

# ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ

А. Ильин

Радиолюбитель № 6-9, 1999

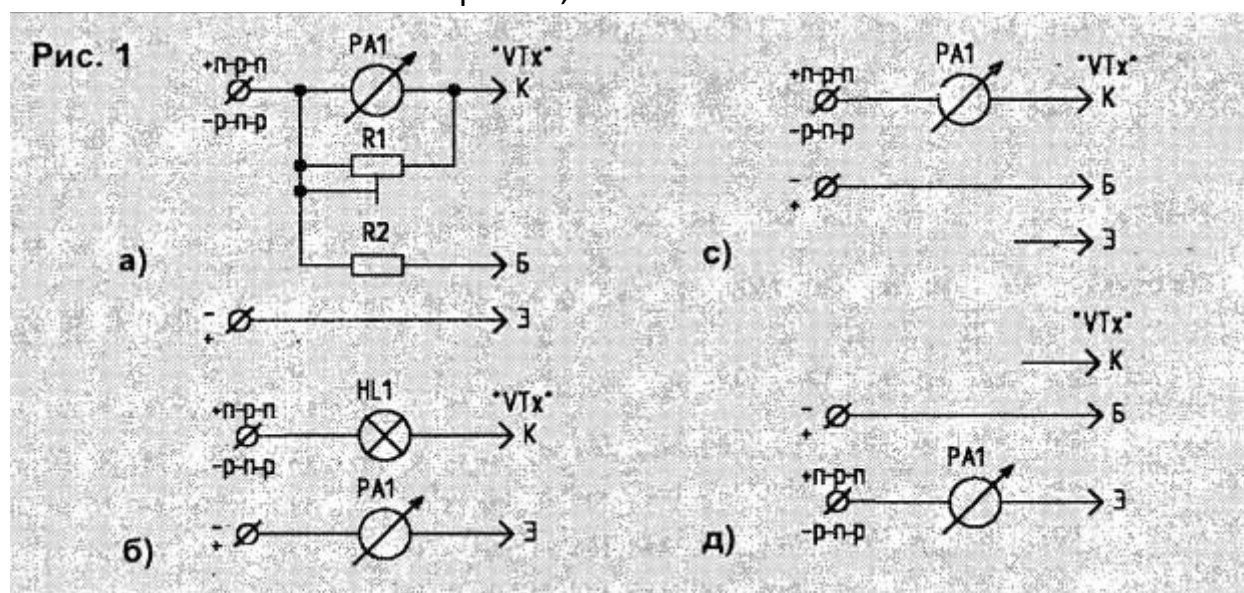
## БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

При проверке работоспособности биполярных транзисторов чаще всего ограничиваются измерением следующих параметров:

- статического коэффициента передачи тока базы  $V_{ст}$ ;
- обратного тока коллектора  $I_{КБО}$ ;
- обратного тока эмиттера  $I_{ЭБО}$ ;

Типовые схемы измерения этих параметров в большинстве простых устройств показаны на рис.1

Назначение элементов – на рис.1а, б:



R1 – добавочный резистор для изменения предела головки PF1;

R2 – задаёт ток базы проверяемого транзистора;

HL1 – предназначена для индикации пробоя транзистора.

В большинстве простых приборов  $V_{ст}$  определяется измерением тока коллектора при фиксированном токе базы. Точность таких приборов невысока, поскольку коэффициент передачи зависит от тока коллектора (эмиттера). Достаточно при этом измерить ток базы и судить по нему о величине параметра.

Коэффициенты передачи тока для различных схем включения связаны между собой следующим образом:

$$\beta = \frac{1}{1-\alpha}, \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером (на НЧ  $\beta = V_{ст}$ ). Другое обозначение этого параметра —  $h_{21э}$ ;

$\alpha$  — коэффициент передачи тока в схеме с общей базой,  $\alpha < 1$ .

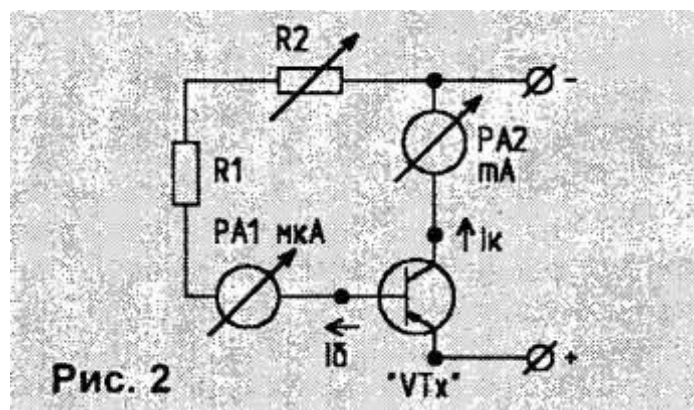
Если взять два значения параметра  $\alpha$ , равные 0.95 и 0.99, то при  $\alpha=0.95$  по формуле (1)  $\beta=19$ . А при увеличении значения  $\alpha$  всего на 0.04 -  $\beta=99$ .

Как видно из приведённого примера, при незначительном увеличении тока эмиттера, значение  $\beta$  увеличилось более чем в пять раз [7].

При простейших измерениях  $V_{CT}$  транзисторов, чтобы исключить влияние обратного тока коллектора  $I_{КБ0}$  на результаты вычисления применяют способ двух измерений. При двух значениях тока базы  $I_{Б1}$  и  $I_{Б2}$  измеряют коллекторные токи  $I_{К1}$   $I_{К2}$  после чего производят расчёт по формуле:

$$V_{CT} = \frac{I_{К1} - I_{К2}}{I_{Б1} - I_{Б2}}. \quad (2)$$

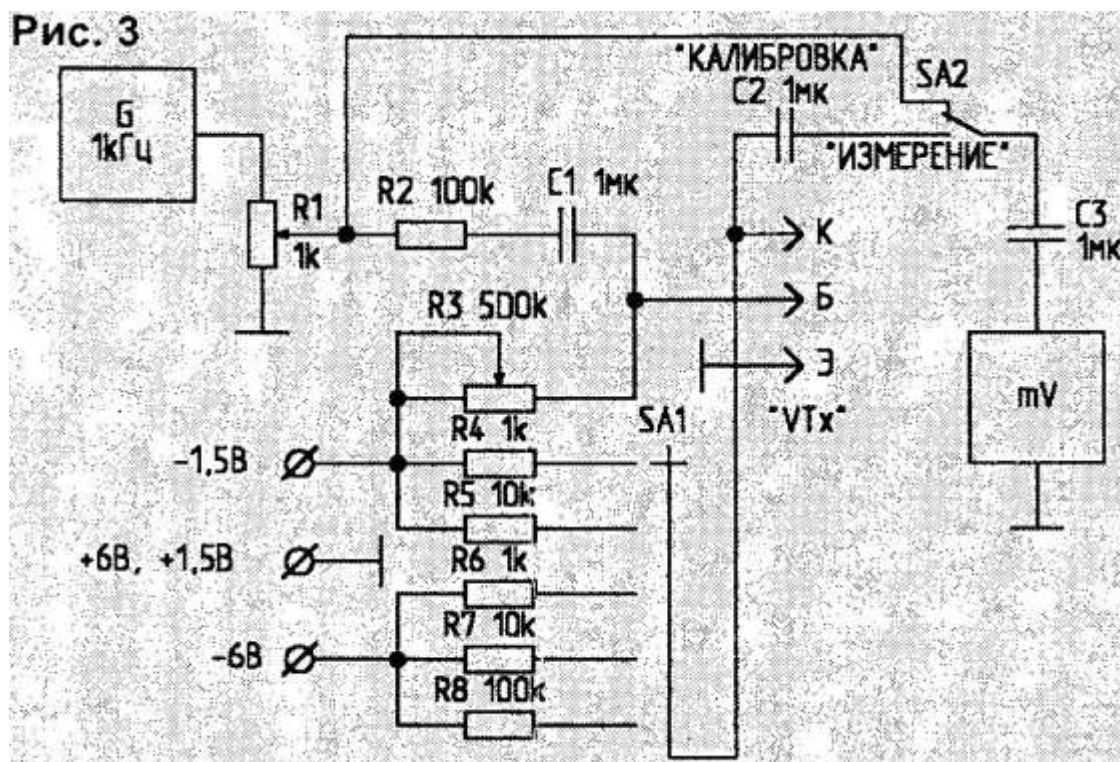
Другая схема измерений  $V_{CT}$  изображена на рис.2. Резистором R2 в цепи базы устанавливают ток  $I_B$ , который равен  $20 \div 100 \mu A$  для маломощных и  $1 \div 10 mA$  для мощных транзисторов.



Ток  $I_B$  контролируется прибором PA2 с пределом измерения  $200 \div 500 mA$ .  $V_{CT}$  вычисляют по формуле:

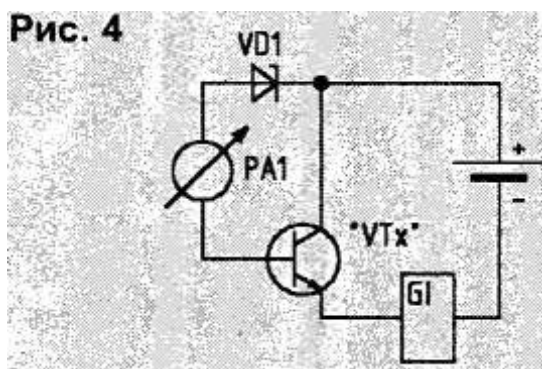
$$V_{CT} = \frac{I_K}{I_B - I_{КБ0}}. \quad (3)$$

Схема прибора для определения значения  $V_{CT}$  транзисторов **p-n-p** типа на переменном токе приведена на рис.3.



Выходное напряжение генератора равно 1V. Оно подаётся на базу проверяемого транзистора VT<sub>x</sub>. Установка режима проверяемого транзистора по постоянному току производится резистором R3. На коллектор переключателем SA1 можно подать напряжение 1.6 или 6 V, одновременно подключая различные нагрузочные резисторы R4...R8. Переключателем SA2 устанавливают режим “Калибровка” или “Измерение”. В режиме “Калибровка” напряжение генератора устанавливается равным 1V. В положении “Измерение” определяется величина переменного напряжения на резисторах R4...R8 в цепи коллектора.

В статье [6] приведена схема измерения  $V_{CT}$  ( $h_{21э}$ ) со стабилизацией тока эмиттера (коллектора). Функциональная схема измерителя приведена на рис.4.



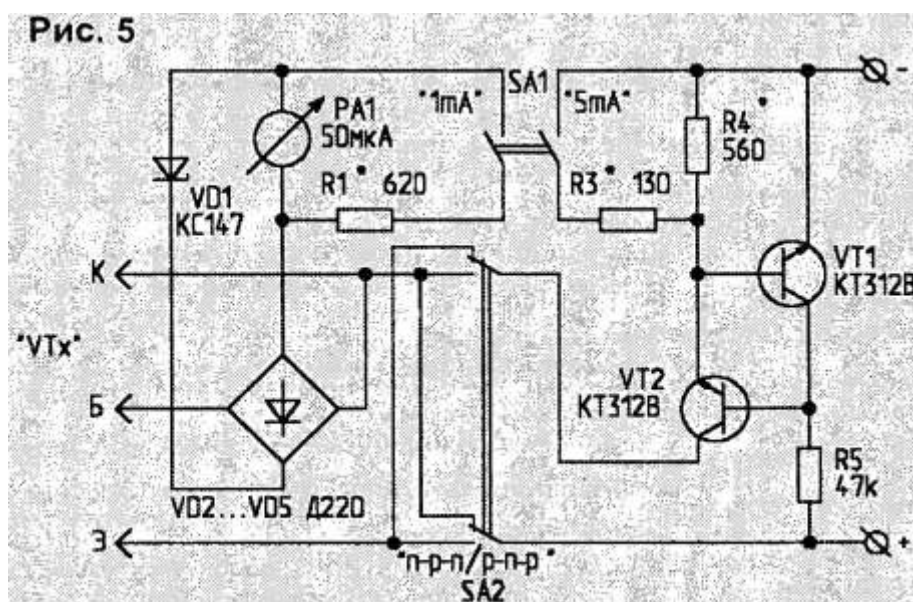
Ток эмиттера проверяемого транзистора VT<sub>x</sub> стабилизирован генератором тока G1. Напряжение коллектор-эмиттер транзистора фиксировано, поскольку равно сумме стабильных напряжений на стабилитроне VD1, эмиттерном переходе транзистора VT<sub>x</sub> и индикаторе PA1. Сильная ООС через VD1, PA1. Сильная ООС через VD1, PA1 удерживает транзистор в активном режиме, для которого справедливы отношения:

$$I_K = I_Э + I_Б, \quad (4)$$

$$h_{21э} = \frac{I_K}{I_Б} = \frac{I_Э - I_Б}{I_Б} = \frac{I_Э}{I_Б} - 1, \quad (5)$$

где  $I_K$ ,  $I_Э$ ,  $I_Б$  — соответствующие токи транзистора (mA).

Принципиальная схема такого измерителя  $V_{CT}$  приведена на рис.5.



Переключателем SA1 устанавливают ток эмиттера (1 или 5 мА) и подключают шунт R1 для уменьшения чувствительности индикатора PA1. Для упрощения коммутации в цепь измерения тока базы введен мост VD2...VD5. Напряжение коллектор-эмиттер определяется суммой напряжений на последовательно включенных стабилитроне VD1, двух диодах моста VD2...VD5 и эмиттерном переходе проверяемого транзистора. На транзисторах VT1, VT2 выполнен генератор стабильного тока (ГСТ). Питание от источника передаётся на вход ГСТ, который задаёт ток через проверяемый транзистор VT<sub>x</sub>. Переключатель SA2 показан на схеме в положении “*n-p-n*”.

Во многих простых измерительных приборах при измерении значений прямых и обратных токов коллектора и эмиттера (рис.1) в цепях измерения не стоят токоограничительные резисторы, что может отрицательно сказаться как на проверяемом транзисторе, так и на индикаторе PA1 в случае неисправного транзистора. Кроме того, в описаниях этих приборов не оговаривается, что при измерениях  $I_{КБ0}$ ,  $I_{ЭБ0}$  эти измерения необходимо производить достаточно длительное время (около 30с). Длительность времени измерения связана с тем, что значение и устойчивость  $I_{ЭБ0}$  позволяют судить об исправности эмиттерного перехода транзистора, а ток  $I_{КБ0}$  характеризует температурную стабильность и надёжность работы транзистора, а также устойчивость его параметров во времени. Токи  $I_{КБ0}$ ,  $I_{ЭБ0}$  при их измерениях не должны изменяться (“плыть”). В противном случае это может говорить о неисправности транзистора. Ток  $I_{КБ0}$  не должен превышать 30 и 500  $\mu$ А для НЧ-транзисторов малой и большой мощности соответственно, 5  $\mu$ А — для ВЧ-транзисторов.

Схема измерения  $I_{КБ0}$ ,  $I_{ЭБ0}$  приведена на рис.6.

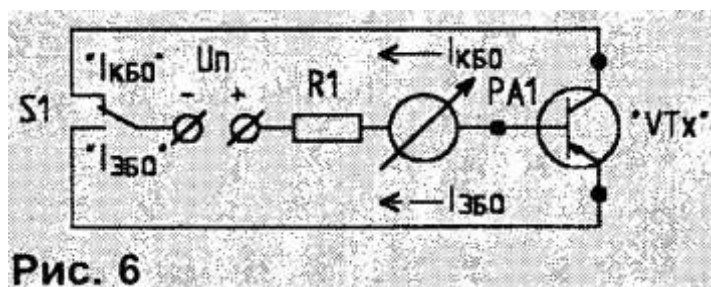


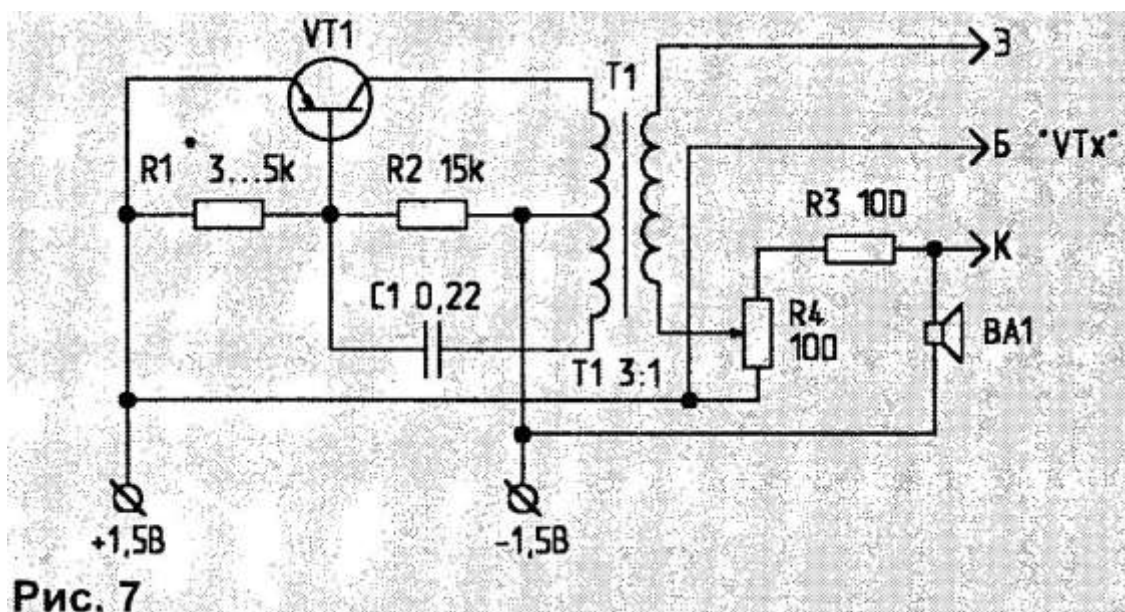
Рис. 6

Резистор R1 ограничивает ток через микроамперметр до значения тока полного отклонения в случае короткого замыкания переходов транзистора. Резистор R1 должен иметь сопротивление:

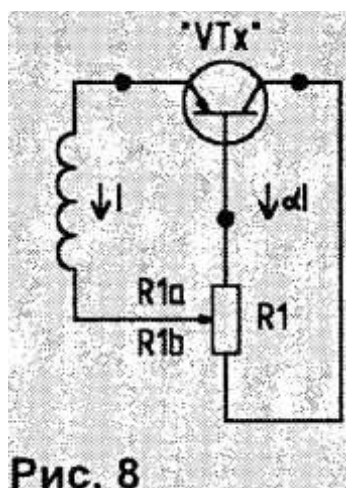
$$R1 \approx \frac{U_n}{I_u}. \quad (6)$$

Например при  $U_n=4.5V$   $I_u=100\mu A$ ,  $R1=45K\Omega$ . В этом случае отклонение стрелки прибора до конца шкалы будет являться признаком пробоя *p-n* перехода, а отсутствие показаний — обрыва этой цепи.

Коэффициент передачи тока можно определить по схеме рис.7, работающей



“по методу нуля”. В схеме на транзисторе VT1 собран генератор частоты 1 КГц. Выходное напряжение генератора подводится к проверяемому транзистору, включенному по схеме с общей базой (ОБ). На рис.8 показана главная часть схемы.



Эмиттерная и коллекторная цепи проверяемого транзистора соединены друг с другом через резистор R1 (R4 на схеме рис.7). В левом контуре течёт ток I, в правом —  $\alpha I$ . Ток через резистор R1 равен разности между этими токами:

$$I_1 = I - \alpha I = I(1 - \alpha), \quad (7)$$

Теперь определим падение напряжения на обеих частях резистора R1 (R1a и R1b):

$$U_{1a} = R_{1a} \cdot (I - \alpha I), \quad (8)$$

$$U_{1b} = R_{1b} \cdot \alpha I. \quad (9)$$

Вращением ручки движка резистора R1 добиваются равенства падений напряжений на R1a и R1b:

$$R_{1a} \cdot (I - \alpha I) = R_{1b} \cdot \alpha I, \quad (10)$$

при котором звуковой тон в телефоне пропадёт. Отсюда коэффициент передачи тока  $\alpha$  равен:

$$\alpha = \frac{R1_a}{R1_a + R1_b}. \quad (11)$$

В схему рис.7 для растяжки диапазона включен резистор R3. Поэтому при определении значения  $\alpha$  надо пользоваться формулой:

$$\alpha = \frac{R3 + R4_a}{R3 + R4_a + R4_b}. \quad (12)$$

**При расчётах схем иногда необходимо знать  $h$ -параметры транзисторов:**

- $h_{11}$  — входное сопротивление. Представляет собой входное сопротивление транзистора переменному току при коротком замыкании на выходе;
- $h_{12}$  — коэффициент обратной связи по напряжению. Показывает какая доля выходного переменного напряжения передаётся на вход транзистора вследствие обратной связи в нём;
- $h_{21}$  — коэффициент передачи тока. Показывает усиление переменного тока транзистором в режиме работы без нагрузки;
- $h_{22}$  — выходная проводимость. Представляет собой внутреннюю проводимость для переменного тока между выходными зажимами транзистора.

Необходимо помнить, что  $h$ -параметры определяются для малых сигналов, поэтому использование их для больших сигналов даёт значительные погрешности. В справочниках обычно ограничиваются только указанием параметра  $h_{21э}$ , который имеет большой разброс. Индекс после наименования параметра показывает, что этот параметр определяется для схемы с общим эмиттером.

Схема измерения параметра  $h_{11б}$  показана на рис.9.

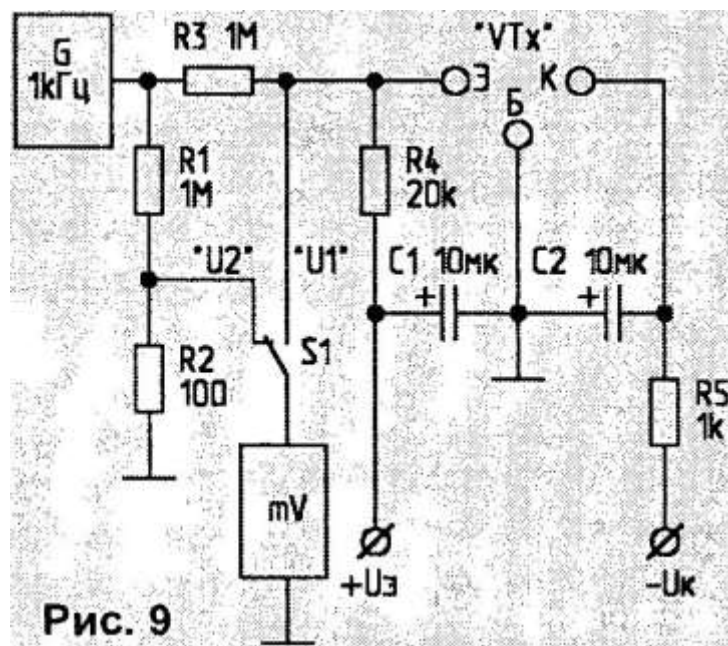


Рис. 9

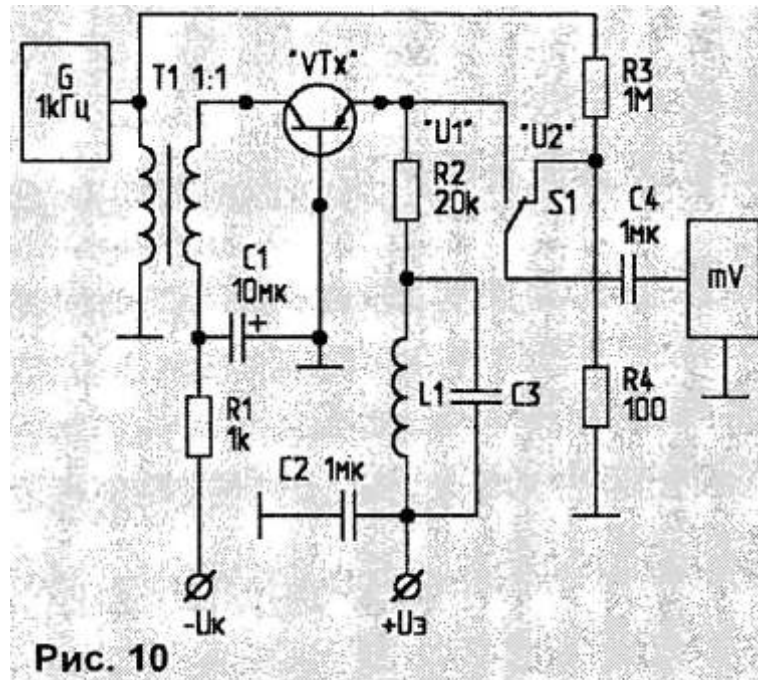
На измеряемый транзистор VT<sub>x</sub> (типа **p-n-p**) и эталонный резистор R2 подаётся сигнал 1 КГц с выхода генератора G. Падение напряжения на них измеряют милливольтметром. Параметр  $h_{11б}$  рассчитывается по формуле



$$h_{11Б} = \frac{U_1}{U_2} \cdot 100(\text{Ом}). \quad (13)$$

Выход транзистора закорачивается при помощи электролитического конденсатора достаточно большой ёмкости C2.

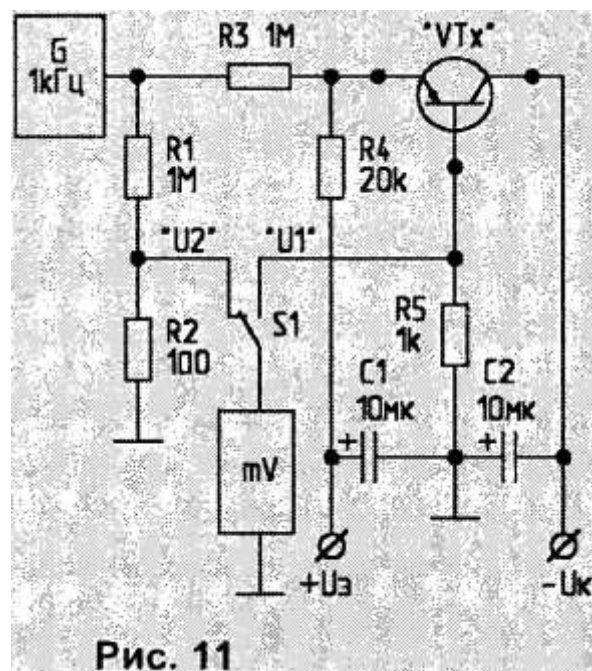
Схема измерения параметра  $h_{12Б}$  показана на рис.10.



Определяется он как отношение напряжений. К коллектору транзистора через трансформатор T1 подводится сигнал с выхода генератора G/ Измеряют напряжение между эмиттером и базой  $U_1$ , а также часть (1/10000) напряжения генератора  $U_2$ . Параметр  $h_{12Б}$  определяют по формуле

$$h_{12Б} = \frac{U_1}{U_2} \cdot 10^{-4}. \quad (14)$$

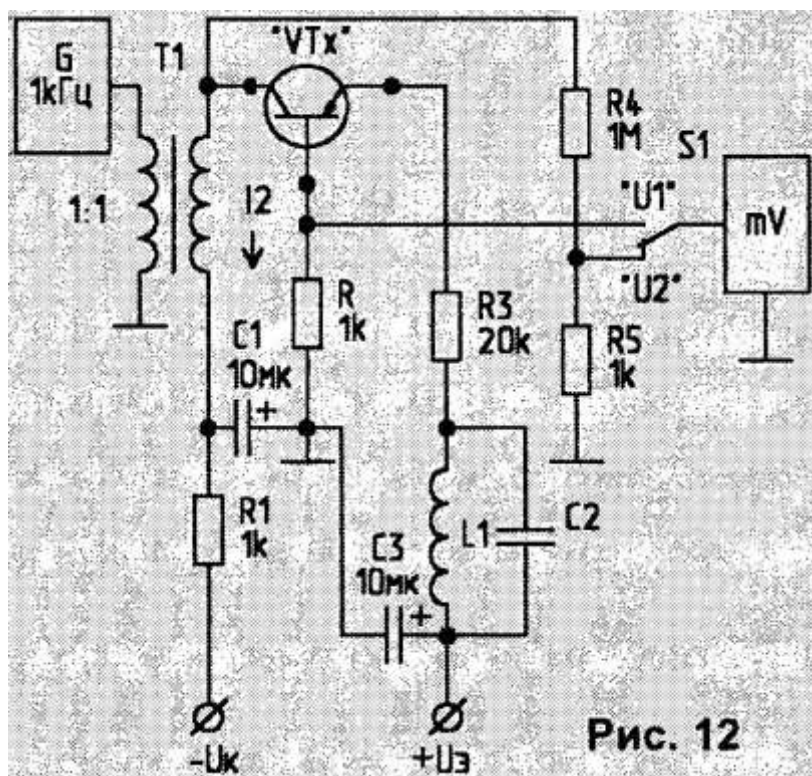
Параметр  $h_{21Б}$  измеряется по схеме рис.11.



При закороченной цепи коллектора измеряют напряжение на резисторе R5 в цепи базы (U1). Это напряжение пропорционально току базы. Затем измеряют часть (1/10000) напряжения генератора (U2). Расчёт производится по формуле:

$$h_{21Б} = 0.1 \cdot \frac{U_1}{U_2} - 1. \quad (15)$$

Параметр  $h_{22Б}$  измеряется по схеме рис.12



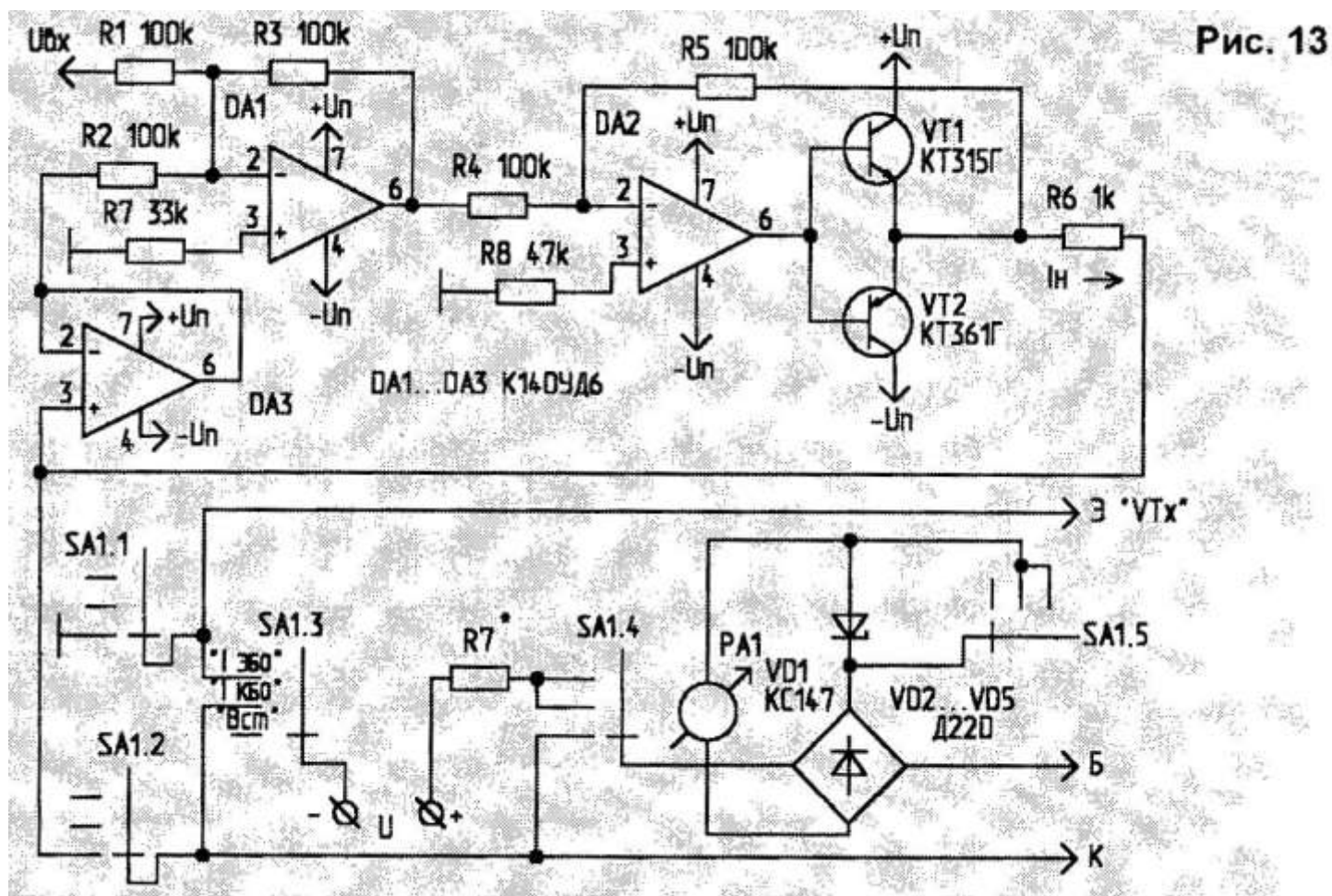
при закороченном входе. С помощью милливольтметра измеряют напряжение  $U_2$ , равное 1/1000 напряжения генератора, и  $U_1$  которое пропорционально току  $I_2$ . Вход закорачивается с помощью конденсатора большой ёмкости. Расчёт производится по формуле:

$$h_{22Б} = \frac{U_1}{U_2} \cdot 10^{-6}. \quad (16)$$

Данные трансформатора T1 и катушки L1 для схем рис.10 и 12 следующие. T1 намотан на ферритовом сердечнике с магнитной проницаемостью  $\mu=2000$ . Число витков обмоток — по 2500, провод — ПЭВ 0.1. Контур L1, C3 (L1, C2) должен быть настроен на частоту генератора (1 КГц). При индуктивности L1 равной 100 мГн, ёмкость конденастора должна быть 253 нФ.

Для измерения параметров  $V_{ст}$ ,  $I_{кбо}$ ,  $I_{эбо}$  на постоянном токе предлагаю схему, приведённую на рис.13, составленную из схем рис.5 и 6. Для упрощения коммутации вместо однополярного ГСТ применён двухполярный [11].





Описание измерительной части схемы приводилось выше. Ограничусь описанием работы ГСТ. В схеме ГСТ выходной ток  $I_H$  в точности постарается форму входного напряжения  $U_{BX}$  и определяется выражением:

$$I_H = \frac{(U_{BX} + U_H) - U_H}{R6} = \frac{U_{BX}}{R6}. \quad (17)$$

При указанных на схеме номиналах источник тока преобразует входное напряжение диапазона от -10 до +10 V в ток -10 до +10 mA. Для достижения высокой точности преобразования резисторы R1...R6 должны иметь допуск не хуже 1%. Недостаток схемы — ограничение на величину выходного напряжения, связанное с максимальным выходным напряжением ОУ и определяемое неравенствами

$$U_{BX} + U_H < U_{ВЫХ} \approx U_{П}, \quad (18)$$

$$U_{BX} + U_H < I_H \cdot R6 + I_H \cdot R_H < U - U_{КЭ}, \quad (19)$$

где  $U - U_{ВЫХ} \approx U$ .

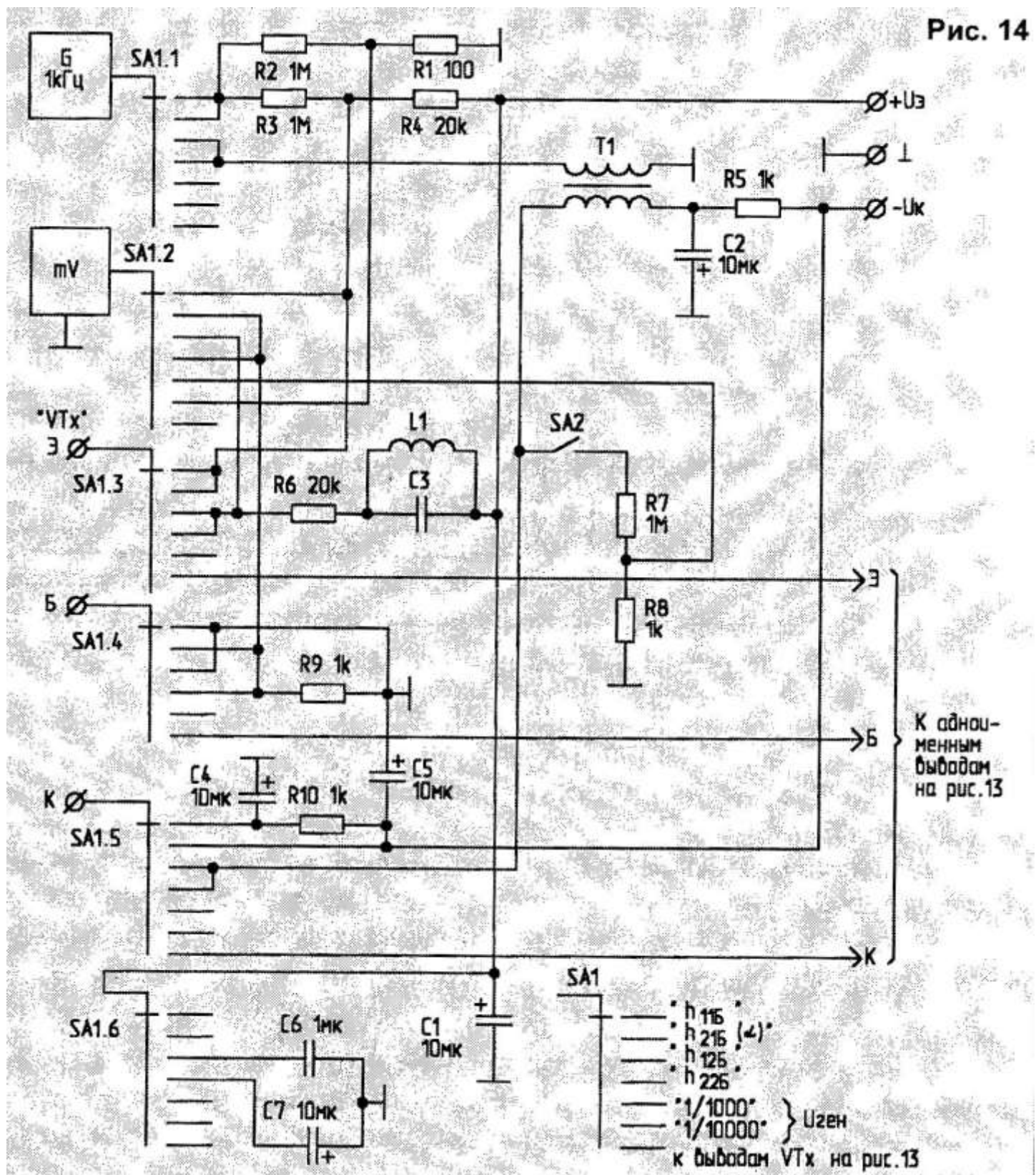
При  $U_{П} = U$  остаётся одно неравенство:

$$U_{BX} + U_H < U. \quad (20)$$

В схеме ГСТ можно использовать практически любые ОУ с соответствующими цепями коррекции. Следует учитывать, что более высокая точность преобразования напряже-

ния в ток получается при использовании ОУ с малыми входными токами напряжения смещения. В качестве регулирующих транзисторов VT1, VT2 можно взять любые маломощные транзисторы с максимальным током коллектора 20...150 мА.

Соединив схемы, приведённые на рис.9...12, в одну, можно изготовить прибор для измерения  $h$ -параметров транзисторов. Схема прибора представлена на рис.14.



Описание её не приводится, т.к. выше были достаточно подробно описаны схемы определения соответствующих параметров. При проведении измерений транзисторов

структуры ***n-p-n*** полярность напряжения питания в схемах рис.9...12 и 14 необходимо сменить на противоположную.

При объединении схем рис.13 и 14 можно собрать прибор для измерения семи параметров транзисторов:  $I_{ЭБ0}$ ,  $I_{КБ0}$ ,  $V_{СТ}$ ,  $h_{11Б}$ ,  $h_{12Б}$ ,  $h_{21Б}$ ,  $h_{22Б}$ .

В схеме на рис.13 при измерении параметров  $I_{ЭБ0}$ ,  $I_{КБ0}$  транзисторов проводимости ***n-p-n*** необходимо сменить полярность подключения источника напряжения “U”.

Схемы генератора на частоту 1 КГц и милливольтметра не показаны, т.к. конструкция их может быть любой. Милливольтметр должен иметь высокое входное сопротивление. Для пересчёта  $h$ -параметров схем с ОЭ и с ОК существуют формулы:

$$h_{11Э} = \frac{h_{11Б}}{K + \Delta h_{Б}} \approx \frac{h_{11Б}}{1 + h_{21Б}}, \quad (21)$$

$$h_{12Э} = \frac{\Delta h_{Б} - h_{12Б}}{K + \Delta h_{Б}} \approx \frac{h_{11Б} \cdot h_{22Б}}{1 + h_{21Б}} - h_{12Б}, \quad (22)$$

$$h_{21Э} = \frac{h_{21Б} + \Delta h_{Б}}{K - \Delta h_{Б}} \approx -\frac{h_{21Б}}{1 + h_{21Б}}, \quad (23)$$

$$h_{22Э} = \frac{h_{21Б} + \Delta h_{Б}}{K - \Delta h_{Б}} \approx -\frac{h_{21Б}}{1 + h_{21Б}}, \quad (24)$$

$$h_{11К} = \frac{h_{11Б}}{K + \Delta h_{Б}} \approx \frac{h_{11Б}}{1 + h_{21Б}} = h_{11Э}, \quad (25)$$

$$h_{12К} = \frac{1 + h_{21Б}}{K + \Delta h_{Б}} \approx 1, \quad (26)$$

$$h_{21К} = \frac{h_{12Б} - 1}{K + \Delta h_{Б}} \approx -\frac{1}{1 + h_{21Б}} = -(h_{21Э} + 1), \quad (27)$$

$$h_{22К} = \frac{h_{22Б}}{K - \Delta h_{Б}} \approx \frac{h_{22Б}}{1 + h_{21Б}} = h_{22Э}, \quad (28)$$

где 
$$K = 1 + h_{21Б} - h_{12Б}, \quad (29)$$

$$\Delta h_{Б} = (h_{11Б} \cdot h_{22Б}) - (h_{12Б} \cdot h_{21Б}). \quad (30)$$