

# ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТРАНЗИСТОРОВ

А. Ильин

Радиолобитель № 6-9, 1999

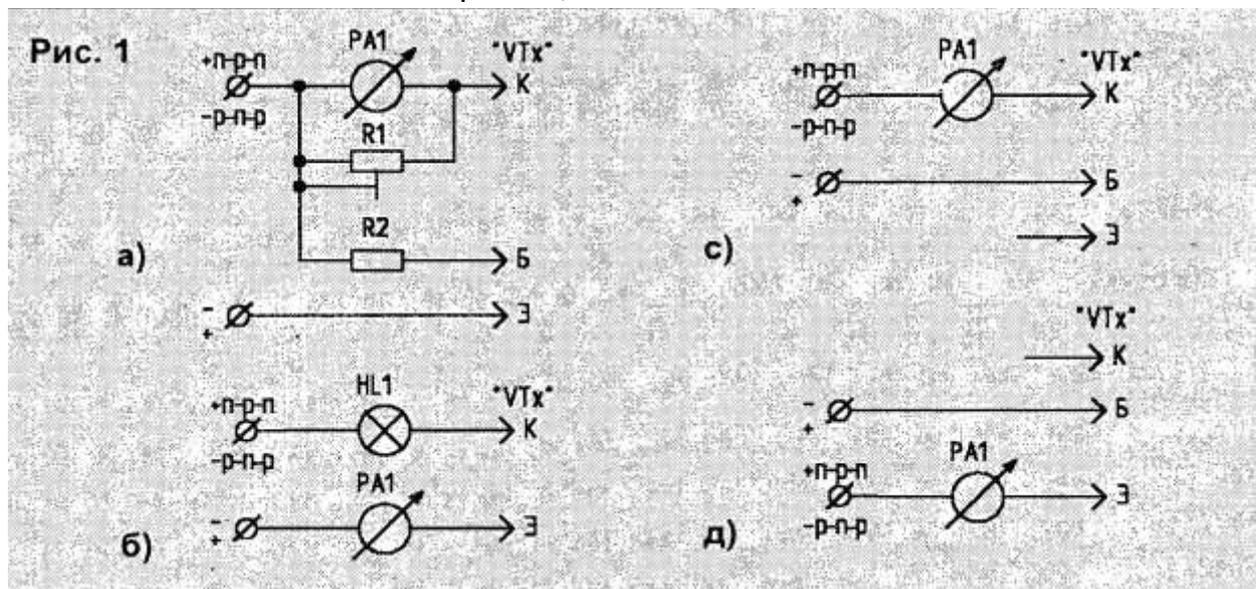
## БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

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,  $\alpha < 1$ .

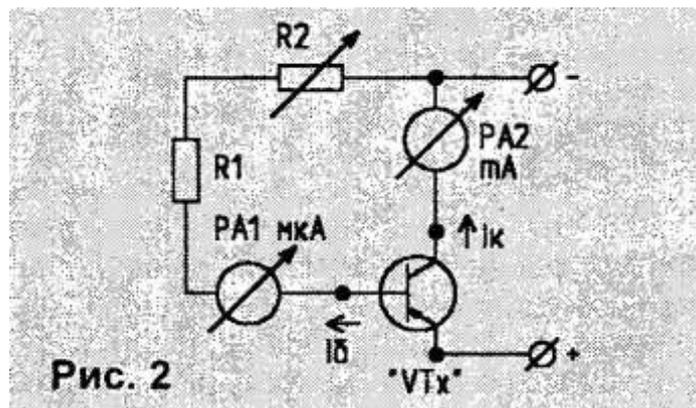
Если взять два значения параметра  $\alpha$ , равные 0.95 и 0.99, то при  $\alpha=0.95$  по формуле (1)  $\beta=19$ . А при увеличении значения  $\alpha$  всего на 0.04 -  $\beta=99$ .

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  $I_{КБО}$  на результаты вычисления применяют способ двух измерений. При двух значения тока базы  $I_{Б1}$  и  $I_{Б2}$  измеряют коллекторные токи  $I_{К1}$   $I_{К2}$  после чего производят расчёт по формуле:

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

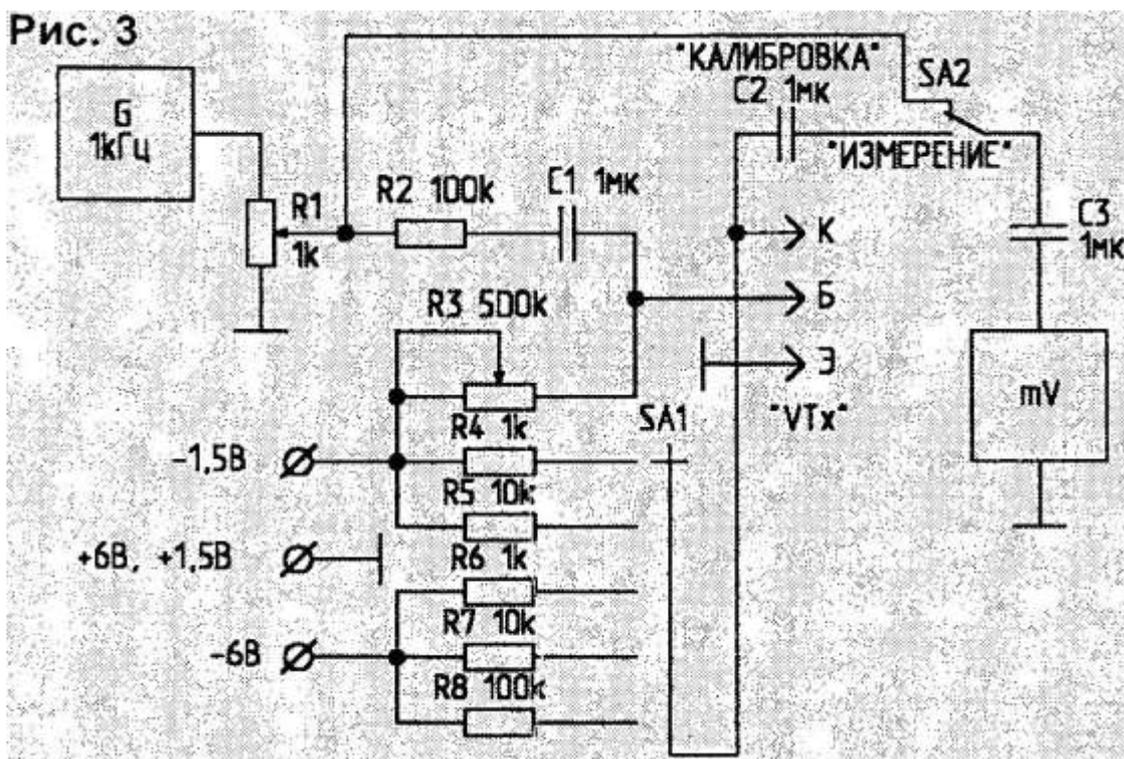
Другая схема измерений  $V_{CT}$  изображена на рис.2. Резистором R2 в цепи базы устанавливают ток  $I_B$ , который равен  $20 \div 100 \mu A$  для маломощных и  $1 \div 10 mA$  для мощных транзисторов.



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

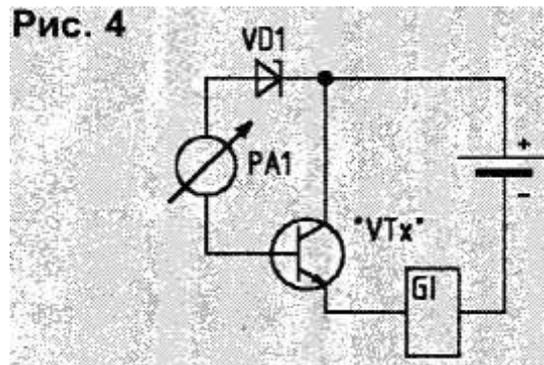
$$V_{CT} = \frac{I_K}{I_B - I_{КБО}}. \quad (3)$$

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.



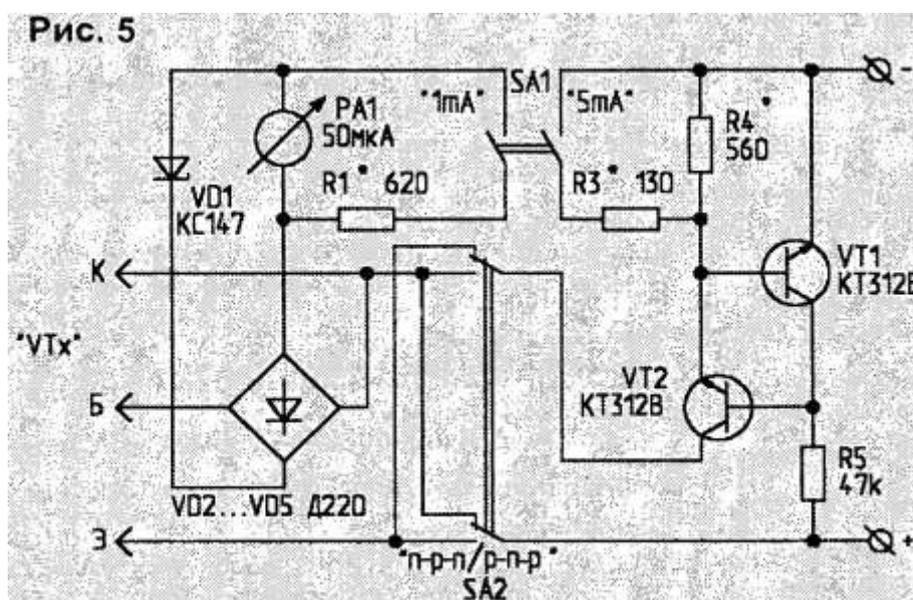
Ток эмиттера проверяемого транзистора VT<sub>x</sub> стабилизирован генератором тока G1. Напряжение коллектор-эмиттер транзистора фиксировано, поскольку равно сумме стабильных напряжений на стабилитроне VD1, эмиттерном переходе транзистора VT<sub>x</sub> и индикаторе PA1. Сильная ООС через VD1, PA1. 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 VTx. 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.

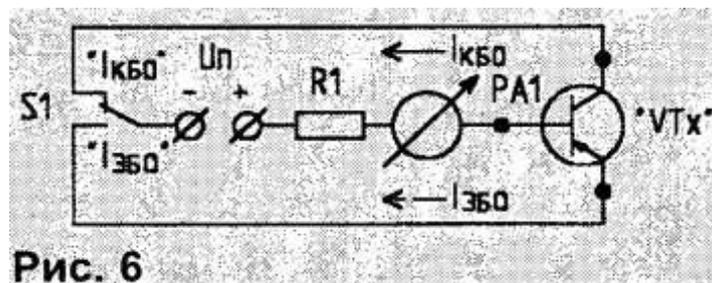


Рис. 6

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

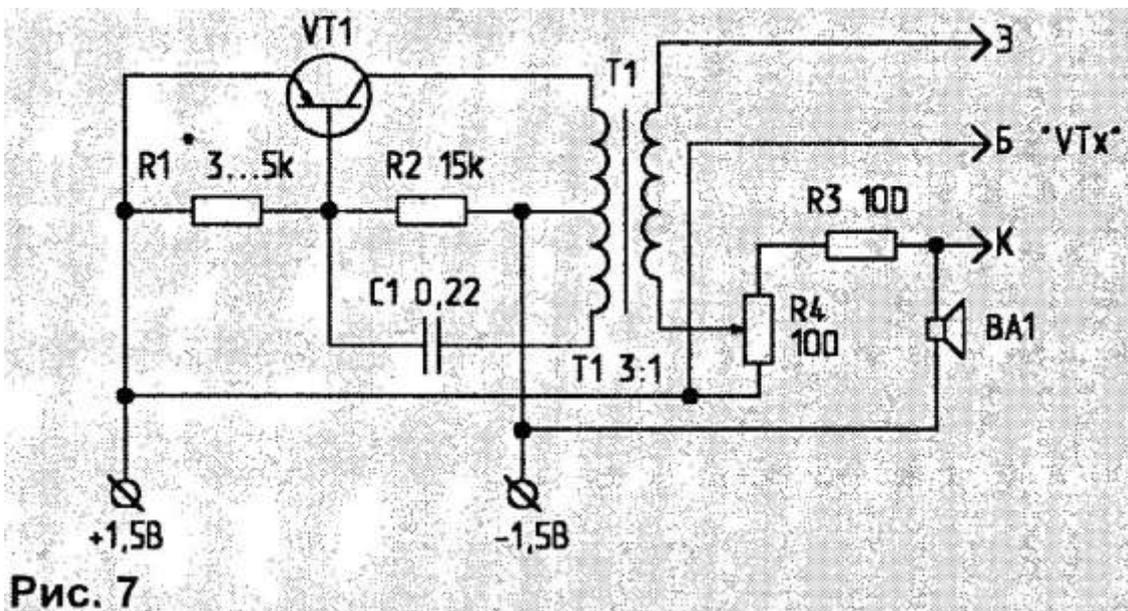


Рис. 7

“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.

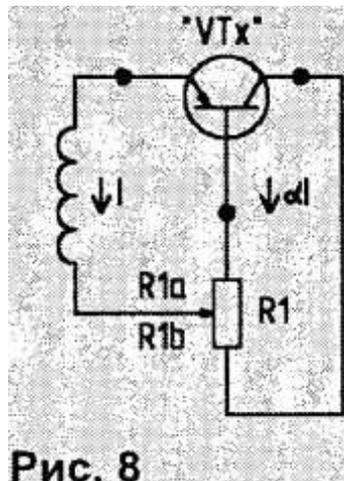


Рис. 8

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.

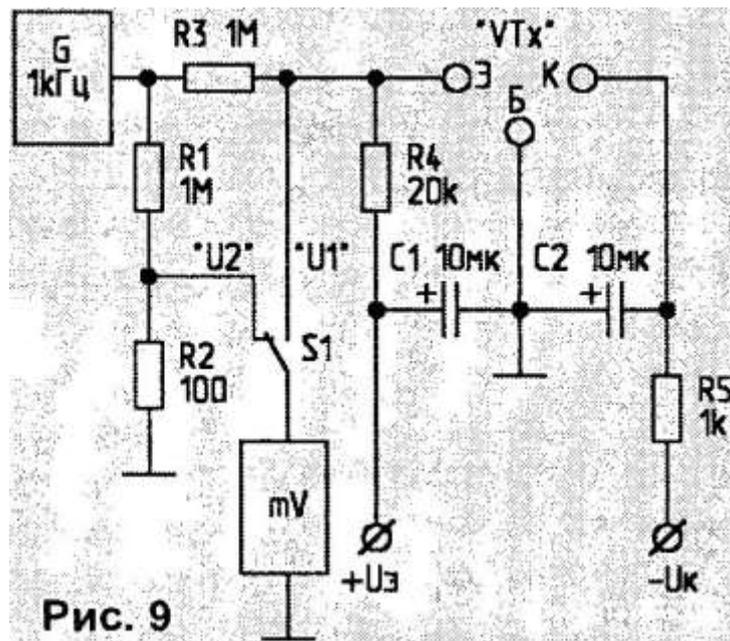


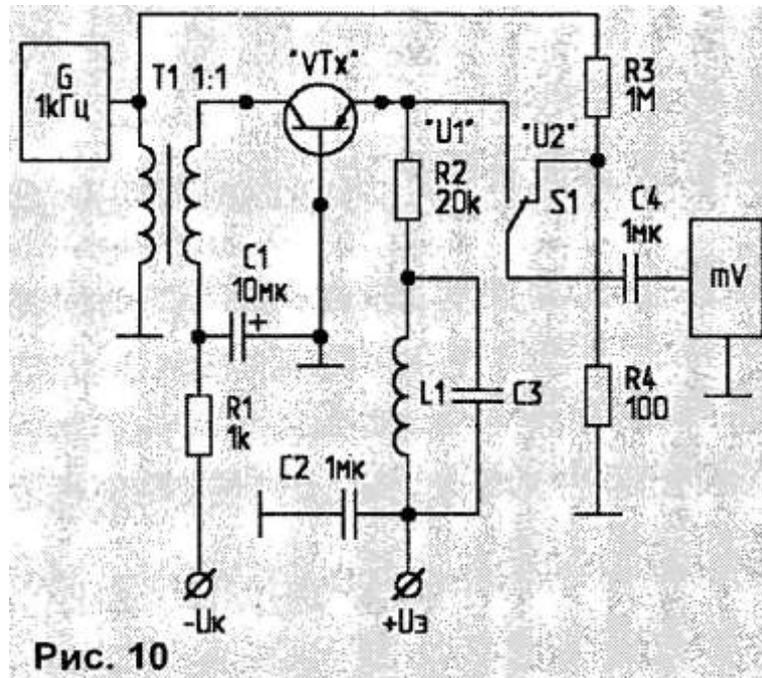
Рис. 9

На измеряемый транзистор  $VT_x$  (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.

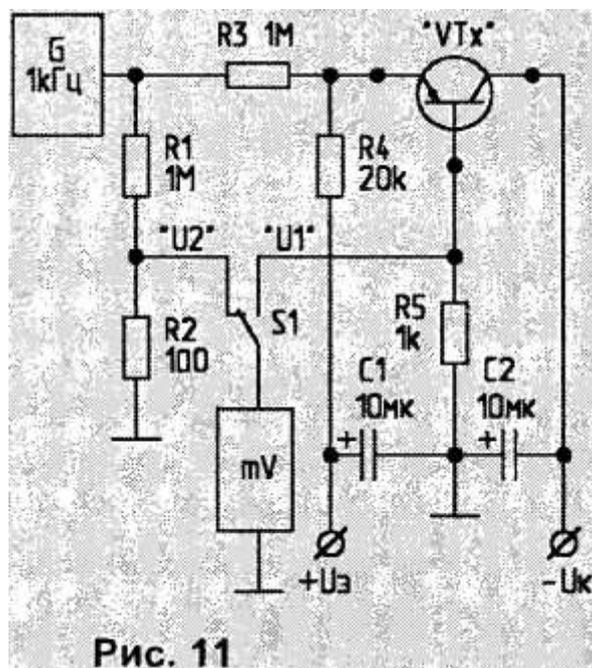
Схема измерения параметра  $h_{12Б}$  показана на рис.10.



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

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

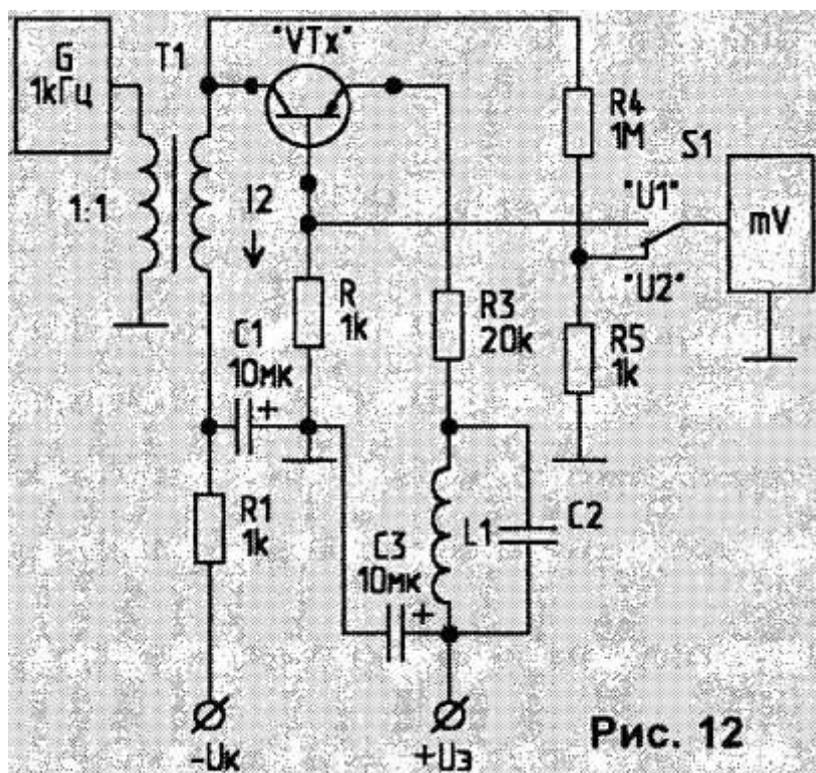
Параметр  $h_{21Б}$  измеряется по схеме рис.11.



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

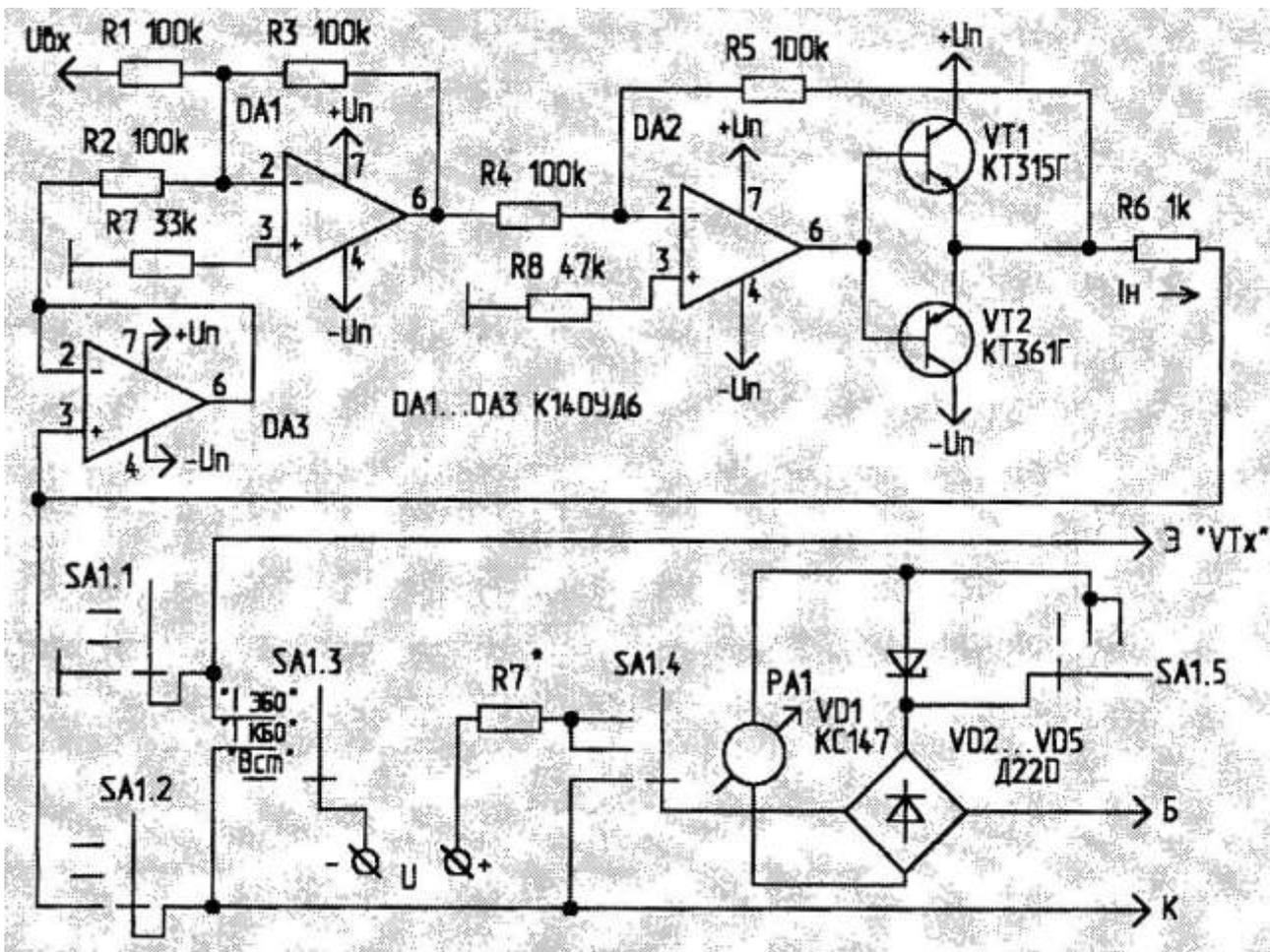


при закороченном входе. С помощью милливольтметра измеряют напряжение  $U_2$ , равное 1/1000 напряжения генератора, и  $U_1$  которое пропорционально току  $I_2$ . Вход закорачивается с помощью конденсатора большой ёмкости. Расчёт производится по формуле:

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

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 конденсатора 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 посторяет форму входного напряжения  $U_{ВХ}$  и определяется выражением:

$$I_H = \frac{(U_{ВХ} + U_H) - U_H}{R_6} = \frac{U_{ВХ}}{R_6}. \quad (17)$$

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  $R_1 \dots R_6$  должны иметь допуск не хуже 1%. Недостаток схемы — ограничение на величину выходного напряжения, связанное с максимальным выходным напряжением ОУ и определяемое неравенствами

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

$$U_{ВХ} + U_H < I_H \cdot R_6 + I_H \cdot R_H < U - U_{КЭ}, \quad (19)$$

где  $U - U_{ВЫХ} \approx U$ .

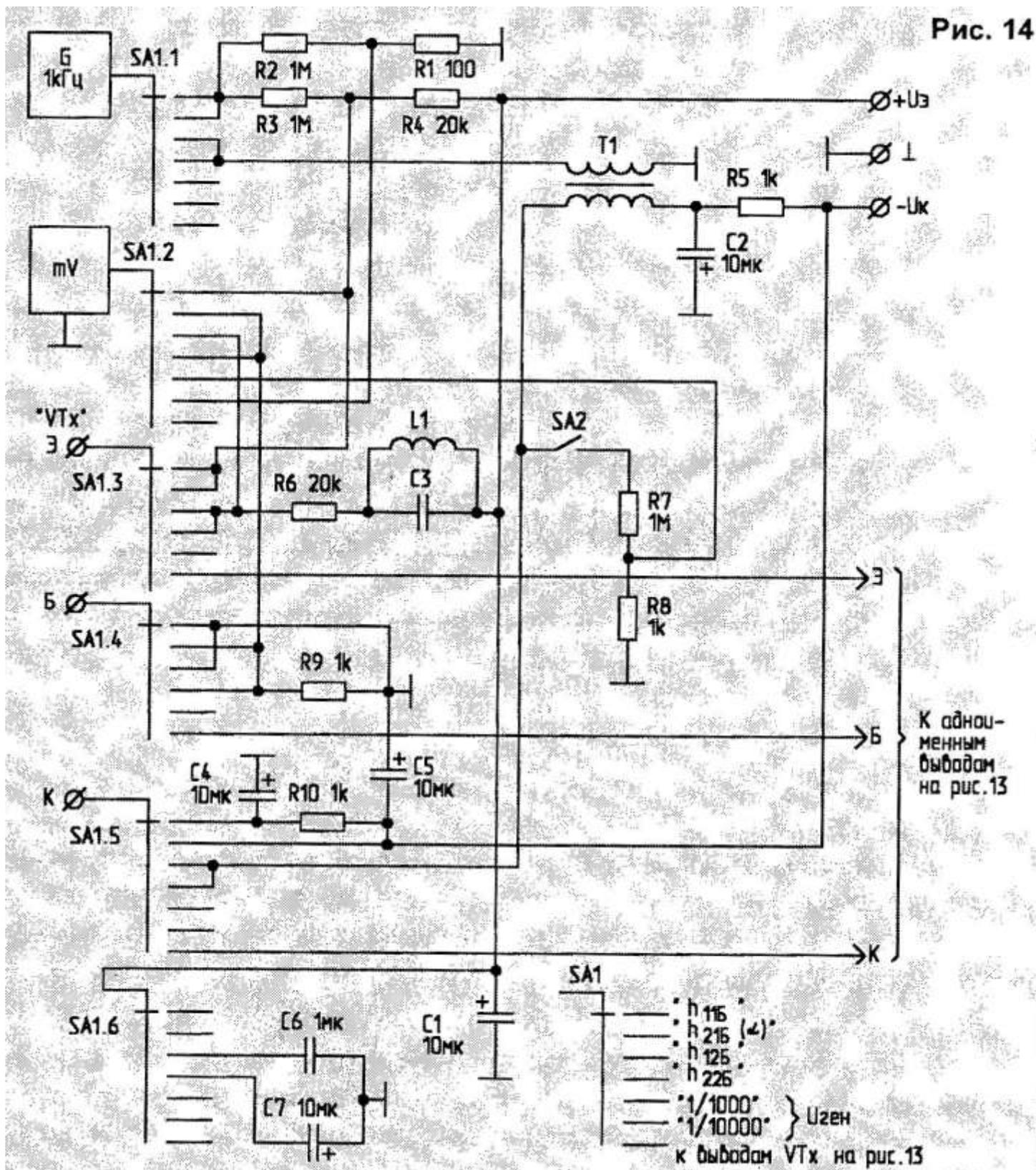
При  $U_{П} = U$  остаётся одно неравенство:

$$U_{ВХ} + U_H < U. \quad (20)$$

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

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