

03948

3-91

21/VII-69

13 - 4458

А.М.Зубарева, Г.Г.Субботина, В.Г.Субботин

**ТРАНЗИСТОРНЫЙ
СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ
С АКТИВНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ**

13 - 4458

А.М.Зубарева, Г.Г.Субботина, В.Г.Субботин

**ТРАНЗИСТОРНЫЙ
СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ УСИЛИТЕЛЬ
С АКТИВНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ**

7887/2 up

Точность измерения энергии, теряемой частицей в детекторе, определяется многими факторами ^{/1/} и, в частности, шумовыми свойствами детектора и электронной аппаратуры. Уровень шумов спектрометрического тракта определяется не только шумами предусилителя и детектора, но и способом формирования импульса в основном усилителе.

Для получения максимального отношения сигнала к шуму в спектрометрическом усилителе применяют специальные формирующие цепи, которые ограничивают его полосу пропускания как со стороны высоких, так и со стороны низких частот.

Различные способы формирования оцениваются двумя основными параметрами: соотношением сигнал-шум, достижимым при данном способе формирования, и разрешающим временем, которое дает представление о продолжительности сформированного импульса. Разрешающее время есть отношение площади сформированного импульса к его максимальной амплитуде, т.е. длительности такого прямоугольного импульса, площадь и амплитуда которого равны площади и максимальной амплитуде сформированного импульса.

Согласно теории шумящих четырехполюсников ^{/1,2,4/}, любой усилитель можно представить состоящим из нешумящего усилительного блока и двух эквивалентных источников шумового напряжения, включенных

на входе, причем один из них должен быть включен последовательно, а другой – параллельно. Источники шума, ток которых протекает так же как и ток сигнала, включены параллельно со входом предусилителя, и вызванный ими шум можно назвать "параллельным" шумом. Источниками "параллельного" шума являются: шумы сопротивления в затворе полевого транзистора и шумы сопротивления, через которое подается смещение на детектор, шум тока утечки затвора полевого транзистора и шум тока утечки детектора. Если напряжение источника шума складывается с напряжением входного сигнала, то источник шума действует последовательно с напряжением входного сигнала, а вызванный таким источником шум называется "последовательным". В качестве примера источника "последовательного" шума можно привести шум канала полевого транзистора. Таким образом, все источники шумов можно представить в виде эквивалентных шумящих сопротивлений R_s и R_g , включенных последовательно и параллельно входным зажимам предусилителя.

Средняя квадратичная амплитуда шумов последовательного типа ^{/5/}

$$\overline{U^2}_{\text{посл.}} = 4kTR_s \Delta f = \frac{B}{2\pi} \Delta\omega, \quad (1)$$

где $\Delta\omega = 2\pi \Delta f$ – единичная полоса частот, $B = 4kTR_s$ – спектральная плотность шумового источника напряжения последовательного типа.

Средняя квадратичная амплитуда шумов параллельного типа ^{/5/}

$$\overline{U^2}_{\text{пар.}} = \frac{4kTR_g}{\omega^2 (R_g C)^2} \Delta f = \frac{A}{\omega^2} \cdot \frac{\Delta\omega}{2\pi}, \quad (2)$$

где $A = \frac{A_1}{C^2}$, C – суммарная входная емкость предусилителя вместе с емкостью монтажа и детектора; $A_1 = \frac{4kT}{R_g}$ – спектральная плотность шумового источника тока параллельного типа.

Для получения максимального отношения сигнала к шуму применяются формирующие цепи, ограничивающие полосу частот усилителя как для компонент шума, так и для сигнала. При расчётах приведенного ко входу шума необходимо учитывать коэффициент передачи формирующих цепей.

Ниже приводится порядок расчёта шума, приведенного к входу ^{/3/}, а также расчёт формы импульса, оптимальной постоянной времени, отношения шума к сигналу, разрешающего времени и времени достижения максимума при однократном дифференцировании RC – цепью и двукратном интегрировании операционным усилителем с целью обратной связи в виде T – образного моста (рис. 1). Этот способ интегрирования предложен Ферштейном ^{/6/} и используется в разработанном транзисторном спектрометрическом усилителе УСТ-3.

Максимальное значение переходной характеристики различно для разных способов формирования. Пусть для выбранного нами способа формирования оно равно M , тогда для произвольного значения входного сигнала значение максимальной амплитуды выходного напряжения определяется из следующего равенства:

$$(U_{\text{ВЫХ. max}}) = MU_{\text{ВХ}}, \quad (3)$$

На основании (3) рассчитывается приведенный к входу и нормализованный по сигналу минимальный шум:

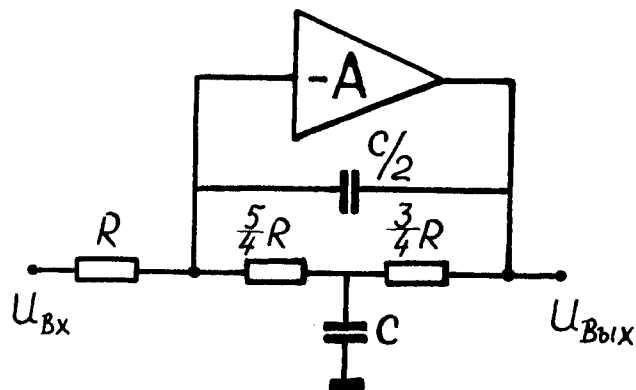


Рис. 1. Операционный усилитель с обратной связью в виде T - образной RC - цепочки.

$$\sqrt{U_{\text{Вх.ш.}}^2} = \frac{\sqrt{U_{\text{Вых.ш.}}^2}}{M} \quad (4)$$

Средний квадрат шумового напряжения $U_{\text{Вых.ш.}}^2$ на выходе формирующих цепей ^{/4/}

$$U_{\text{Вых.ш.}}^2 = \int_0^{\infty} |K(j\omega)|^2 (U_{\text{посл.}}^2 + U_{\text{пар.}}^2) d\omega \quad (5)$$

где $|K(j\omega)|$, $U_{\text{посл.}}^2$ и $U_{\text{пар.}}^2$ определяются соответственно соотно-

шениями (10), (1), (2). Соотношение (5) позволяет определить оптимальное значение постоянной времени формирования, а также средний квадрат приведенного к входу минимального шума для данного способа формирования.

Разрешающее время для данного способа формирования, по определению, есть отношение площади сформированного импульса $\int_0^{\infty} h(t) dt$ к его максимальной амплитуде:

$$t_{\text{разр.}} = \frac{\int_0^{\infty} h(t) dt}{M} \quad (6)$$

Операторный относительный коэффициент усиления интегрирующего каскада операционного усилителя (рис. 1)

$$K(p) = \frac{32 + 15 p \tau}{15 p^2 \tau^2 + 32 p \tau + 32} \quad (7)$$

где $\tau = RC$ - постоянная времени дифференцирующей реостатно-емкостной цепочки.

Относительный коэффициент передачи формирующей цепи с однократным дифференцированием и двукратным интегрированием операционным усилителем (рис. 1)

$$K^*(p) = \frac{p \tau}{1 + p \tau} \cdot \frac{(32 + p \tau)^2}{(15 p^2 \tau^2 + 32 p \tau + 32)^2} \quad (8)$$

Относительному коэффициенту передачи соответствует переходная характеристика $h(t)$:

$$h(t) = 1,2844 e^{-t/\tau} - e^{-\frac{16}{15}t/\tau} \left(1,2844 \cos 0,9978 \frac{t}{\tau} - 0,9785 \sin 0,9978 \frac{t}{\tau} + \right. \\ \left. + 1,0620 \frac{t}{\tau} \cos 0,9978 \frac{t}{\tau} + 0,1423 \frac{t}{\tau} \sin 0,9978 \frac{t}{\tau} \right). \quad (9)$$

Функция (9) достигает максимального значения при $\frac{t}{\tau} = 1,8$, и величина максимума равна

$$h(t_{\max}) = 0,4202.$$

На рис. 2 приведены переходные характеристики для реостатно-емкостного формирования с одной дифференцирующей и одной интегрирующей цепочкой - кривая 1, одной дифференцирующей и двумя интегрирующими цепями - кривая 2, а также переходная характеристика, соответствующая равенству (9). Все кривые построены для оптимального в каждом способе формирования значения постоянных времени формирующих цепей.

Из соотношения (8) следует, что модуль коэффициента передачи равен:

$$|K(j\omega)| = \frac{\left(\frac{32}{15}\right)^2 + \omega^2 \tau^2}{\left(\frac{32}{15} - \omega^2 \tau^2\right)^2 + \left(\frac{32}{15}\right)^2 \omega^2 \tau^2} \cdot \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}. \quad (10)$$

Если на входе предусилителя полный шум можно представить согласно (1), (2) в виде

$$\overline{U_{\text{посл.}}^2} + \overline{U_{\text{пар.}}^2} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{A}{\omega^2} + B \right) \Delta\omega, \quad (11)$$

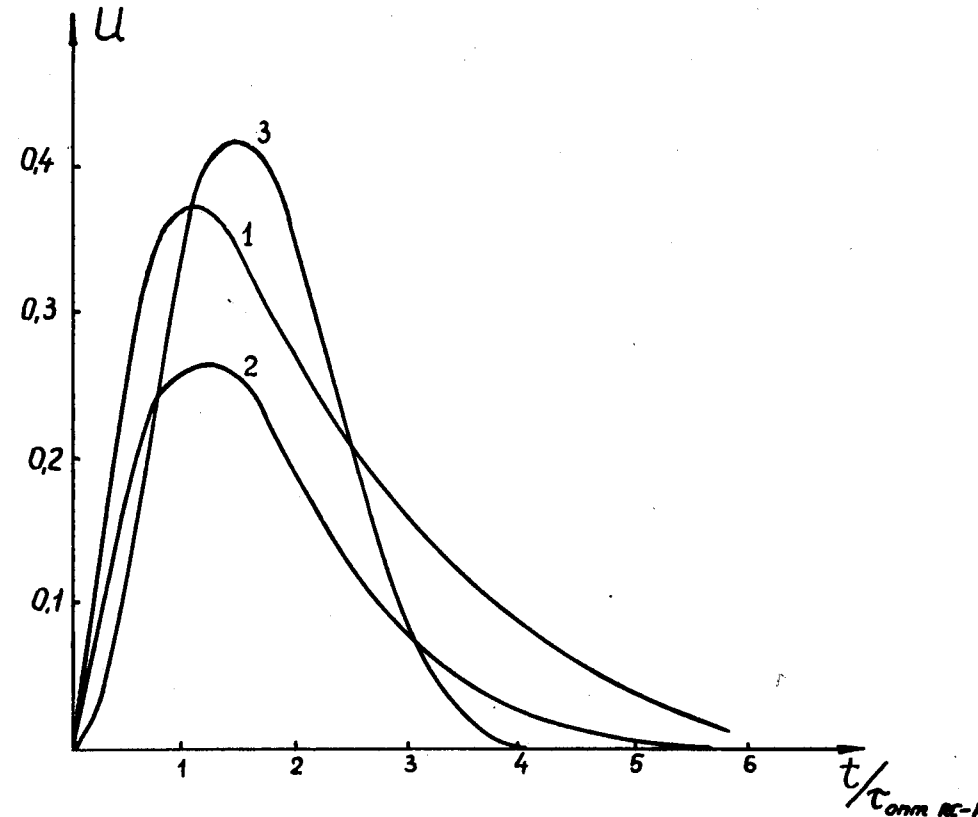


Рис. 2. Форма сигнала при разных способах формирования: 1 - реостатно-емкостное формирование одной дифференцирующей и одной интегрирующей цепочкой, 2 - реостатно-емкостное формирование двойным интегрированием и одним дифференцированием; 3 - формирование двойным интегрированием и одним дифференцированием с помощью операционного усилителя с обратной связью в виде T-образной RC-цепочки.

то средний квадрат амплитуды шумового напряжения на выходе усилителя с относительным коэффициентом передачи, определяемым соотношением (8), равен:

$$\begin{aligned} \overline{U_{\text{Вых.Ш.}}^2} &= \int_0^{\infty} |K(j\omega)|^2 \frac{1}{2\pi} \left(\frac{A}{\omega^2} + B \right) d\omega = \\ &= \frac{A}{2\pi} \tau \int_0^{\infty} \frac{[(\frac{32}{15})^2 + (\omega\tau)^2] d(\omega\tau)}{\{[(\frac{32}{15}) - (\omega\tau)^2]^2 + (\frac{32}{15})^2 (\omega\tau)^2\}^2 [1 + (\omega\tau)^2]} + \\ &+ \frac{B}{2\pi} \cdot \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} \frac{[(\frac{32}{15})^2 + (\omega\tau)^2] \cdot (\omega\tau)^2 d(\omega\tau)}{\{[(\frac{32}{15}) - (\omega\tau)^2]^2 + (\frac{32}{15})^2 (\omega\tau)^2\}^2 [1 + (\omega\tau)^2]} = \\ &= A\tau \cdot 0,15685 + \frac{B}{\tau} \cdot 0,09456. \end{aligned} \quad (12)$$

Из полученного соотношения (12) определяется оптимальное время формирования и минимальное среднее квадратичное значение шумов, приведенных к входу усилителя, для данного способа формирования

$$\tau_{\text{опт.}} = 0,776 \sqrt{\frac{B}{A}} = 0,776 \tau_{\text{RC-RC}} \quad (13)$$

где $\tau_{\text{RC-RC}}$ — оптимальное время формирования при однократном дифференцировании и однократном интегрировании импульса RC-цепями.

$$(\sqrt{U_{\text{Вх.Ш.}}^2})_{\text{min}} = 1,1745 \sqrt[4]{AE} \quad (14)$$

Минимальное среднее квадратичное значение шумов, приведенных к входу усилителя, для однократного интегрирования и однократного дифференцирования RC-цепями

$$(\sqrt{U_{\text{Вх.Ш.}}^2})_{\text{min RC-RC}} = 1,36 \sqrt[4]{AB}. \quad (15)$$

Разрешающее время, характеризующее рассматриваемый способ формирования, определяется

$$t_{\text{разр.}} = \frac{\int_0^{\infty} h(t) dt}{h(t_{\text{max}})} = \frac{\tau \int_0^{\infty} h(\frac{t}{\tau}) d(\frac{t}{\tau})}{h(t_{\text{max}})} \quad (16)$$

С учётом того, что

$$\begin{aligned} \int_0^{\infty} h(\frac{t}{\tau}) d(\frac{t}{\tau}) &= \int_0^{\infty} \{ 1,2844 e^{-t/\tau} - e^{-\frac{16}{15} t/\tau} (1,2844 \cos 0,9978 \frac{t}{\tau} - 0,9785 \sin 0,9978 \frac{t}{\tau} + \\ &+ 1,0620 \frac{t}{\tau} \cos 0,9978 \frac{t}{\tau} + 0,1423 \frac{t}{\tau} \sin 0,9978 \frac{t}{\tau}) \} d(\frac{t}{\tau}) = 1, \end{aligned}$$

соотношение (16) можно представить в виде

$$t_{\text{разр.}} = \frac{\tau}{h(t_{\text{max}})}, \quad (17)$$

где в соотношениях (16), (17) $h(\frac{t}{\tau})$ — переходная характеристика, определяемая выражением (9), τ — постоянная времени формирования.

При $\tau = \tau_{\text{опт.}}$

$$t_{\text{разр.}} = \frac{\tau_{\text{опт.}}}{h(t_{\text{max}})} = \frac{0,776 \tau_{\text{RC-RC}}}{0,4202} = 1,848 \tau_{\text{RC-RC}} \quad (18)$$

Разрешающее время при формировании одной интегрирующей и одной дифференцирующей цепью

$$t_{\text{разр. RC-RC}} = 2,718 \tau_{\text{RC-RC}} \quad (19)$$

Результаты расчёта приведены в таблице 1^{/1,7,8/} и позволяют сравнить способ формирования одной дифференцирующей RC - цепью и двойным интегрированием операционным усилителем, изображенным на рис. 1, с другими возможными способами формирования.

Принципиальная схема транзисторного спектрометрического усилителя УСТ-3, использующего описанный выше способ формирования, приведен на рис. 3-5. Усилитель состоит из пяти аналогичных по схеме каскадов усиления. Аналогичный каскад рассмотрен в работе Мейера и Верелста^{/9/}. При построении усилителя были использованы рекомендации Ферштейна и Хана^{/6,7,10,11/}.

Основные технические данные усилителя УСТ-3

1. Температурная нестабильность коэффициента усиления - не более 0,005%⁰С.

Таблица 1.

Способ формирования	Кум/сигнал	Разрешающее время	Время, за которое $\frac{1}{U_{\text{вых.}}} = \frac{1}{U_{\text{вх.}}} \text{ вых. макс.}$	Оптимальное время формирования по отношению к RC-RC формир.	Время достижения максимального значения
1. Дифференц. интегриров.	I	I			
2. Оптимальный фильтр	I,36	I,72	7,6 _{RC-RC}	_{RC-RC}	_{RC-RC}
3. RC	I,22	I,85	5,6 _{RC-RC}	0,577 _{RC-RC}	1,156 _{RC-RC}
4. RC	I,16	I,23		0,878 _{RC-RC}	1,512 _{RC-RC}
5. RC	I,14		5,2 _{RC-RC}	0,243 _{RC-RC}	2,183 _{RC-RC}
6. RC	I,12	I,12		0	
7. Формирование импульса в форме треугольника или ДЗ	I,10	I,91	7,4 _{RC-RC}	$T_{\text{н}} = 1,83 \tau_{\text{RC-RC}}$ $T_{\text{н}} = 1,29 \tau_{\text{RC-RC}}$	1,33 _{RC-RC}
8. (ЛЗ) ² Операцион. усилитель	I,08	I,03	$2\sqrt{3} \tau_{\text{RC-RC}}$	$T_{\text{н}} = \sqrt{3} \tau_{\text{RC-RC}}$	$\sqrt{3} \tau_{\text{RC-RC}}$
9. RC	I,18	I,17	4,2 _{RC-RC}	0,776 _{RC-RC}	1,398 _{RC-RC}

14

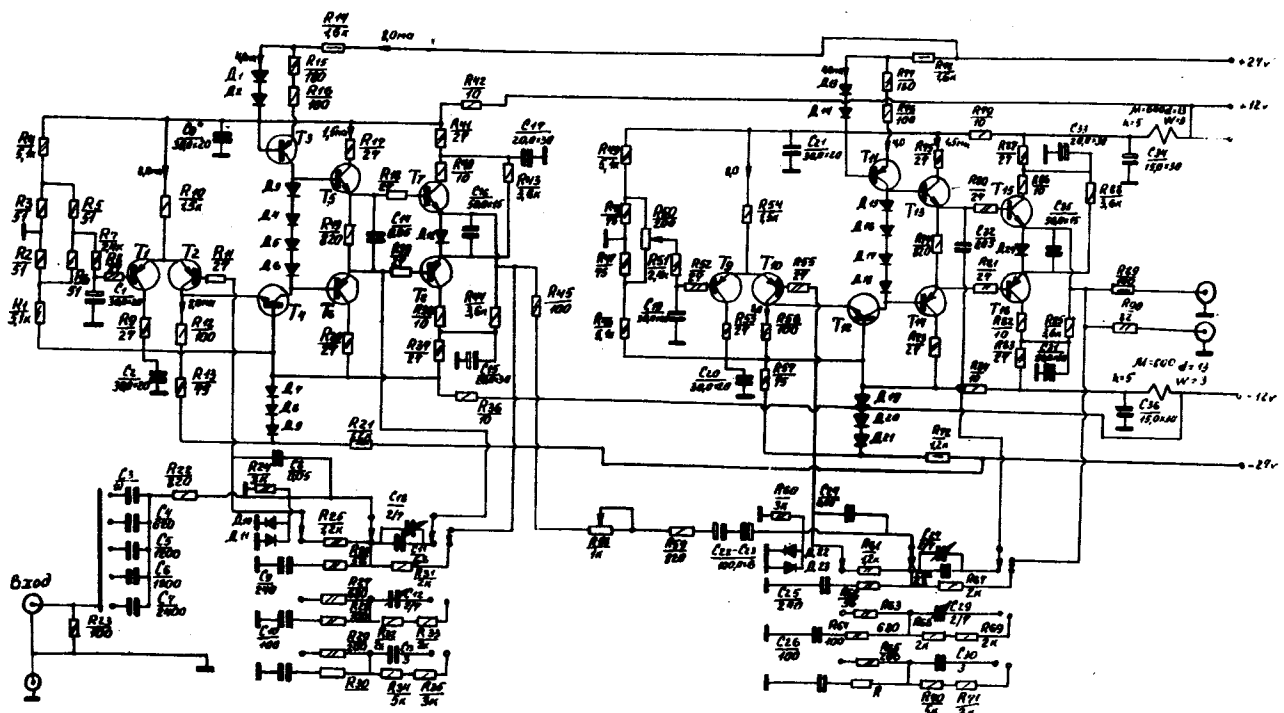


Рис. 3. Секция усилителя с изменяемым коэффициентом усиления.

15

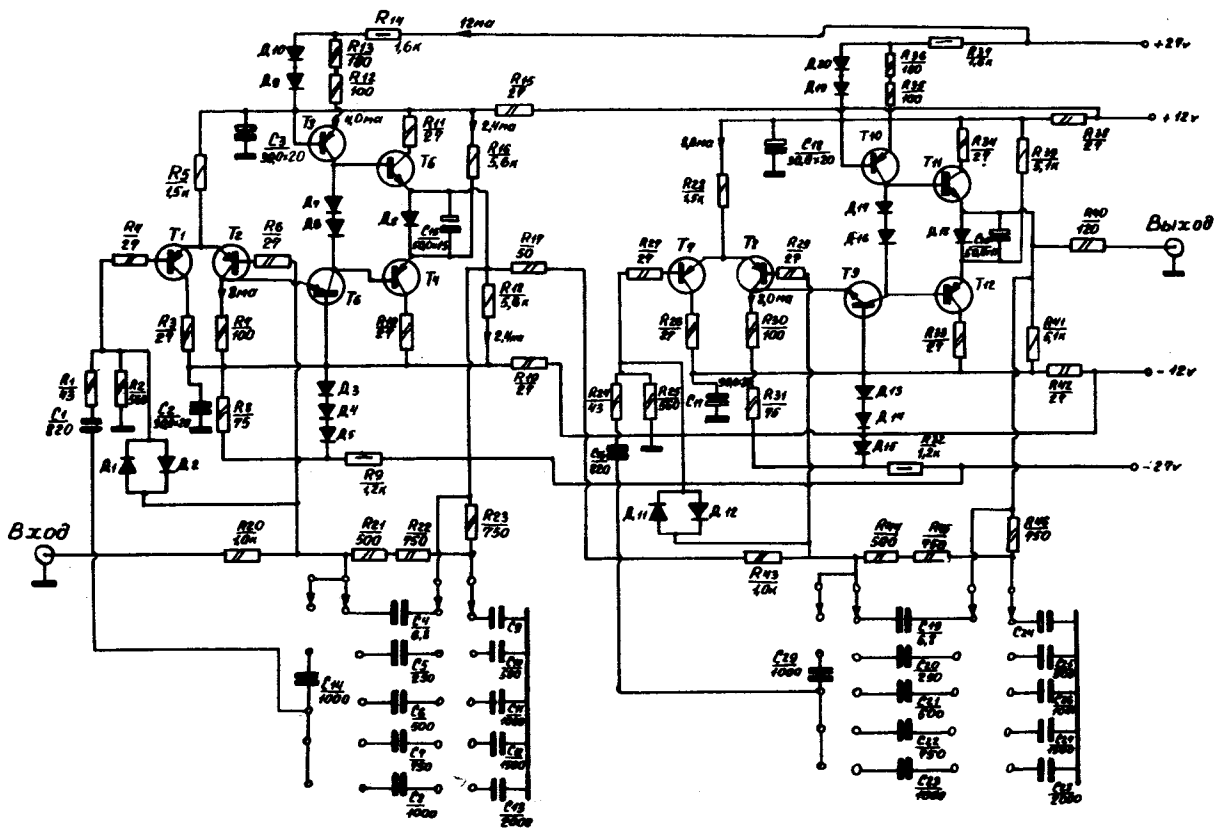


Рис. 4. Интегрирующая секция усилителя.

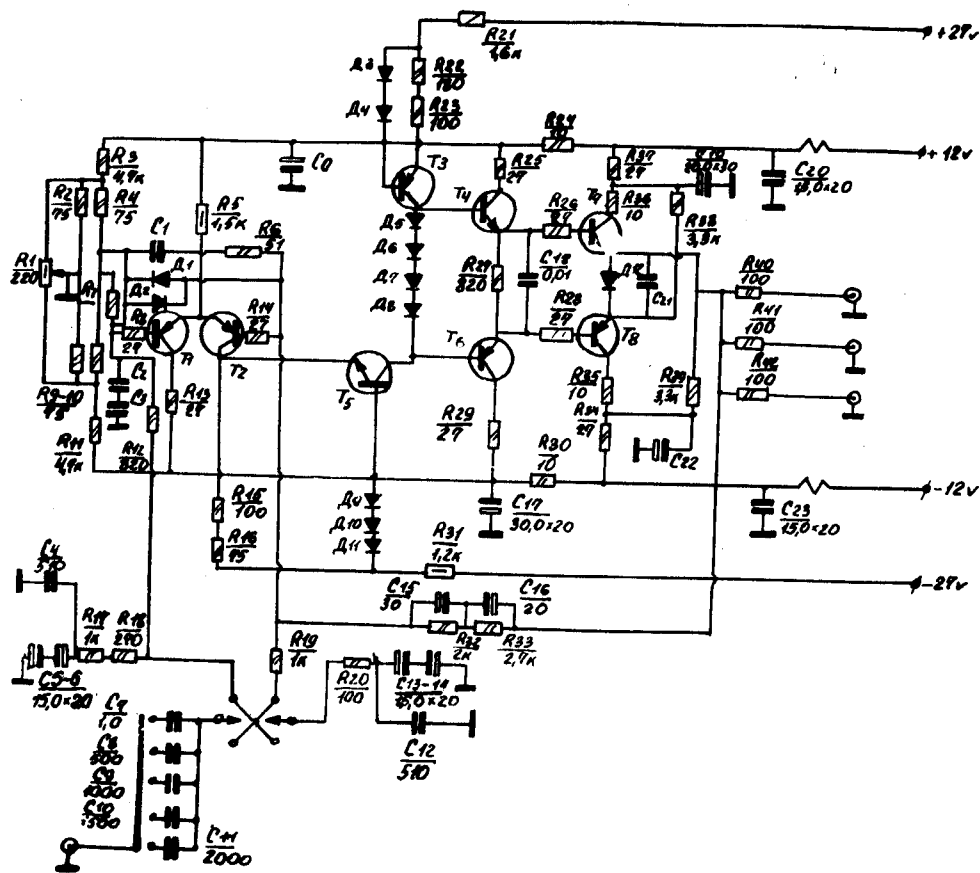


Рис. 5. Выходной каскад усилителя.

2. Коэффициент усиления при различных постоянных времени формирования сигнала:

Постоянные времени формирующих цепей	Коэффициент усиления УСТ-3
$\tau_u = 0,1 \mu\text{сек}; \tau_D = 2 \text{млсек}; 1200$	
$\tau_{u1} = \tau_{D2}$	650
$\tau_{u1} = \tau_{u2} = \tau_{D2}$	600

3. Интегральная нелинейность до выходной амплитуды 10 в - не более 0,15%.

4. Входной сигнал - отрицательный или положительный. Выходной сигнал - любой полярности.

5. Входное и выходное сопротивления - по 100 ом.

6. Среднее квадратичное значение шумов, приведенных к входу при различных способах формирования:

Способ формирования	τ μсек	Шумы, приведенные к входу (мкв)
Однократное дифференцирование и однократное интегрирование $\tau = \tau_{D2} = \tau_{u2}$	0,5	18,23
	1,0	15,2
	2,0	5,2
Однократное дифференцирование и двукратное интегрирование $\tau = \tau_{u1} = \tau_{u2} = \tau_{D2}$	0,5	8,86
	1,0	5,33
	2,0	3,584
Двукратное дифференцирование и однократное интегрирование $\tau = \tau_{D1} = \tau_{D2} = \tau_{u2}$	0,5	13,3
	1,0	9,5
	2,0	7,1

7. При входном импульсе с постоянной времени спада 300×10^{-6} сек при 100-кратной перегрузке время восстановления - 10×10^{-6} сек. (За время восстановления принимается время, отсчитанное с момента подачи перегружающего импульса, по истечении которого амплитуду следующего импульса можно измерить с точностью 1%, если этот импульс равен максимальному значению выходного импульса). Время восстановления после перегружающего импульса снималось при двукратном дифференцировании с постоянной времени формирующих цепей, равной 1×10^{-6} сек.

8. Питание стабилизированное +27в:50 ма; -27в:60 ма; +12в:90 ма; -12в:60 ма.

9. Число транзисторов - 36.

Л и т е р а т у р а

1. Ю.К. Акимов, А.И. Калинин, В.Ф. Кушнирук, Х. Юнгклауссен. "Полупроводниковые детекторы ядерных излучений и их применение". Атомиздат (1967).
2. V. Radeka *Nucleonics* July 1965 v. 23 N.7.
3. Б.В. Фефилов. "Некоторые вопросы согласования спектрометрических импульсных усилителей с полупроводниковыми детекторами ядерных излучений". Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. ОИЯИ, Дубна (1965).
4. А.А. Санин. "Электронные приборы ядерной физики", Москва, (1961).
5. А.Б. Джиллеспи. "Сигнал, шум и разрешающая способность усилителей". Перевод с англ., Атомиздат (1964).
6. Fairstein E., Hahn J. *Nucleonics* v. 24, N1, Jan. 1966, p.55.
7. Fairstein E., Hahn J. *Nucleonics*, v.23, N.11 Novemb. 1965.

8. K.Hahn *IEEE Trans.* 1968, NS-15 N1, p.303.

9. H.Meyer, H.Verelst. "Spectral performance of a H(Li) pulse height spectrometer at high event rates. International symposium on nuclear electronics", Versailles 10-13, September (1968).

10. Fairstein E., Hahn J. *Nucleonics* v.23, N9, 1965.

11. Fairstein E., Hahn J. *Nucleonics* v.24, N3, 1966.

Рукопись поступила в издательский отдел

28 апреля 1968 года.