

К-267

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА



У745 / 2-78

13.- 11703

А.В.Карпунин, А.А.Попов, В.С.Хабаров

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ ТОЧНОГО КЛЮЧА  
В СХЕМЕ  
ЦИФРОАНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

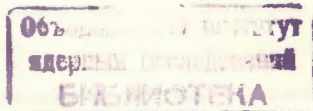
**1978**

13 - 11703

А.В.Карпухин, А.А.Попов, В.С.Хабаров

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ ТОЧНОГО КЛЮЧА  
В СХЕМЕ  
ЦИФРОАНАЛОГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

*Направлено в ПТЭ*



Карлукин А.В., Попов А.А., Хабаров В.С.

13 - 11703

Биполярные транзисторы точного ключа в схеме цифровоаналогового преобразователя

В работе представлены результаты исследований остаточных параметров замкнутых ключей напряжения на биполярных транзисторах, обладающих относительно высоким быстродействием при малых остаточных сопротивлениях. Для двухпозиционного ключа выбраны транзисторы КТ-342В и КТ-351 по схеме с общим коллектором в нормальном включении. В выбранных режимах погрешность преобразования напряжения не превышает  $\pm 0,7$  мВ. Приведенные в работе характеристики и упрощенная методика позволяют выбрать необходимые типы транзисторов и режимы их работы, обеспечив заданную точность преобразования.

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1978

В схемах цифроаналоговых преобразователей (ЦАП) с суммированием напряжения используются двухпозиционные точные ключи на активных элементах. Эти ключи при соответствующих погрешностях изготовления резистивной матрицы, стабилизации источника эталонного напряжения ( $E_{эТ}$ ) и малом выходном сопротивлении вносят основной вклад в общую погрешность преобразования при точности  $\approx 0,1\%$  в динамическом диапазоне  $\approx 5$  В. При этом данная погрешность определяется в основном параметрами замкнутого ключа, который в двухпозиционном ключе напряжения шунтирует разомкнутый. Особенности полевых транзисторов в ключевом режиме при работе на относительно низкоомную нагрузку и точных ключей на диодах не позволили применить их в преобразователе рассматриваемого типа и класса точности. Для получения относительно высокого быстродействия при малых переходных сопротивлениях ключа наилучшим образом подходят биполярные транзисторы.

Остаточные параметры транзистора в режиме насыщения (замкнутый ключ), времена установления напряжений с заданной точностью, их стабильности зависят от типа транзисторов, схемы их включения и режимов работы. Исследованию подобных характеристик транзисторов посвящен ряд работ /1-4/, однако в них рассмотрены не все типы современных транзисторов, схемы включения, не указаны режимы работы. В данной работе представлены результаты исследований остаточных характеристик современных отечественных транзисторов, их основных схем включения: с общим эмиттером (ОЭ), с общим

коллектором (ОК), в нормальном и инверсном включени-  
ях. Для исследования остаточных характеристик предва-  
рительно отобранных транзисторов <sup>1/2/</sup> применялся не-  
посредственный метод измерения по постоянному току.

На рис.1а представлены схемы включения, а также  
зависимости напряжения на коллекторе ( $U_{кэ}$ ) от тока базы  
(при токе нагрузки 0,6 мА для нормального включения  
транзистора с ОЭ). Минимальные значения  $U_{кэ}$  для иссле-  
дованных транзисторов приведены в таблице. Как видно  
из этой таблицы, минимальными значениями  $U_{кэ}$  в данном  
режиме из современных транзисторов обладают КТ-342В  
(6,97 мВ), КТ-351Б (3,90 мВ), КТ-352 (5,4 мВ).

На рис.1б приведены схема инверсного включения  
транзистора в ключе с ОЭ и зависимости  $U_{кэ} = f(I_б)$   
при токе нагрузки  $I_н = 0,35$  мА. Данная схема включе-  
ния обладает меньшими значениями величин  $U_{кэ}$   
(см. таблицу), однако малые допустимые напряжения  
обратно смещенного эмиттерного перехода налагают  
существенные ограничения на величину коммутируемого  
напряжения  $E_{эп}$ .

Схема нормального включения транзистора в ключе  
с ОК и зависимости напряжения  $U_{кэ}$  от тока базы (при  
 $I_н = 0,6$  мА) представлены на рис.2а. Характерной  
особенностью данного включения является то, что  
напряжение  $U_{кэ}$  меняет полярность, пересекая нулевое  
значение. Этот факт определяется тем, что падение  
напряжения, создаваемого током базы на соответствую-  
щих объемных сопротивлениях транзистора, компенсиру-  
ет разность напряжений на переходах  $U_{эб} - U_{бк}$ .  
Критерии выбора транзисторов в таком включении мо-  
гут быть следующими:

1. Наименьшее сопротивление транзистора в режиме  
насыщения.

2. Наименьший наклон характеристик  $U_{кэ} = f(I_б)$   
при  $U_{кэ} = 0$  (чтобы погрешность ключей из-за разбро-  
сов токов управления была наименьшей:  $\Delta I_б / I_б \approx 10\%$ ).

3. Наименьшее значение  $I_{бном}$  ( $U_{кэ} = 0$ ), что смягчает  
требования к источнику управляющего напряжения.

Параметры исследуемой схемы включения представле-  
ны в таблице. Наиболее приемлемыми для схемы точного

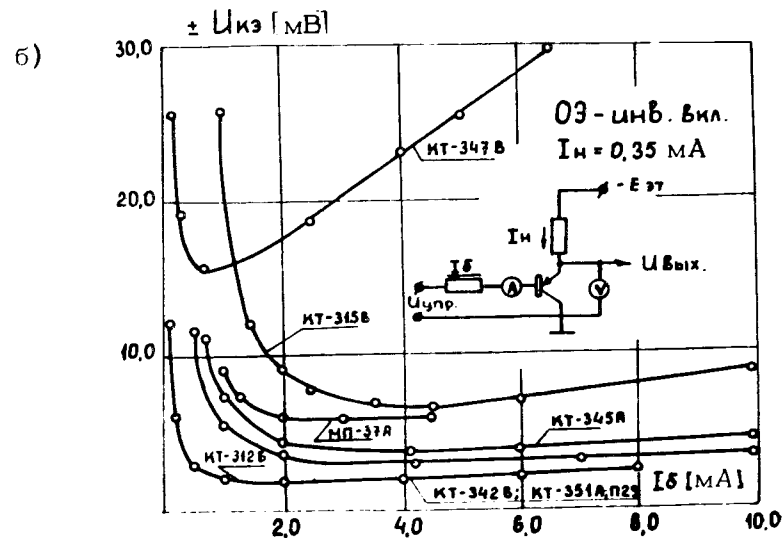
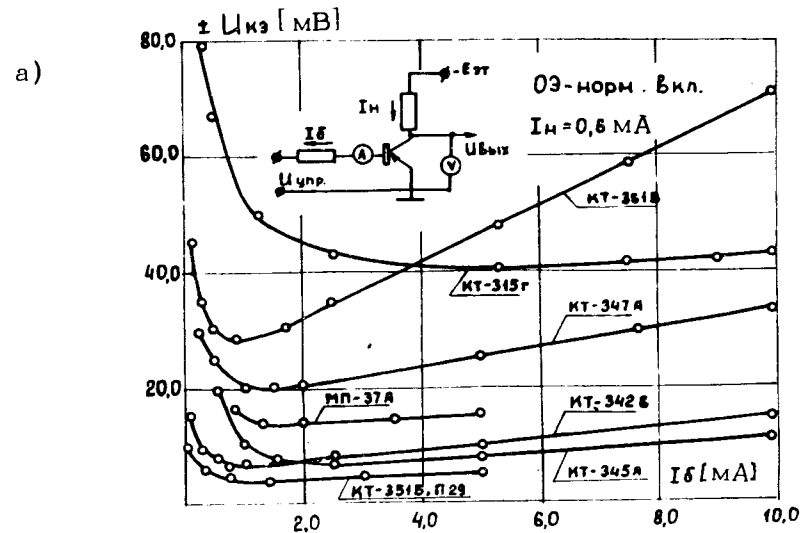


Рис. 1. Зависимость остаточных напряжений  $U_{кэ}$   
замкнутого транзисторного ключа с общим эмиттером  
(ОЭ): а) схема нормального включения, б) схема  
инверсного включения.

Таблица

тип транзистора	КТ-342А	КТ-342В	КТ-351Б	КТ-352А	КТ-345В	КТ-347А	КТ-366	КТ-315Г	КТ-316В	КТ-345А	П-29	МП-37
<b>ОЭ - нормальное включение (<math>I_H = 0,6 \text{ мА}</math>)</b>												
$U_{кз}$ [мВ]	12,07	6,97	3,90	5,4	12,57	20,56	32,43	40,80	28,30	6,94	4,18	14,00
$I_{б}$ [мА]	1,60	0,83	1,20	1,60	1,67	1,53	0,15	5,0	0,85	2,47	2,50	2,0
<b>ОЭ - инверсное включение (<math>I_H = 0,35 \text{ мА}</math>)</b>												
$U_{кз}$ [мВ]	10,44	1,12	1,80	3,60	2,98	5,94	26,40	25,4	5,87	3,13	4,40	3,40
$I_{б}$ [мА]	1,15	2,0	2,1	4,0	3,5	3,0	0,46	0,10	5,61	4,1	2,16	6,4
<b>ОК - нормальное включение (<math>U_{кз} = 0</math>, <math>I_H = 0,6 \text{ мА}</math>)</b>												
$U_{кз}$ [мВ]	2,5	2,0	1,5	2,0	3,3	3,5	8,0	11	10	4	0,8	3,0
$\Delta U_{кз} / \Delta I_{б}$ [Ом]	0,5	0,3	0,2	0,24	0,5	0,9	0,5	40	0,3	0,4	0,6	0,3
$I_{б \text{ ном}}$ [мА]	6,2	4,30	3,20	2,9	5,2	4,6	13,6	12	15,3	4,1	2,45	1,1
<b>ОК - инверсное включение (<math>U_{кз} = 0</math>, <math>I_H = 0,35 \text{ мА}</math>)</b>												
$\Delta U_{кз} / \Delta I_{б}$ [Ом]	5	10	6,3	4,8	30	48	—	13	60	10	6	4
$I_{б \text{ ном}}$ [мА]	0,4	0,36	0,47	0,63	0,36	0,37	—	0,35	0,36	0,68	0,45	0,38

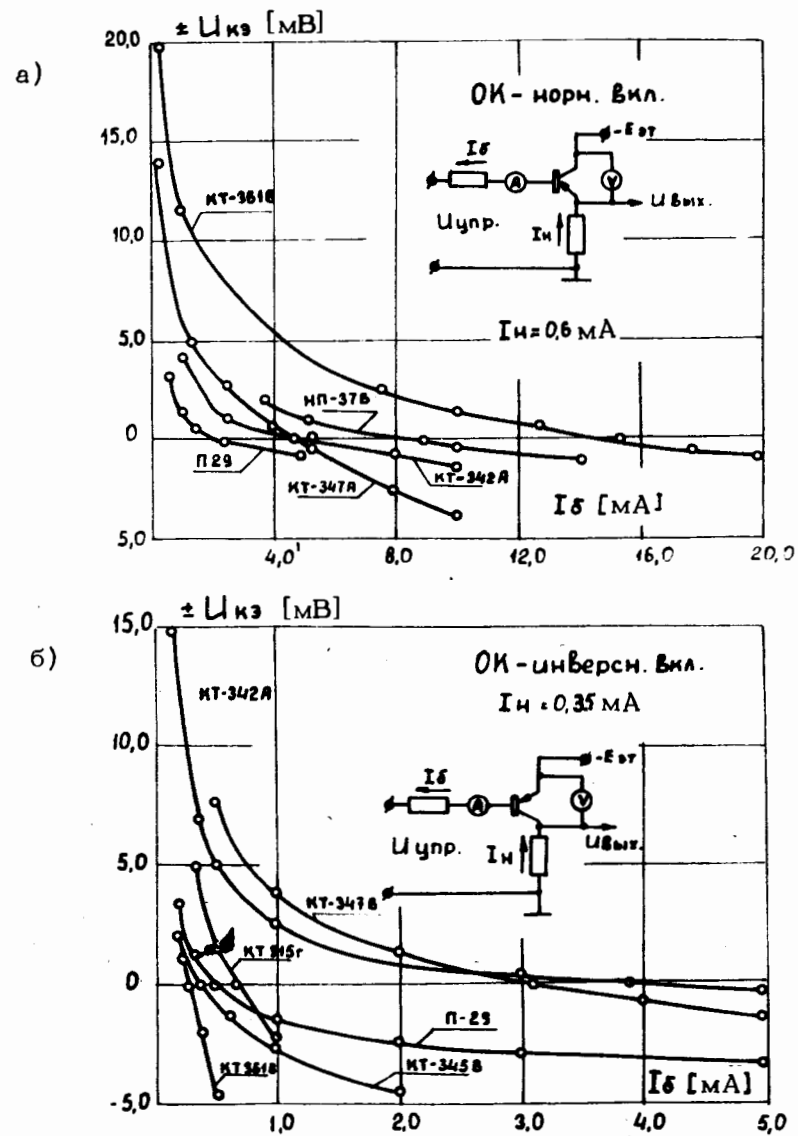


Рис. 2. Зависимости остаточных напряжений замкнутого транзисторного ключа с общим коллектором (ОК) от тока базы: а) схема нормального включения, б) схема инверсного включения.

ключа оказываются транзисторы КТ-342В, КТ-351Б, КТ-352А. Величина статистического разброса величин  $U_{кэ} / I_{б}$  данных транзисторов при надежности 0,9 и числе измерений  $n = 10$  в выбранных режимах не превышает 0,15 мВ. Исследование температурной зависимости  $U_{кэ}$  дало значение  $U_{кэ} / \Delta T \leq 2$  мкВ/°С.

Для инверсного включения транзисторов по схеме ОК данные представлены на рис.26 и в таблице, из которых можно видеть, что наклон характеристик  $U_{кэ} / I_{б}$  существенно больше, чем для нормального включения.

При работе транзисторных ключей всех исследованных схем включения в ЦАП с суммированием напряжений наблюдается изменение величин  $U_{кэ}$  замкнутых ключей в зависимости от набранной кодовой комбинации. Это изменение определяется тем, что при переключении одного из разрядов ЦАП изменяются потенциалы во всех узлах резистивной матрицы (дискретного делителя напряжения - ДДН), что приводит к изменению нагрузочных токов всех замкнутых ключей и, следовательно, изменению величин напряжений  $U_{кэ}$  (например, диапазон изменения токов нагрузки ключей для ДДН типа R-2R, R = 5 кОм,  $E_{эТ} = 9$  В составляет 0,6 мА). Поскольку сопротивление замкнутого ключа отлично от нулевого, то погрешность ключей из-за этой особенности работы становится определяющей. Такой же эффект наблюдается при коммутации ключами изменяющихся по величине напряжений. На рис. 3 представлены зависимости номинальных токов базы транзисторов -  $I_{б ном}$  (при которых  $U_{кэ} = 0$ ) от тока нагрузки для нормального включения транзистора по схеме ОК (для различных транзисторов с  $I_{н} = 0,6$  мА). Эти зависимости показывают, что для того, чтобы величина  $U_{кэ}$  оставалась равной нулю в значительном диапазоне изменения токов нагрузки, необходимо изменять соответствующим образом ток базы транзисторного ключа. Если же ток базы делать постоянным, то изменение тока нагрузки приводит к возрастанию абсолютной погрешности ключа. На рис. 4 представлены зависимости величины  $U_{кэ}$  замкнутого ключа от тока нагрузки  $I_{н}$  при фиксированных номинальных значениях тока базы

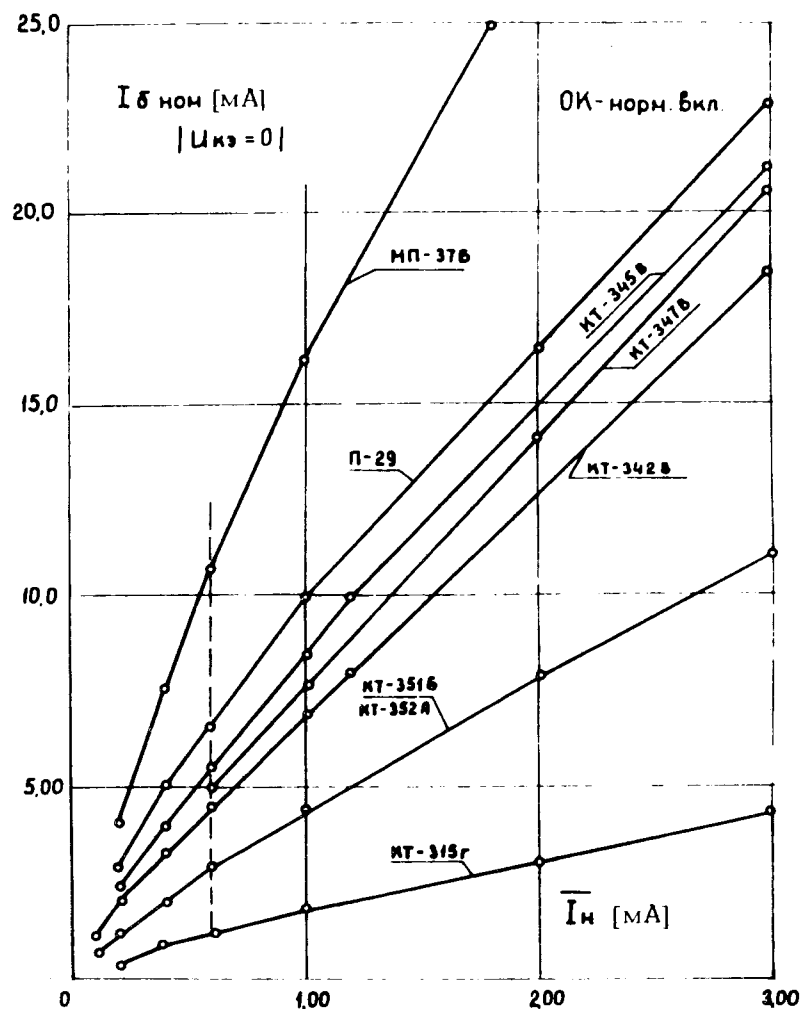


Рис. 3. Зависимости номинальных токов базы транзисторов (при которых  $U_{кэ} = 0$ ) от тока нагрузки.

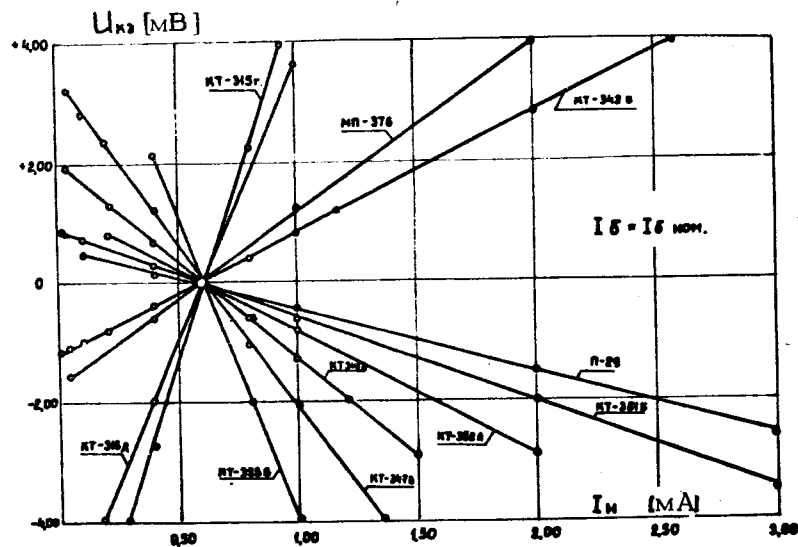


Рис. 4. Зависимости остаточных напряжений  $U_{кэ}$  от тока нагрузки.

$I_{б ном}$  (см. рис. 3 при  $I_{н} = 0,6$  мА). По этой зависимости легко определить сопротивление замкнутого ключа в рассматриваемых режимах. Так, для транзистора КТ-342В  $r_{кл} = 2$  Ом, для КТ-351Б  $r_{кл} = 1,5$  Ом. Причем при уменьшении тока нагрузки (и соответствующем изменении тока базы - см. рис. 3) это сопротивление возрастает (см. рис. 5).

Относительная универсальность вышеприведенных характеристик ключей состоит в следующем. При заданных разрешающей способности ЦАП, номиналах резисторов ДДН и погрешности на основе зависимостей, представленных на рис. 6 выбираем доступный тип транзисторов и максимальное значение тока нагрузки  $I_{н max} \leq E_{эТ}/3R$ , чтобы абсолютное значение величины  $U_{кэ}$  не превысило заданное. Для минимизации общей погрешности ЦАП необходимо, чтобы величина  $U_{кэ}$  ключа каждого разряда (во всем диапазоне изменения токов нагрузки) была симметричной относительно

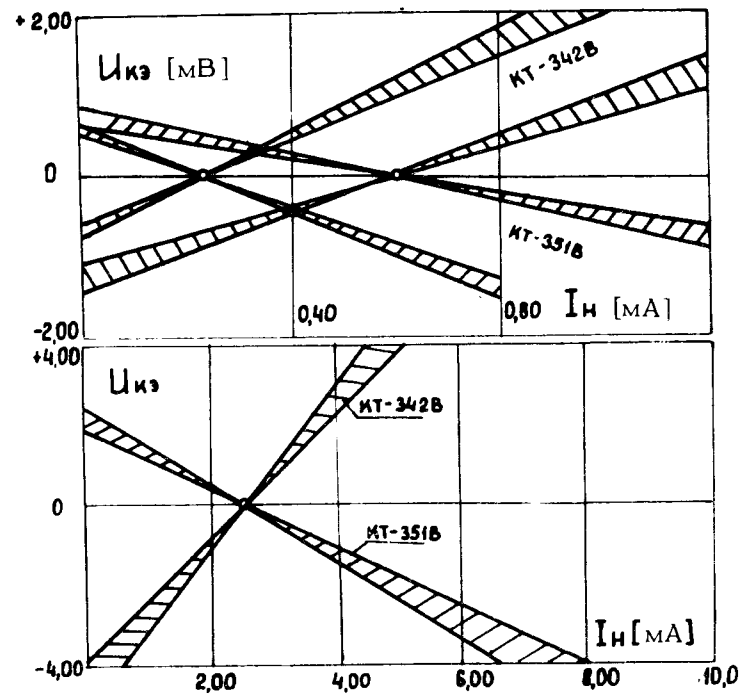


Рис. 5. Зависимости остаточных напряжений  $U_{кэ}$  от тока нагрузки для транзисторов КТ-342В и КТ-351Б для трех различных номинальных токов базы.

нулевого значения  $U_{кэ} = 0$ . То есть номинальный ток базы ключей выбираем из рис. 5 для среднего значения тока нагрузки  $I_{н} = I_{н max}/2$ .

С учетом всего вышесказанного была составлена схема одноразрядной ячейки для двухпозиционного ключевого элемента десятиразрядного ЦАП (см. рис. 6). Транзисторы Т2, Т3 являются ключевыми. Транзистор Т1 совместно с дополнительными источниками питания  $E_1, E_2$  задает режимы точных ключей и согласует их работу со стандартными логическими уровнями ТТЛ. При необходимости изменения значений величины  $E_1, E_2$  и  $E_{эТ}$  необходимо изменить номиналы соответствующих резисторов в соответствии с приведенной методикой.

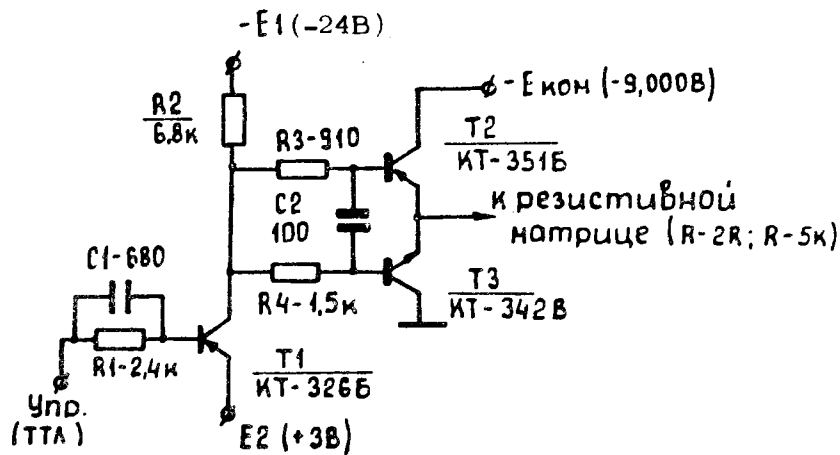


Рис. 6. Принципиальная схема двухпозиционного ключа напряжения.

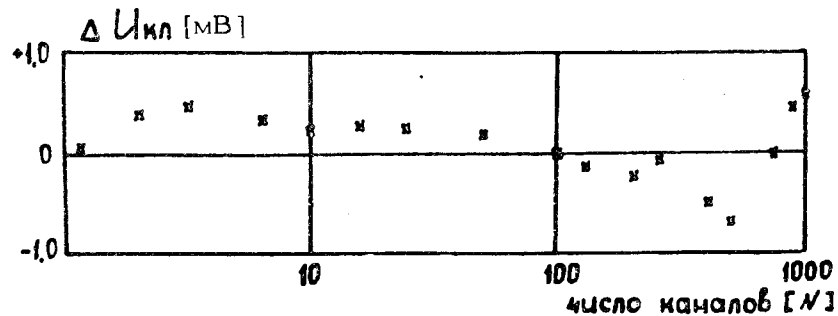


Рис. 7. Зависимость погрешности ЦАП из-за неидеальности ключей от входного кода.

Форсирующий конденсатор С1 служит для ускорения процессов переключения транзистора Т1, интегрирующий конденсатор С2 - для относительного выравнивания времен замыкания и размыкания ключей на транзисторах Т2 и Т3 (работающих противофазно). Времена уста-

новления с учетом задержек срабатывания такого ключевого элемента не превышают 800 нс. Погрешность ЦАП из-за неидеальности ключей, т.е. без учета погрешности ДДН, не превышает  $\pm 0,7$  мВ (см. рис. 7).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Смоллов В.Б. и др. Микроэлектронные ЦА и АЦ преобразователи информации, Энергия, Л., 1976.
2. Анисимов В.И., Голубев А.П. Транзисторные модуляторы. Энергия, Л., 1964.
3. Клебанский Р.Б. Преобразователи кода в напряжение, Энергия, Л., 1973.
4. Богдель А.А., Дражев М.Н. ОИЯИ, 13-9110, Дубна, 1975.
5. Касандрова О.Н., Лебедева Д.В. Обработка результатов наблюдения, Наука, М., 1970.

Рукопись поступила в издательский отдел  
28 июня 1978 года.