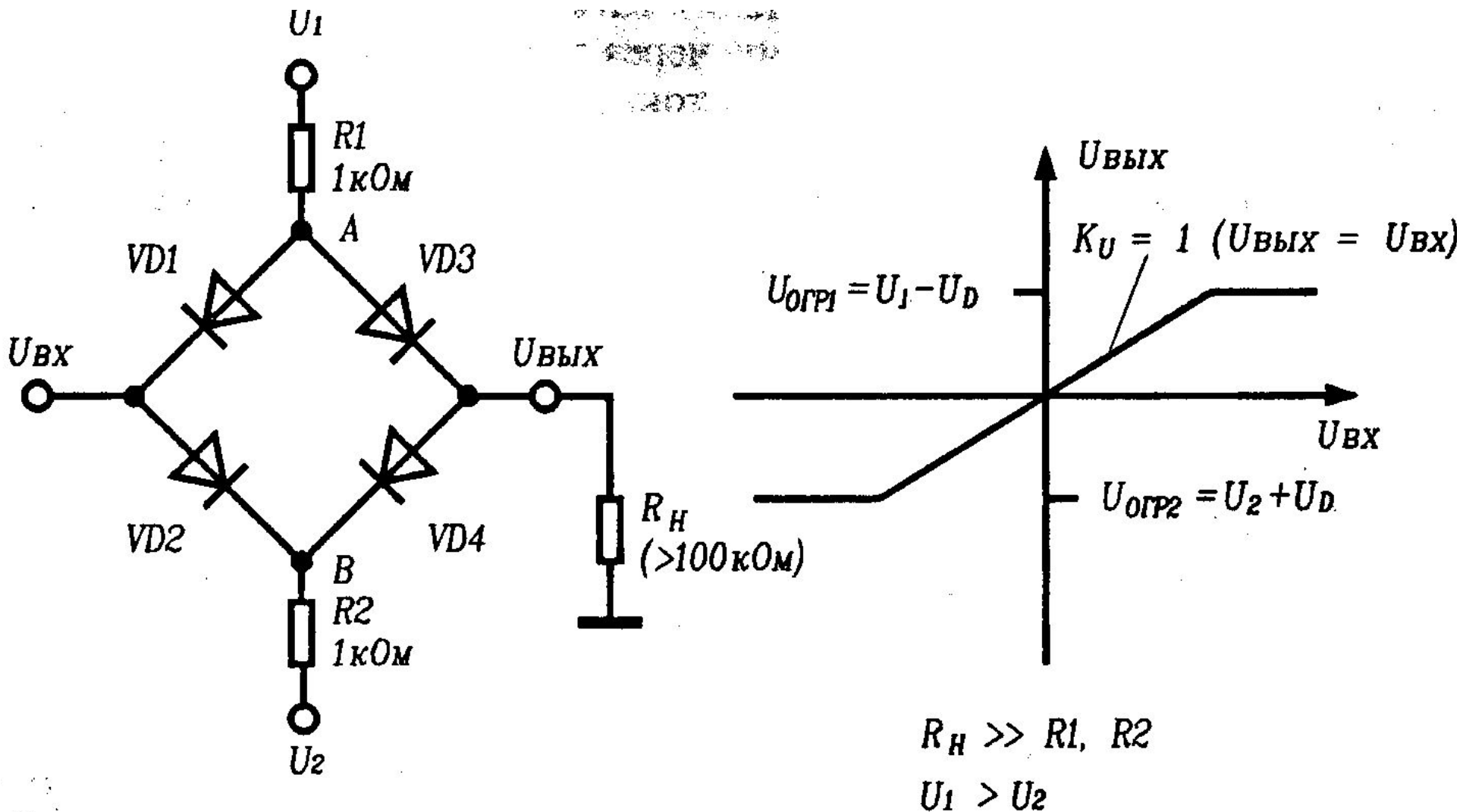
*Для их частичного устранения применяется схема ограничения с диодным мостом.*

**Стабилитрон смещен  
всегда в обратном  
направлении, его емкость  
не перезаряжается!**



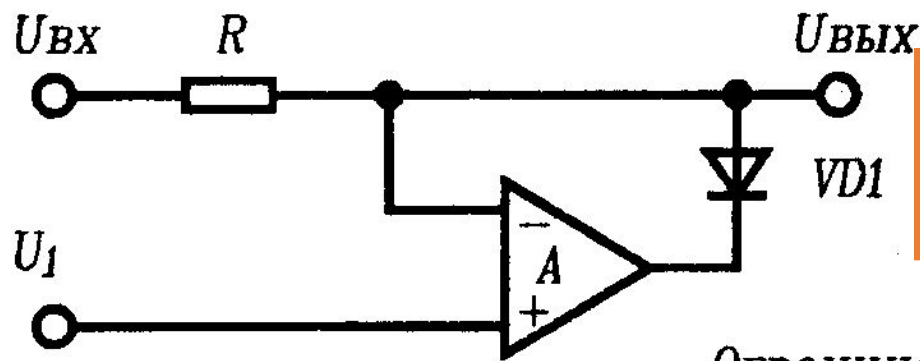
$U_{\text{СТ}}$  - напряжение стабилизации стабилитрона  $VD5$

# Диодный мостовой ограничитель



# Управляемый напряжением ограничитель на ОУ

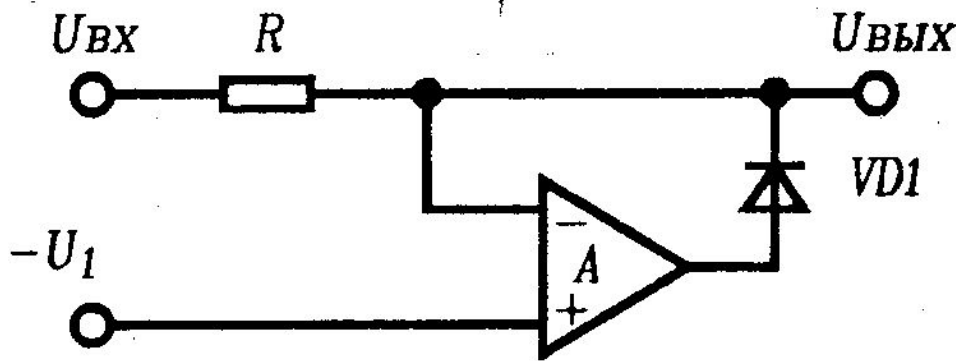
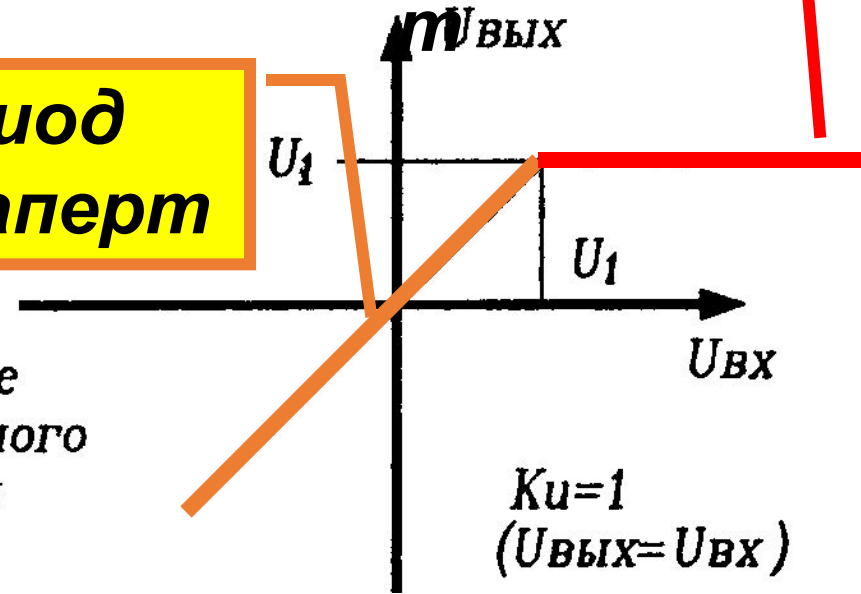
Диод открыт



Диод заперт

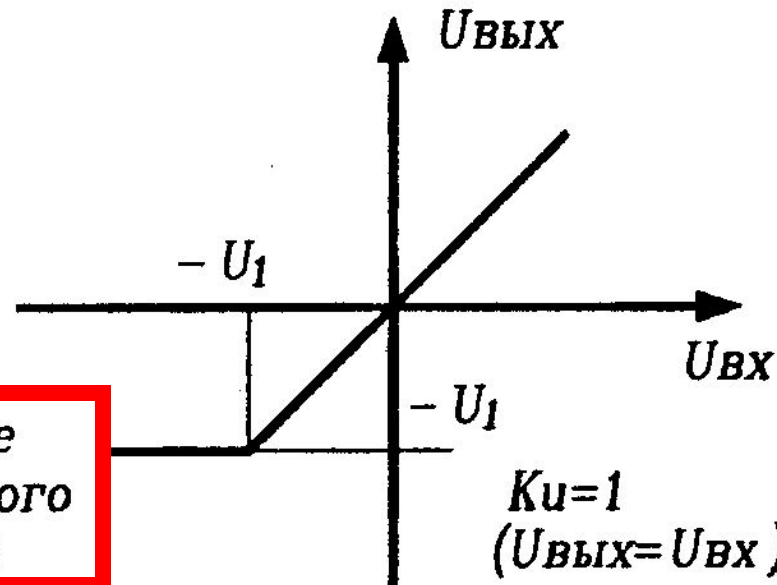
Ограничение положительного напряжения

(a)



Ограничение отрицательного напряжения

(б)



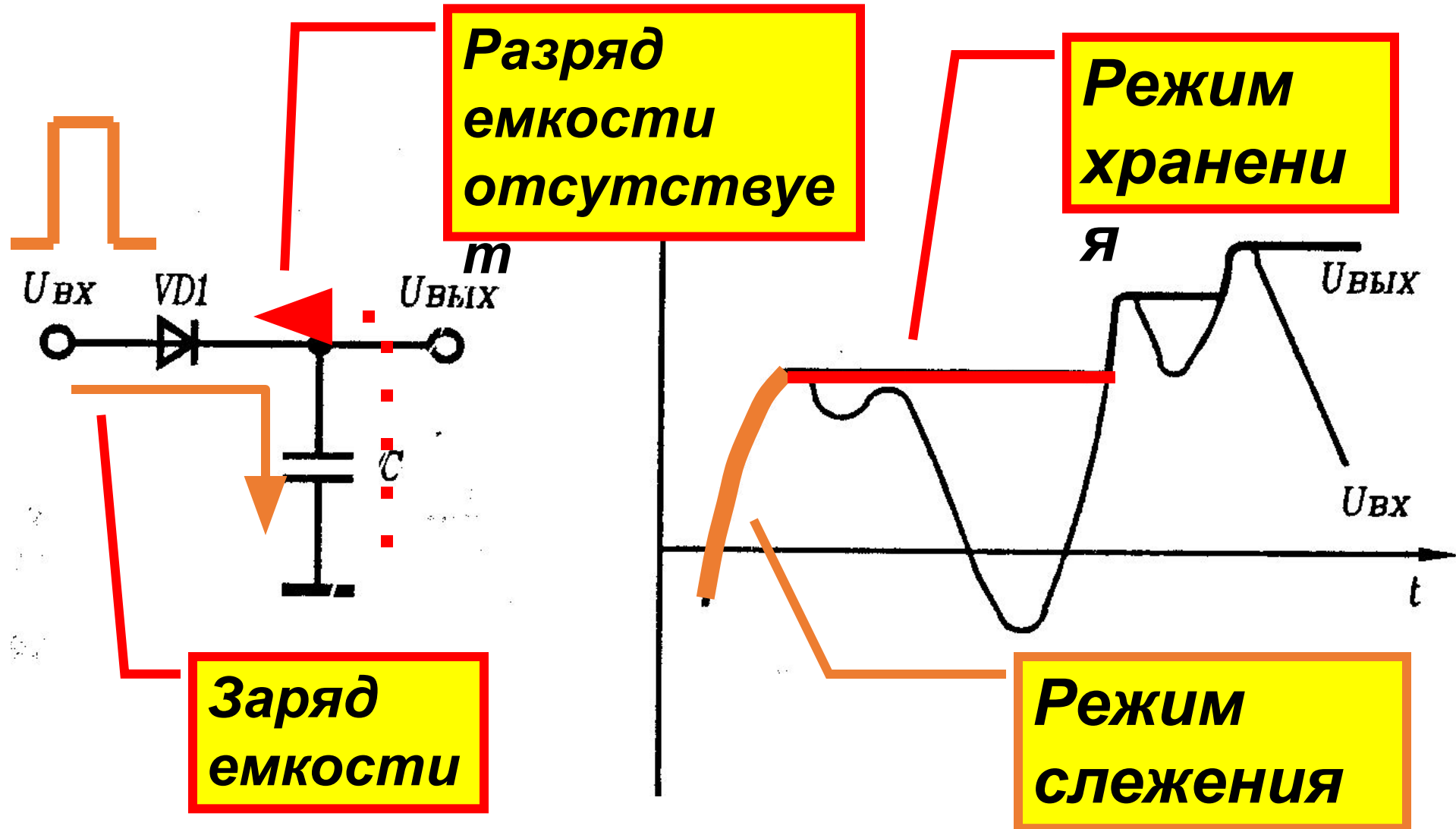


# детекторы и выпрямители

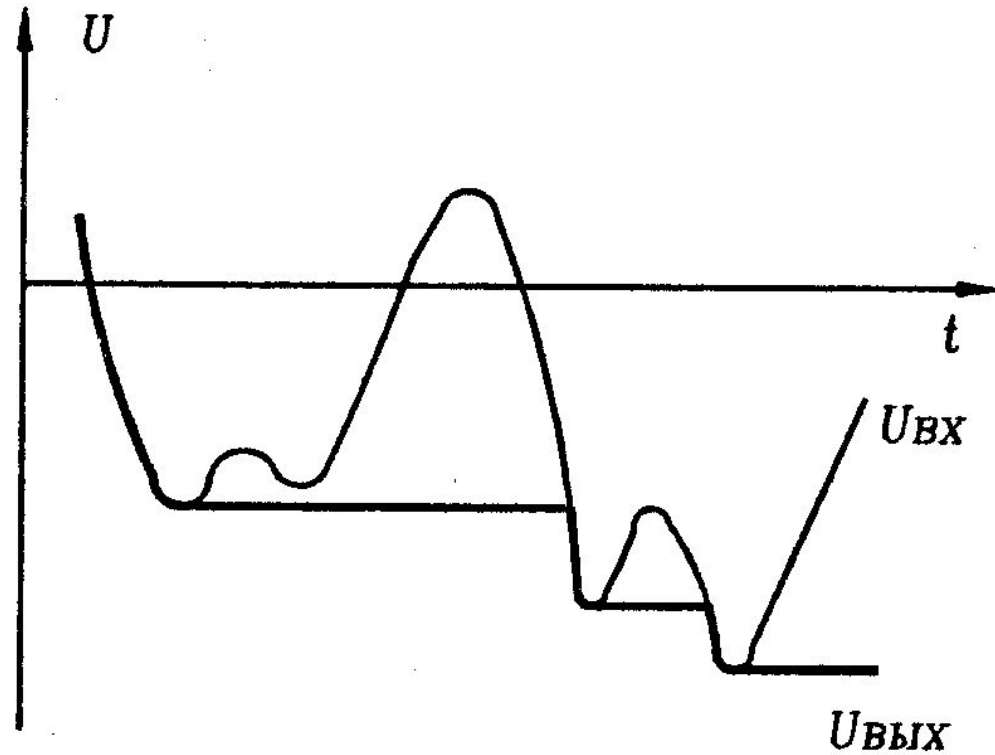
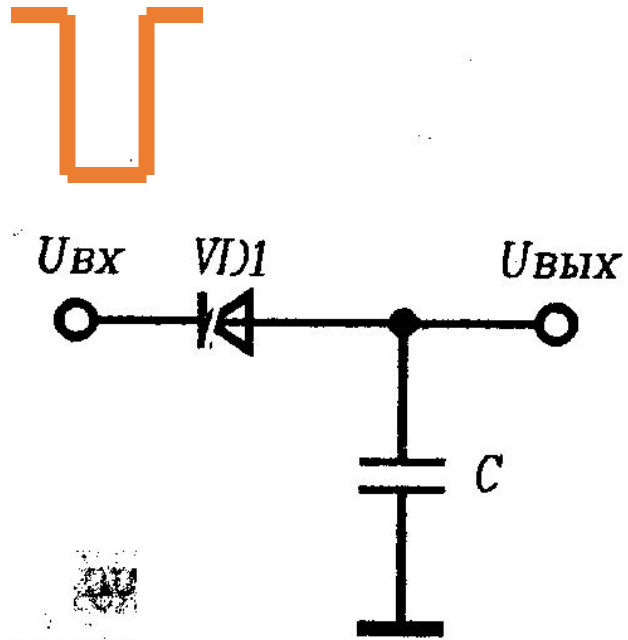
## 5.2. Пиковые детекторы.

Пиковый детектор предназначен для выделения максимального за некоторый интервал времени значения. Разновидностью пиковых детекторов являются амплитудные детекторы.

# Принцип выделения пикового напряжения



# Детектор минимумов

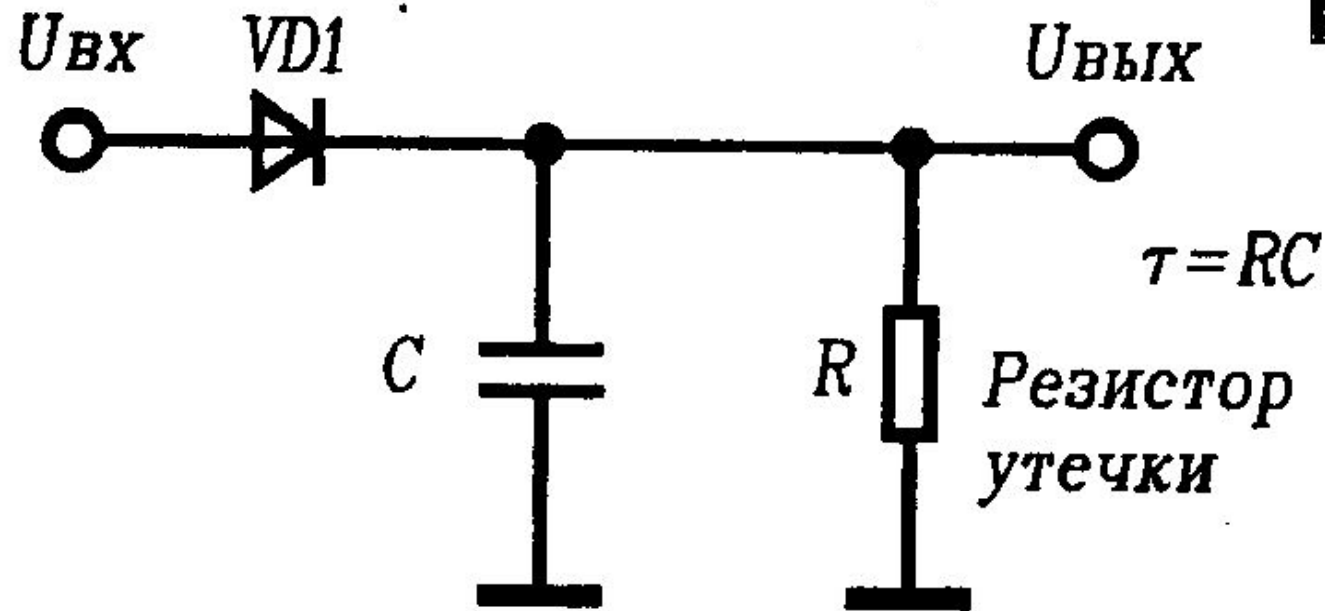
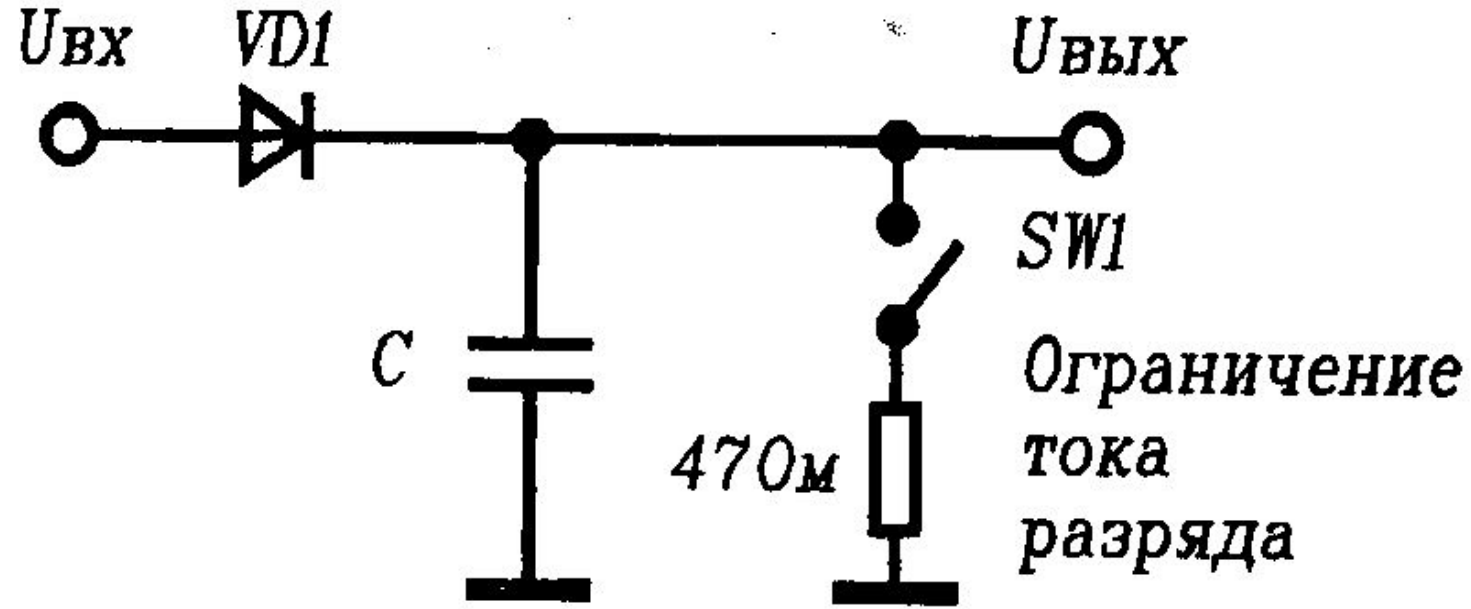


## Недостатки схемы:

- Напряжение на емкости в режиме хранения не остается постоянным, а уменьшается из-за **разряда емкости**;
- **Время заряда** емкости конечно, что определяет минимальную длительность обнаруживаемого сигнала;

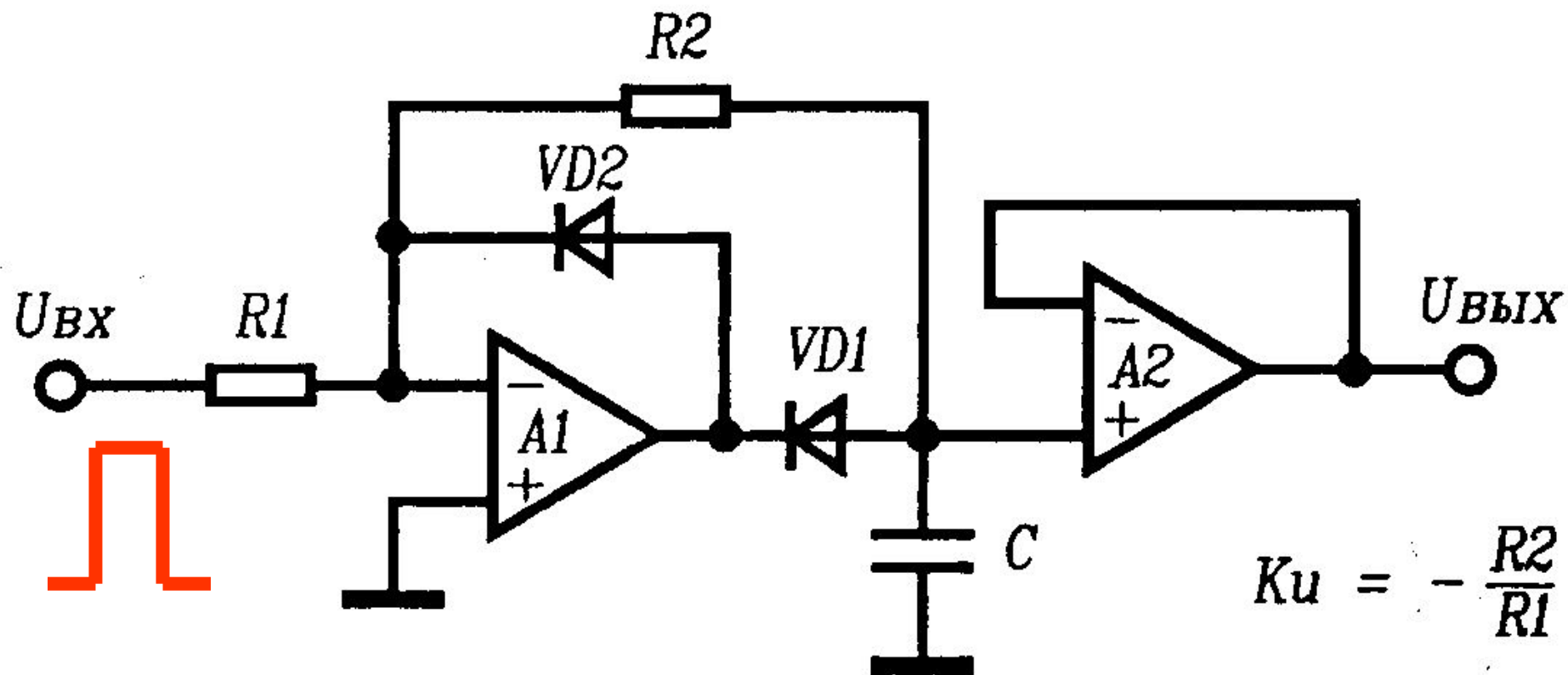
**Большая емкость гарантирует малую скорость разряда, но при этом скорость заряда также мала.**

# Сброс детектора



# Двухкаскадные пиковые детекторы.

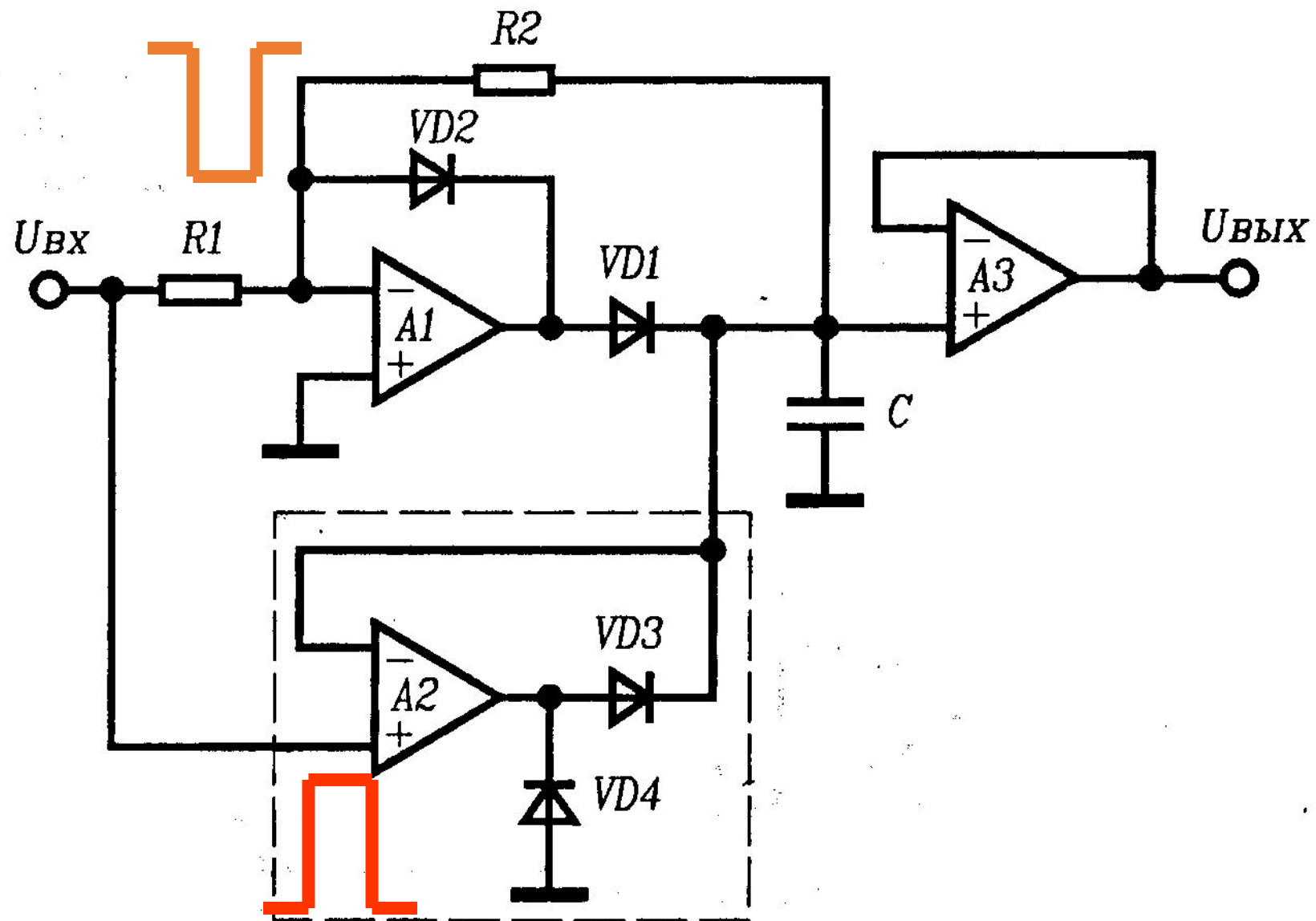
## Инвертирующий пиковый детектор



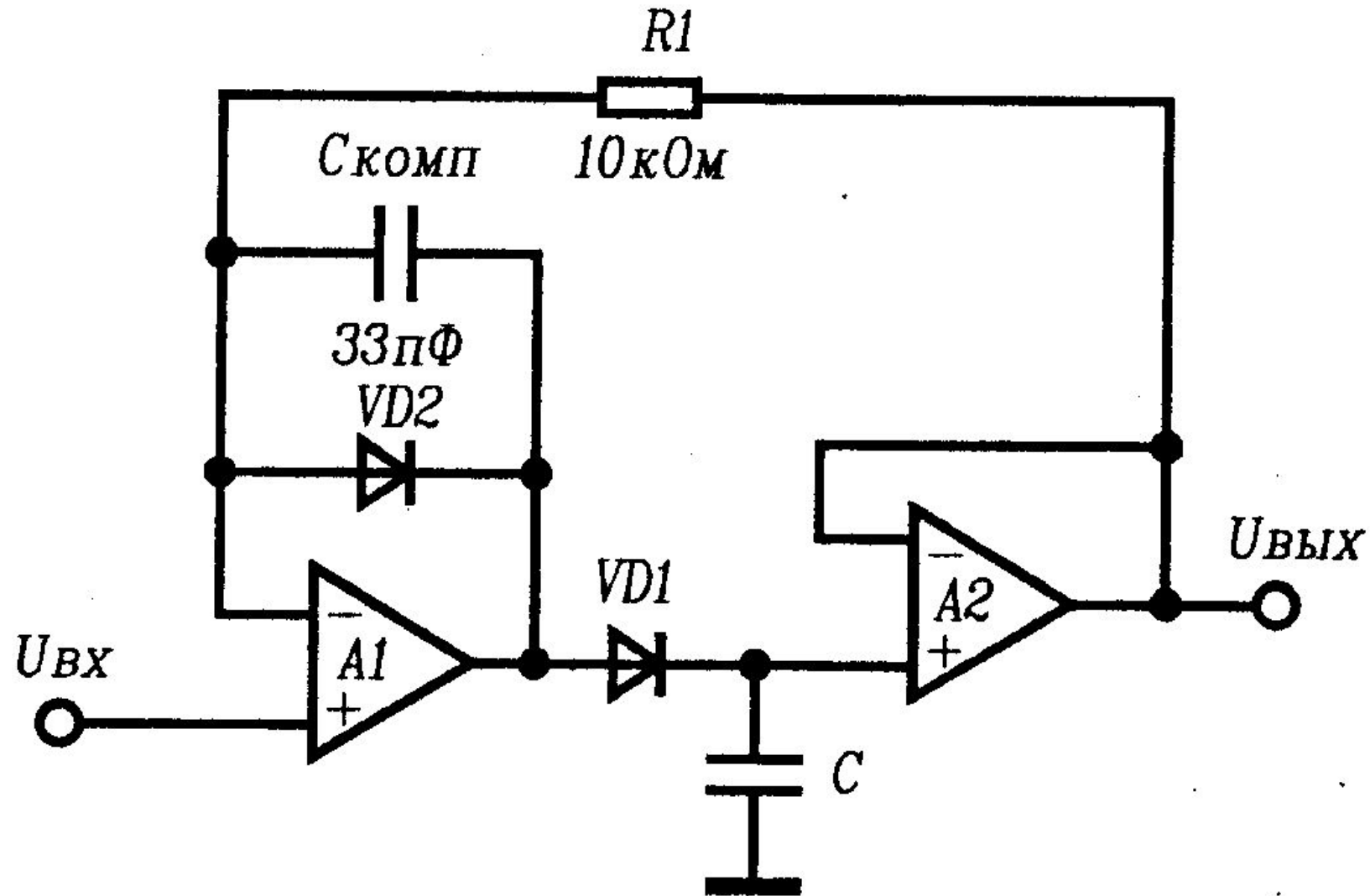
Школа Н.Ф.:

ФАКУЛЬТАТИВНО

# Пиковый детектор абсолютного значения

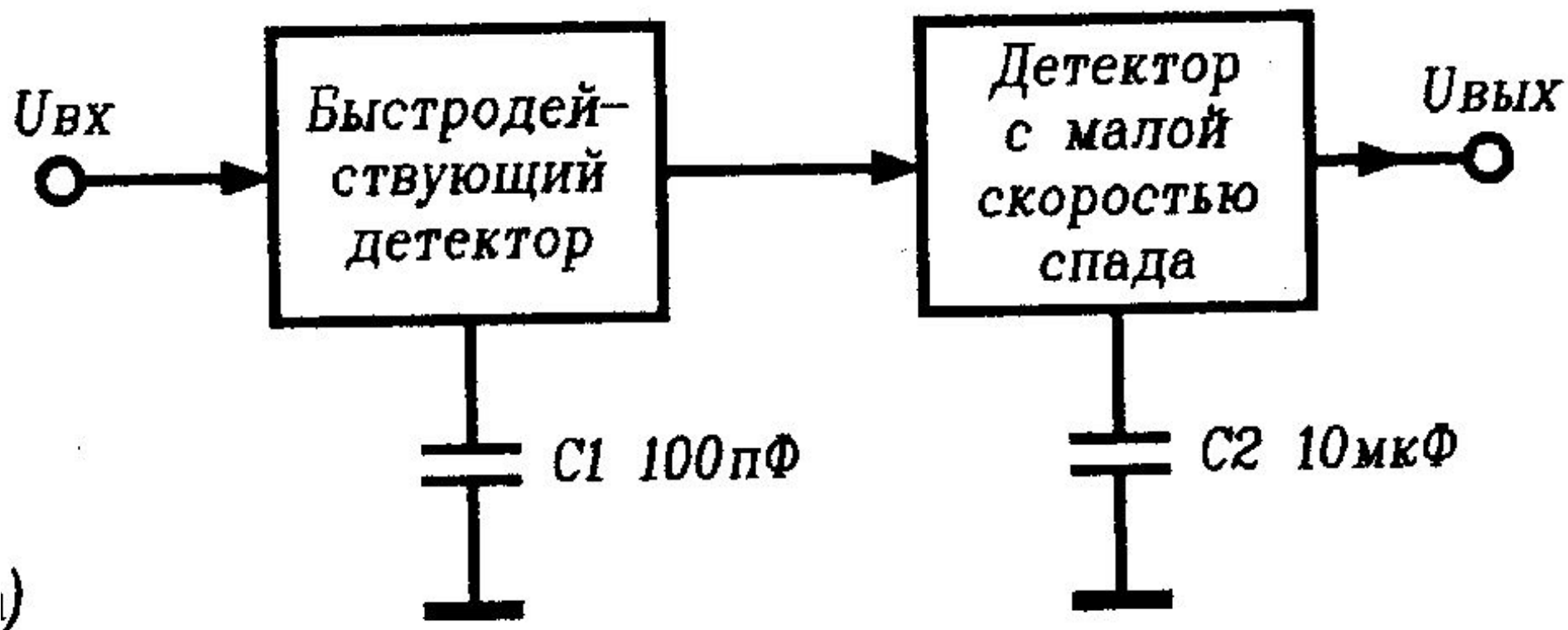


# Пиковый детектор с общей обратной связью





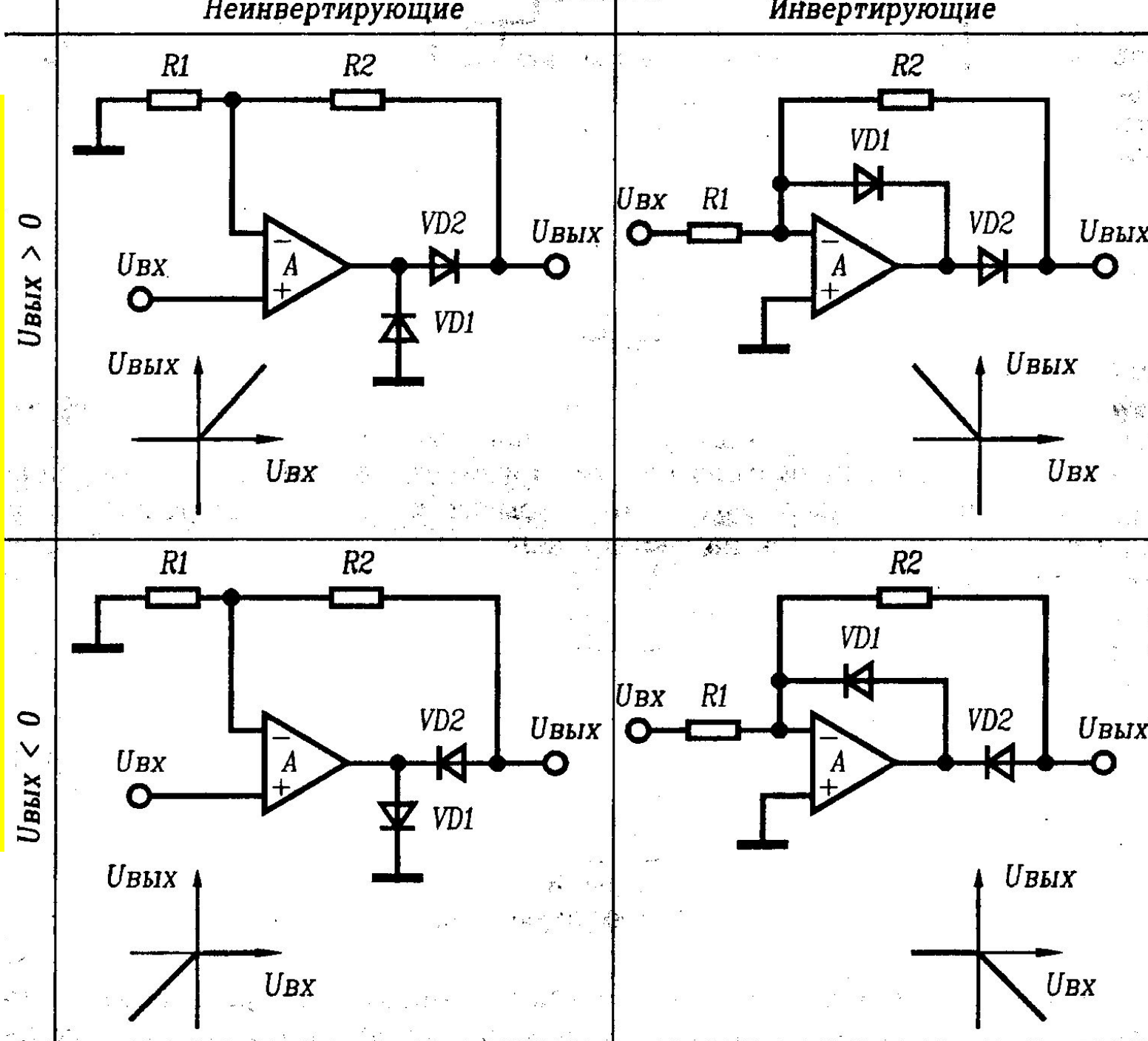
# Улучшение характеристик пиковых детекторов.



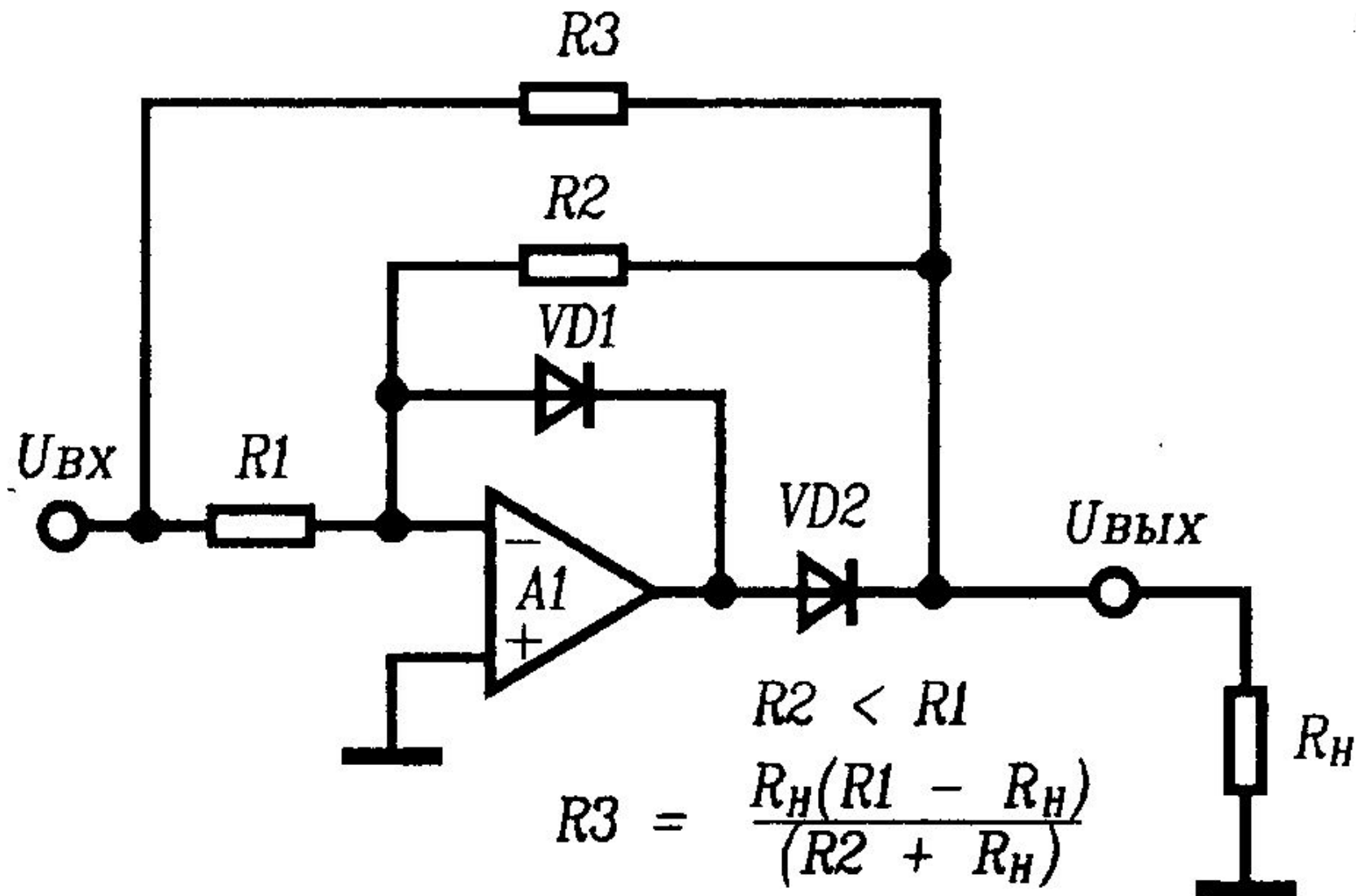
**5.3. Выпрямители. Прецизионные  
однополупериодные  
выпрямители.**

**Двухполупериодные выпрямители**

Одно  
полу  
пери  
одны  
е  
выпр  
ямит  
ели



# Двухполупериодные выпрямители



Для положительного сигнала:

$$K_U^+ = (R_2 || R_H) / (R_3 + (R_2 || R_H)) = (R_2 R_H) / (R_3 R_2 + R_3 R_H + R_2 R_H).$$

Для отрицательного сигнала:

$$K_U^- = -R_2 / R_1 .$$

Для того, чтобы  $K_U^+ = K_U^-$ , необходимо соблюдение условий:

$$R_3 = R_H(R_1 - R_2) / (R_2 + R_H)$$

или

$$R_1 = R_3 + R_2 \quad (\text{при } R_H = \infty).$$