

УДК 621.383.45

ОПТИМАЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЙ

Ю. Н. Долганин, В. В. Загулин

Государственное унитарное предприятие «НПО "Орион"», Москва, Россия

Рассмотрены вопросы оптимального включения фотосопротивлений (ФС) в схему питания с точки зрения выбора оптимального сопротивления нагрузки и оптимизации режима питания при выборе тока смещения с учетом особенностей каждого из направлений оптимизации. Даны некоторые рекомендации по практической реализации оптимальных режимов включения ФС.

Вопросы оптимального включения фотосопротивлений (ФС) в схему питания при технической реализации на практике традиционно рассматриваются с двух сторон: выбор оптимального сопротивления нагрузки и оптимизация режима питания при выборе тока смещения. Выбор сопротивления нагрузки, в свою очередь, рассматривается с точек зрения получения максимальной амплитуды сигнала, минимизации зависимости выходного сигнала от изменения характеристик ФС (например темнового или "фонового" сопротивления), достижения максимального отношения сигнала к шуму. Практические схемы включения ФС представлены на рис. 1.

Ниже приведены особенности каждого из направлений оптимизации для указанных схем и даны некоторые рекомендации по практической реализации оптимальных режимов включения ФС.

Термины и определения. ФС относится к приемникам излучения с внутренним фотоэффектом, проявляющимся в изменении проводимости полупроводника. Известно*, что изменение проводимости $\Delta\sigma$ при облучении ФС не зависит от темновой концентрации свободных носителей (с точностью до второго и более высоких порядков малости) и может быть записана в виде

$$\Delta\sigma = \sigma_c - \sigma_t = e\mu \Delta n b d / l = \text{const } \Delta n, \quad (1)$$

где e — заряд электрона;

μ — подвижность заряда;

Δn — изменение концентрации свободных носителей при облучении;

b, d, l — геометрические параметры ФС;

индексы "т" и "с" — темновое и световое состояния ФС.

* Соболева Н. А. и др. Фотоэлектронные приборы/Под ред. Д. В. Зернова — М.: Наука, 1965. — 592 с.

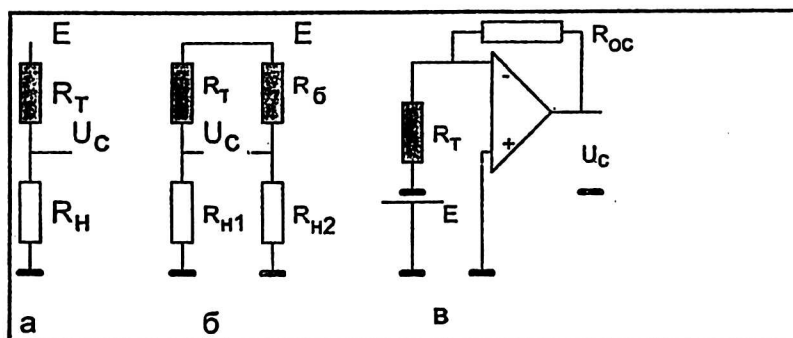


Рис. 1. Примеры практических схем включения фотосопротивления (а, б, в):
 $R_T, R_б, R_H, R_{oc}$ — соответственно фотосопротивление, балластное сопротивление,
 нагрузочное сопротивление, сопротивление обратной связи; E — источник питания;
 U_c — напряжение сигнала

В противоположность этому изменение сопротивления

$$\Delta R = R_c - R_T = 1 / \sigma_c - 1 / \sigma_T = \Delta \sigma / (\sigma_c \sigma_T) = \text{const } \Delta n / n^2,$$

т. е. приращение сопротивления (ΔR) пропорционально Δn и обратно пропорционально концентрации свободных носителей. Иначе говоря, только чувствительность к изменению потока оптического излучения, выраженная в изменении проводимости (назовем ее “сименсовой”), может считаться собственной чувствительностью ФС, тогда как чувствительность, выраженная в изменении сопротивления (“омная”), зависит еще и от величины темнового сопротивления. В этом смысле термин “фотосопротивление” (как физическое явление) не является полностью адекватным принципу работы рассматриваемого приемника излучения; более удачным, на наш взгляд, является термин “фотопроводимость”.

В практическом же применении для оценки качества ФС используются такие показатели, как вольтовая, токовая и пороговая чувствительности.

В общем случае чувствительность фотосопротивления S_w дается в виде отношения выходного сигнала W к падающей мощности F .

$$S_w = W/F. \tag{2}$$

Для ФС это выражение можно записать следующим образом:

$$S_w = (W/\Delta\sigma) (\Delta\sigma/F), \tag{3}$$

где $\Delta\sigma$ — изменение фотопроводимости.

Такое представление S_w позволяет вычленив в определении чувствительности два независимых друг от друга сомножителя, первый из которых характеризует схему включения ФС, а второй — собственную чувствительность ФС.

Оптимизация сопротивления нагрузки ФС. Получение максимальной амплитуды сигнала ФС, как правило, рассматривается для приемников с относительно большим уровнем шумов. Традиционную схему включения ФС, представленную на рис. 1, а, целесообразно оценивать с помощью вольтовой чувствительности, поскольку полезный сигнал выделяется на R_H в виде напряжения U_c . При этом

$$W/\Delta\sigma = U_c/\Delta\sigma = E R_H R_T^2 / (R_H + R_T^2). \tag{4}$$

Рассмотрим два возможных режима питания: с постоянным напряжением питания (E_0) и постоянным током смещения ($I_{\text{ц}}$) через цепочку нагрузка — ФС.

Нетрудно показать, что в случае постоянного напряжения питания ($E_0 = \text{const}$) максимальное напряжение сигнала (U_c) получится при так называемом согласованном включении, т. е. при равенстве темнового сопротивления приемника излучения сопротивлению нагрузки ($R_T = R_H$), причем

$$U_c = E_0 \Delta R / 4 R_T = I_{\text{ц}} \Delta R / 2, \quad (5)$$

где $I_{\text{ц}}$ — ток в цепочке нагрузка — ФС, соответствующий напряжению питания E_0 ;

ΔR — изменение сопротивления ФС под действием излучения.

Соответственно $U_c / \Delta \sigma = E_0 R_T / 4 = I_{\text{ц}} R_T^2 / 2$.

Выражения (4), (5) справедливы только при условиях $\Delta R \ll R_T$ и $R_T \ll R_{\text{вх}}$, где $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление усилителя; под сигналом здесь понимается изменение напряжения с зажимов нагрузки.

Также очевидно, что при заданном токе ($I_{\text{ц}} = \text{const}$) через цепочку $R_T - R_H$ максимальное напряжение сигнала соответствует соотношению $R_T \ll R_H$, причем получаемые значения напряжения сигнала $U_c = I_{\text{ц}} \Delta R$ и $U_c / \Delta \sigma = I_{\text{ц}} \Delta R_m^2$ в два раза больше соответствующих величин в цепочке с согласованной нагрузкой и $E_0 = \text{const}$ (сравнение напряжений сигналов проводится, разумеется, при одинаковых токах через ФС).

Сравнительный анализ указанных режимов питания цепочки $R_T - R_H$ позволяет отметить, что (для высокоомных ФС) единственным преимуществом включения ФС с большой или с согласованной нагрузкой является уровень сигнала, однако при относительно высоком уровне собственных шумов ФС это не имеет практического значения. Кроме того, обеспечение постоянного тока в цепочке (достаточно безобидное требование для низкоомных ФС) при высокоомном приемнике излучения становится проблематичным.

В то же время, если уровень собственных шумов ФС позволяет работать с малой нагрузкой, то значительно улучшаются такие характеристики приемника, как:

- инерционность (за счет уменьшения эквивалентного сопротивления);
- взаимосвязь между чувствительными площадками в многоэлементном приемнике (за счет уменьшения влияния проходного сопротивления);
- стабилизация чувствительности схемы (за счет уменьшения перераспределения напряжения и его стабилизации ФС);
- диапазон линейности энергетической характеристики ФС (за счет уменьшения перераспределения напряжения).

В низкоомных многоэлементных приемниках излучения, когда сопротивление подводящих токоведущих дорожек r является значимой величиной по сравнению с R_T , режим $R_H \ll R_T$ становится губительным для величины коэффициента взаимосвязи между чувствительными площадками (рис. 2).

В соответствии с рис. 2 для случая $R_H \ll R_T$ изменение сопротивления R_T вызовет в соседней цепочке приращение U_c с коэффициентом пропорциональности $K \approx 1/(1 + R_T/r)$. Согласованная нагрузка уменьшит коэффициент связи до величины, по порядку равной $K \approx 1/(1 + (R_T + R_H)/r)$.

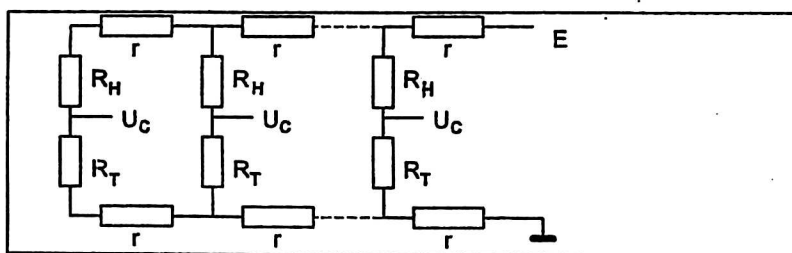


Рис. 2. Эквивалентная схема включения многоэлементного фотосопротивления: r — сопротивление ведущих дорожек (другие обозначения см. рис. 1)

И, наконец, для $R_H \ll R_T$ связь между сигналами в соседних цепочках будет близка к нулю.

Общим недостатком схемы, представленной на рис. 1, а, является наличие в сигнале U_c постоянной составляющей, превосходящей по уровню переменную на порядки из-за протекания по цепочке $R_T - R_H$ темнового (фонового) тока. На практике постоянная составляющая сигнала отсекается с помощью разделительной емкости, устанавливаемой на входе предварительного усилителя, или, что лучше, с помощью схем минимального значения постоянной составляющей (по аналогии с принятым в телевидении “уровнем черного”). Последний подход предпочтительнее, поскольку для уменьшения влияния емкости на частотную характеристику фотоприемного устройства (ФПУ) ее величина должна быть достаточно большой.

Схема на рис. 1, б позволяет исключить постоянную составляющую сигнала, но этим перечисление ее положительных качеств и оканчивается. С точки зрения максимизации сигнала выводы, сделанные о схеме, приведенной на рис. 1, а, полностью пригодны для описания принципа работы схемы на рис. 1, б. Несколько ухудшает качество схемы на рис. 1, б наличие цепочки $R_T - R_H$. Это связано в первую очередь с отсутствием в сигнале общей точки с источником питания, а также со слабой пригодностью мостовой схемы включения ФС к миниатюризации.

В схеме, приведенной на рис. 1, в, выходное напряжение переменной составляющей сигнала записывается как

$$U_c = ER_{oc} \Delta R / R_T^2 = ER_{oc} \Delta \sigma, \tag{6}$$

где R_{oc} — сопротивление обратной связи операционного усилителя (ОУ).

Операционный усилитель (см. рис. 1, в) по отношению к переменной составляющей сигнала работает крайне невыгодно, поскольку коэффициент передачи определяется соотношением R_{oc}/R_T как для переменной, так и для постоянной составляющей сигнала. При соотношении $\Delta R/R_T$ на уровне долей процента получение удовлетворительного усиления для переменной составляющей сигнала приводит к "насыщению" выходного напряжения ОУ по постоянной составляющей. К сожалению, отрицательно сказывается режим короткого замыкания, организованный ОУ, на уровень коэффициента электрической связи. Его значение определяется выражением $K \approx 1/(1+R_T/r)$.

С другой стороны, схема на рис. 1, в удачно реализует режим работы ФС, при котором выходное напряжение переменной составляющей сигнала пропорционально собственной чувствительности ФС и не зависит от темнового сопротивления последнего.

Таким образом, максимизация амплитуды сигнала может быть использована только в тех случаях, когда собственные шумы приемника относительно велики. Однако ее реализация в рассмотренных схемах включения либо нецелесообразна из-за возможности перегрузки усилителя (см. рис. 1, в), либо даже вредна, поскольку требует большого напряжения питания и ухудшает собственные характеристики ФС (см. рис. 1, а, б).

Если же собственные шумы приемника сопоставимы по уровню с шумами предварительного уровня, то оптимизация по критерию максимума амплитуды сигнала вообще теряет смысл и на первые роли выдвигается критерий максимального отношения сигнал/шум.

Для анализа возможностей рассматриваемых схем включения по критерию максимального отношения сигнал/шум необходимо рассмотреть их эквивалентные схемы с указанием источников шумов (рис. 3).

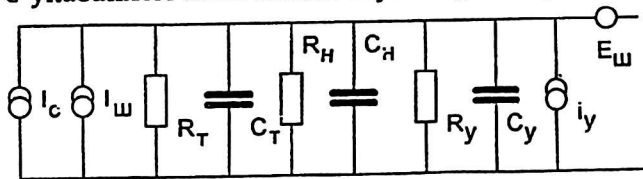


Рис. 3. Эквивалентная схема включения фотосопротивления:
 I_c , $I_ш$, I_y — соответственно генераторы тока сигнала, шума ФС, шумового тока усилителя; $E_ш$ — генератор ЭДС-шума; R_T , C_T , R_H , C_H , R_y , C_y — сопротивления и емкости ФС, нагрузки и усилителя, соответственно

Генератор шума ФС $I_ш$, среднеквадратическое значение тока шума которого для среднего диапазона частот определяется выражением для генерационно-рекомбинационного (г-р) шума

$$I_ш = 2I_{ц} \sqrt{\tau B / N_0 (1 + \omega^2 \tau^2)},$$

где τ — время жизни неосновных носителей;

B — ширина полосы измерительного тракта;

N_0 — полное число свободных носителей;

ω — циклическая частота;

I_y — генератор шумового тока усилителя, определяемый током утечки входного каскада.

Генераторы теплового шума сопротивлений в схеме опущены.

Часто при анализе шумовых характеристик ФС оценка г-р-шума проводится с помощью выражения

$$I_{ш}^2 = 4qI_{ц}G f(\omega),$$

где q — заряд электрона;

G — коэффициент усиления тока;

$f(\omega)$ — функция частоты.

Заметим, что такая запись вводит в заблуждение, поскольку на ее основании делается ошибочный вывод о том, что среднеквадратический ток г-р-шума является функцией корня квадратного тока смещения. При этом упускается, что коэффициент усиления по току G также является функцией тока смещения (влияние эффекта вытягивания зарядов будет рассмотрено ниже).

Для высокоомных ФС (см. рис. 1, а), когда $R_T = R_H < R_y$, влияние ЭДС-шума мало, так как $E_{ш}/R_y \ll I_y$ (здесь $1/R_y = 1/R_T + 1/R_H$).

Отношение сигнал/шум на входе усилителя можно записать как

$$U_c / U_{ш} = I_c Z_y \left\{ Z_y \sqrt{I_{ш}^2 + I_y^2} \right\},$$

где $1/Z_y = 1/R_y + j\omega C_y$.

Для среднего диапазона частот и $I_{ш} > I_y$ получим $U_c/U_{ш} = a\Delta R/R_T$, где a — коэффициент пропорциональности, связывающий $I_{ш}$ и $I_{ц}$ в цепочке $R_H - R_T$ при $E = \text{const}$. Аналогично и при $I_{ц} = \text{const}$.

В случае $E = \text{const}$ и низкоомного ФС влиянием $E_{ш}$ нельзя пренебречь. И это влияние будет тем больше, чем меньше R_y , поскольку относительная доля $E_{ш}$, включенного последовательно ко входу усилителя, будет возрастать, а отношение сигнал/шум уменьшаться.

При $I_{ц} = \text{const}$ и низкоомном ФС влияние $E_{ш}$ по сравнению с $E = \text{const}$ можно уменьшить. Отношение сигнал/шум будет максимальным для $R_H \gg R_T$, когда влияние $E_{ш}$ обусловлено только собственным сопротивлением приемника излучения, т. е. схема на рис. 1, а при высокоомном ФС, в смысле оптимизации отношения сигнал/шум, безразлична к относительному сопротивлению нагрузки и требует $R_H \gg R_T$ при низкоомном ФС, причем уровень шума при $R_H \gg R_T$ меньше, чем при $R_H = R_T$. Эти выводы справедливы с учетом принятых допущений и для схемы на рис. 1, в (роль R_H выполняет R_{oc}).

Оптимизация по критерию минимальной зависимости выходного сигнала от изменений внутреннего сопротивления ФС (медленных во времени или от приемника к приемнику) возможна только тогда, когда выходной сигнал является функцией только собственной чувствительности ФС (см. (1)).

Схема на рис. 1, а (аналогично и схема на рис. 1, б) не позволяет выполнить оптимизацию по рассматриваемому критерию, так как только при $R_H \Rightarrow 0$ выходное напряжение

$$U_{\text{ВЫХ}} = ER\Delta R / (R_H + R_T)^2 \approx ER_H \Delta \sigma \Rightarrow 0$$

становится величиной, независимой от R_T . Эта реализация не представляет практического интереса, так как $U_{\text{ВЫХ}} \Rightarrow 0$.

Схема на рис. 1, в, в соответствии с (6) реализует режим короткого замыкания и постоянство напряжения смещения на ФС, что обеспечивает минимизацию зависимости выходного сигнала от изменения темнового сопротивления ФС. Это особенно важно при выравнивании выходных сигналов многоэлементного приемника тепловизора, в случаях временной нестабильности сопротивлений или их изменения за счет фоновой нагрузки, например при изменении температуры окружающей среды.

К сожалению, схемная реализация ФПУ, обеспечивающего режим короткого замыкания и регистрацию изменения тока через ФС, представляет собой непростую задачу, особенно в миниатюрном исполнении. Сложность такой задачи объясняется наличием большого уровня постоянной составляющей сигнала в ФС из-за темнового тока. При этом относительный уровень полезного сигнала составляет доли процента постоянной составляющей.

Принципиально такая задача решается с помощью ФПУ, схема которого приведена на рис. 1, в ($R_{\text{ос}}$ заменено индуктивностью $L_{\text{ос}}$). Последовательно включенные между собой источник питания напряжением E и фотосопротивление R_T подключаются к инвертирующему входу ОУ, в цепи обратной связи которого включена индуктивность $L_{\text{ос}}$. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = EL_{\text{ос}} / R_T$. Если сопротивление R_T во времени не изменяется, то $U_{\text{ВЫХ}} \Rightarrow 0$, так как пассивная составляющая комплексного сопротивления обратной связи $Z_{\text{ос}}$ мала, и наоборот, если облучение ФС вызывает переменный во времени сигнал, то на выходе ОУ возникает напряжение, пропорциональное приращению проводимости $U_{\text{ВЫХ}} = E\Delta\sigma L_{\text{ос}}$.

Недостатками такого решения являются частотная зависимость коэффициента преобразования входного тока ОУ и наличие индуктивности, реализация которой в интегральном исполнении чрезвычайно затруднительна.

Резюмируя вышесказанное, можно сформулировать требования к предварительному усилителю ФПУ при оптимизации по критерию минимальной зависимости выходного сигнала от изменений внутреннего сопротивления ФС:

- режим короткого замыкания для ФС;
- регистрация изменения тока через ФС в качестве выходного сигнала;
- минимальный коэффициент усиления (преобразования) для постоянной составляющей сигнала и максимальный для переменной;
- минимальное использование реактивных элементов.

Примером реализации таких требований может служить устройство, блок-схема которого показана на рис. 4, а, б. Устройство содержит частотно-корректированный основной каскад на ОУ, малошумящий источник тока, источник опорного напряжения, активный фильтр по питающему напряжению, активный фильтр по питающему напряжению.

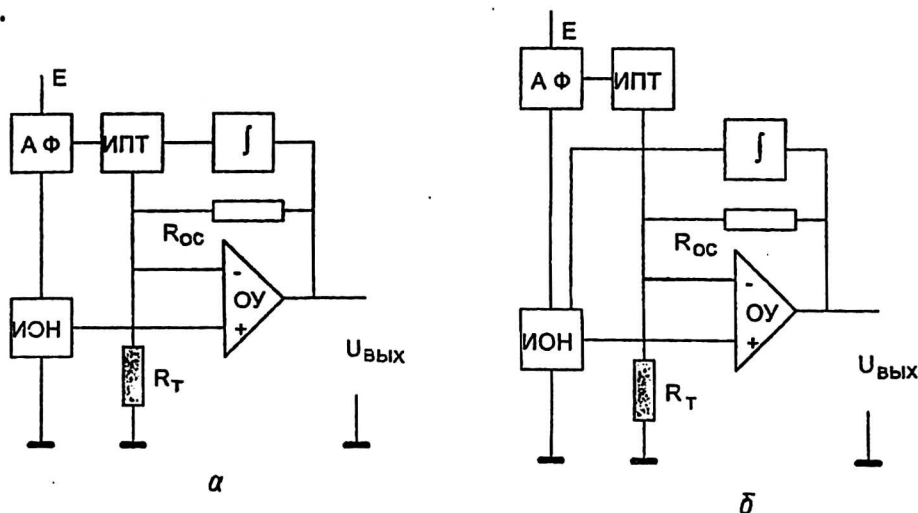


Рис. 4. Примеры схем (а, б) включения фотосопротивления:

ОУ — операционный усилитель; ИПТ — малошумящий источник тока; ИОН — источник опорного напряжения; АФ — активный фильтр по питающему напряжению; ∫ — интегратор; R_T — фотосопротивление; R_{oc} — сопротивление обратной связи; E — источник питания; $U_{вых}$ — напряжение сигнала

Основной каскад по инвертирующему входу представляет собой преобразователь ток—напряжение, а по неинвертирующему входу — повторитель напряжения.

На рис. 4, а ИОН задано напряжение на ФС, равное $U_{оп}$; ИПТ, управление которого через посредство интегратора ∫ осуществляется выходным напряжением $U_{вых}$, обеспечивает через ФС ток, по уровню соответствующий $U_{оп}/R_T$, т. е. при изменении темнового сопротивления ФС ток через него изменяется так, что напряжение на ФС остается постоянным и равным $U_{оп}$. Наличие цепей, параллельных обратных связей в ОУ, обеспечивает режим короткого замыкания ФС как по переменному, так и по постоянному току, с коэффициентами преобразования, соответственно, R_{oc} и 0. Постоянная составляющая сигнала на выходе ОУ благодаря наличию цепи обратной связи с интегратором равна $U_{оп}$ (эта величина не зависит от сопротивления ФС), а переменная — описывается выражением

$$\Delta U_{вых} = U_c = U_{оп} R_{oc} \Delta R / R_T^2 = U_{оп} R_{oc} \Delta \sigma.$$

В схеме, приведенной на рис. 4, б, ИОН, задающей напряжение на ФС, управляется через посредство интегратора ∫ выходным напряжением $U_{вых}$ так, что обеспечивает через ФС ток, по уровню соответствующий току, зада-

ваемому ИПТ. Наличие цепи, параллельной обратной связи в ОУ (R_{oc}), обеспечивает режим короткого замыкания ФС как по переменному, так и по постоянному току с коэффициентом преобразования R_{oc} . Однако в ОУ имеется еще и последовательная обратная связь по постоянному току (интегратор \int), что обеспечивает режим холостого хода по постоянному току, т. е. при изменении темнового сопротивления ФС напряжение на нем изменяется так, что ток $I_{ц}$ через ФС остается постоянным. Постоянная составляющая сигнала на выходе ОУ благодаря наличию цепи обратной связи с интегратором равна $I_{ц}R_T(1 + R_{oc}/R_T)$, причем эта величина не зависит от сопротивления ФС. Переменная составляющая описывается выражением

$$\Delta U_{ввх} = U_c = I_{ц}R_T R_{oc} \Delta R/R_T^2 = I_{ц}R_T R_{oc} \Delta \sigma.$$

Сравнительные характеристики схем включения ФС при оптимизации R_H приведены в таблице. Оценки той или иной характеристики схемы приводятся в виде аналитических выражений, а также знаков качества ("+" — положительное качество; "-" — отрицательное; "±" — нейтральная оценка).

Оптимизация тока смещения. Анализ выражения (7) показывает, что мощность г-р-шума пропорциональна току смещения ФС и коэффициенту усиления тока G , т. е. ток фотосигнала пропорционален G , а среднеквадратическое значение тока г-р-шума равно \sqrt{G} . В свою очередь, G является величиной, зависящей от тока, причем эта зависимость в пределе имеет насыщение, когда начинает доминировать эффект вытягивания неосновных носителей (рис. 5).

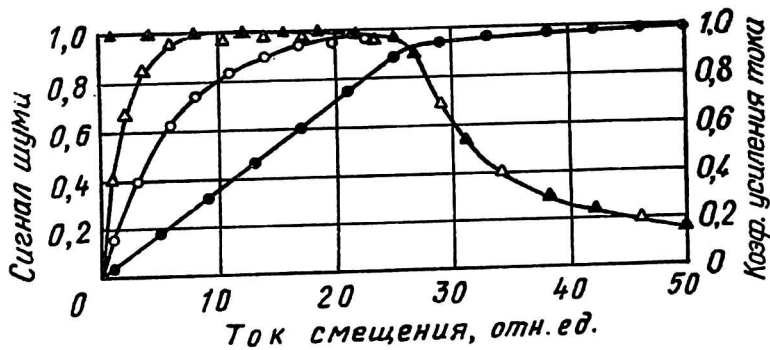


Рис. 5. Коэффициент усиления тока и отношение сигнал/шум в функции тока сопротивления

Величина G как функция тока смещения приводит к тому, что с ее ростом до точки перегиба отношение сигнал/шум остается постоянным. Дальнейший рост тока смещения приводит к насыщению коэффициента усиления G и спаду отношения сигнал/шум, как показано на рис. 5. Левый спад кривых $U_c/U_{ш}$ объясняется наличием у ФС теплового шума. Соотношением теплового и г-р-шумов определяется скоростью спада кривых $U_c/U_{ш}$.

Эффектом вытягивания можно пренебречь при слабом фоновом излучении и низкой температуре ФС, т. е. при обнаружении малых сигналов, когда существенным становится захват неосновных носителей заряда. Платой за повышение G при захвате будет некоторое увеличение инерционности ФС.

Сравнительные характеристики схем включения фотосопротивлений

Тип ФПУ, режим питания	Напряжение выходного сигнала	Связь U_c и от	Отношение сигнал/шум		Коеф. электрич. связи		Питание	Инерци- онность	Постоянная составляющая
			Низкоомное ФС	Высокоом- ное ФС	Низкоомное ФС	Высоко- омное ФС			
Цепочка $R_H = R_T$ $E_0 = \text{const.}$ Схема (рис. 1, а)	$U_c = E_0 \Delta R / 4R_T$ (-)	$U_c = E_0 \Delta \sigma / 4\sigma$ (-)	$\sqrt{A + 4E_w^2 / R_T^2}$ (-)	Независимо от R_H	$\sim 1 / (1 + R_T + R_T / \eta)$ (+)	(±)	$E = E_0$ (±)	(±)	$U = E_0 / 2$ (-)
Цепочка $R_H \gg R_T$ $I = \text{const.}$ Схема (рис. 1, а)	$U_c = E_0 \Delta R / 2R_T$ (-)	$U_c = E_0 \Delta \sigma / 2\sigma$ (-)	$\sqrt{A + E_w^2 (1 + R_T / R_H)^2 R_T^2}$ (-)	То же	~ 0 (+)	(±)	$E \approx E_0 R_T / 2R_T$ (-)	(±)	$U = E_0 R_H / 2R_T$ (-)
ОУ+ФС. Схема (рис. 1, в)	$U_c = E_0 R_{oc} \Delta R / R_T^2$ (+)	$U_c = E_0 R_{oc} \Delta \sigma$ (+)	$\sqrt{A + E_w^2 (1 + R_T / R_{oc})^2 R_T^2}$ (+)	Независимо от R_{oc}	$\sim 1 / (1 + R_T / \eta)$ (-)	(±)	$E \approx E_0^2$ (+)	(±)	$U = E_0 R_{oc} / 2R_T$ (-)
Схема (рис. 4, а)	$U_c = U_{on} R_{oc} \Delta R / R_T^2$ (+)	$U_c = U_{on} R_{oc} \Delta \sigma$ (+)	$\sqrt{A + E_w^2 (1 + R_T / R_{oc})^2 R_T^2}$ (+)	То же	$\sim 1 / (1 + R_T / \eta)$ (-)	(±)	E (+)	(±)	$U = U_{on}$ (+)
Схема (рис. 4, б)	$U_c = I R_T R_{oc} \Delta R / R_T^2$ (+)	$U_c = I R_T R_{oc} \Delta \sigma$ (+)	$\sqrt{A + E_w^2 (1 + R_T / R_{oc})^2 R_T^2}$ (+)	"	$\sim 1 / (1 + R_T / \eta)$ (-)	(±)	E (+)	(±)	$U = I R_T (1 + R_{oc} / R_T)$ (±)

Графики на рис. 5 показывают, что отношение сигнал/шум растет с увеличением тока смещения до максимального значения и, в зависимости от соотношения теплового и г-р-шумов, имеет оптимум или "полочку". При наличии "полочки" (когда г-р-шум превалирует над тепловым шумом) может быть использована схема, показанная на рис. 4, а, обеспечивающая постоянное напряжение на ФС независимо от его темнового сопротивления. Схема на рис. 4, б рекомендуется для случая, когда г-р-шум сравним с тепловым, и для достижения оптимума (в отношении сигнал/шум) требуется поддерживать ток смещения постоянным и независимым от R_T .

Другой причиной, ограничивающей рост тока смещения через ФС, является увеличение крутизны роста шумового тока за счет достижения мощности рассеяния на приемнике предельного значения. Заметим, что форма кривой $U_c/U_{ш}$ на рис. 5 при этом не изменяется.

Выводы и рекомендации

Сименсовая чувствительность является показателем качества ФС. Вольтовая, токовая, омная и пороговая чувствительности характеризуют не только качество ФС, но и схему включения последнего (связь указанных параметров с сименсовой чувствительностью осуществляется с помощью формулы (3)).

Оптимизация сопротивления нагрузки по критерию максимума амплитуды сигнала для случая, когда собственные шумы ФС относительно входного каскада усилителя велики, либо нецелесообразна, поскольку возможна перегрузка усилителя по постоянной составляющей сигнала (см. схему на рис. 1, в), либо вредна, так как требует большого напряжения питания и ухудшает собственные характеристики ФС (см. схемы на рис. 1, а, б).

Оптимизация сопротивления нагрузки по критерию максимума амплитуды сигнала для случая, когда собственные шумы ФС относительно входного каскада усилителя малы, не проводятся.

Оптимизация сопротивления нагрузки по критерию максимального отношения $U_c/U_{ш}$ для низкоомного ФС достигается при $R_H \gg R_T$ (причем уровень шума при $R_H \gg R_T$ меньше, чем при $R_H = R_T$).

Для высокоомного ФС с преобладанием г-р-шума над тепловым критерием максимального отношения $U_c/U_{ш}$ безразличен к величине R_H .

Оптимизация сопротивления нагрузки по критерию минимальной зависимости выходного сигнала от изменений темнового сопротивления ФС достигается тогда, когда выходной сигнал является функцией только собственной чувствительности ФС, т. е. в режиме короткого замыкания (см. схемы на рис. 4, а, б).

Оптимизация сопротивления нагрузки по критерию минимальной зависимости выходного сигнала от изменений темнового сопротивления ФС для низкоомных приемников излучения имеет побочный эффект — возрастает коэффициент электрической связи.

Ток смещения по критерию максимального отношения $U_c/U_{ш}$ имеет оптимум, определяемый материалом приемника и его конструкцией.

OPTIMUM SCHEME CONNECTION OF PHOTORESISTORS

Yu. N. Dolganin, V. V. Zagulin

State Unitary Enterprise «RD&P Center "ORION"», Moscow, Russia

A problem of optimum photoresistor scheme connection with power supply is examined from the following points of view: choosing of optimum load resistance value; choosing of optimum schift current value. In addition some practical recommendations are given.