

К. т. н. В. И. КОРНЕЙЧУК, О. А. РОГАЛЕВИЧ

Дата поступления в редакцию
20. 03 2003 г.

Украина, Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
E-mail: vols@usat.ukrtel.net

Оппонент Д. Г. ГРИГОРУЦА
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ С ИСКУССТВЕННЫМ РЕЗИСТОРОМ

"Искусственный" резистор в цепи обратной связи ФПУ позволяет улучшить отношение сигнал/шум в полосе пропускания ≤ 10 кГц.

Одним из направлений улучшения шумовых показателей широкополосных микроэлектронных фотоприемных устройств (ФПУ) является применение в цепи отрицательной обратной связи (ОС) операционного усилителя двухполосника, имеющего заданное активное сопротивление и пониженную относительно обычного резистора эквивалентную шумовую температуру. Идея таких «холодных» двухполосников впервые была высказана в 1939 г. [1] и реализована на основе электровакуумных ламп. Позже были предложены схмотехнические реализации таких двухполосников, названных *искусственными* (artificial) резисторами [2], на транзисторах и операционных усилителях.

В [2] предложена схемная реализация искусственного резистора (ИР), дан анализ ее работы, выведены соотношения для расчета отношения сигнал/шум на выходе ФПУ, использующего обычный и искусственный резисторы в цепи ОС. В настоящей работе проведена экспериментальная проверка целесообразности использования одной из возможных реализаций ИР в составе ФПУ импульсных оптических сигналов [3].

Известно, что для улучшения чувствительности микроэлектронного ФПУ необходимо применять в цепи ОС операционного усилителя (ОУ) активный резистор большого номинала [4, с. 203]. Однако если для усилителя, следующего за фотодиодом (ФД), требуется сохранить заданный коэффициент преобразования "ток—напряжение", то для обеспечения высокого отношения сигнал/шум лучше использовать ИР. Последний представляет собой усилитель, например, операционный, в цепь ОС которого включен резистор большого номинала R_1 , а на вы-

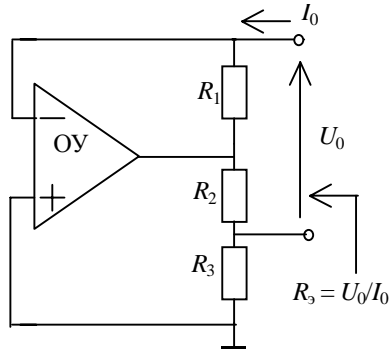


Рис. 1. Структурная схема искусственного резистора на основе ОУ

ходе — делитель напряжения R_2, R_3 (см. рис. 1, цепи питания ОУ не показаны). Таким образом, ИР как двухполюсник имеет низкое эквивалентное сопротивление R_3 , а генерируемое им напряжение шума остается таким же, как и у обычного резистора в цепи ОС искусственного резистора, т. е. высоким.

Принципиальная схема ФПУ с ИР представлена на рис. 2 (цепи питания ОУ1, ОУ2 и обратного смещения ФД не показаны).

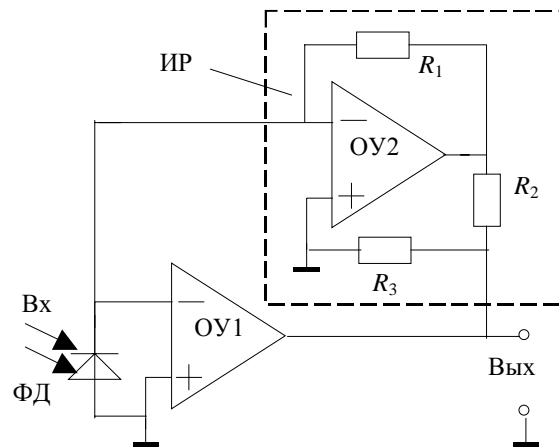


Рис. 2. Структурная схема ФПУ с искусственным резистором в цепи ОС

Активное эквивалентное сопротивление искусственного резистора, выполненного по схеме рис. 1, равно

$$R_3 = [R_3 / (R_2 + R_3)] (R_1 + R_2).$$

Удобно ввести относительный шумовой параметр $m = R_3 / (R_2 + R_3)$, причем $m \ll 1$. Поскольку на практике выполняется условие $R_1 \gg R_2 \gg R_3$, то $R_3 = mR_1 \approx R_1 R_3 / R_2$ и активное эквивалентное сопротивление ИР равно сопротивлению цепи ОС, деленному на коэффициент деления напряжения резистивного делителя R_2, R_3 .

Среднеквадратическое значение напряжения шума на выводах ИР

$$u_{ш\text{ ир}}^2 = 4kT\Delta f m R_3, \quad (1)$$

где kT — произведение постоянной Больцмана на температуру резистора;

Δf — ширина полосы пропускания ФПУ для шума.

Из (1) следует, что использование ИР дает эквивалентное снижение температуры шума в $1/m$ раз —

$$\overline{u_{ш\text{ ир}}^2} = 4k(mT)\Delta f R_3.$$

Таким образом, ИР создает на своих выводах напряжение шума, которое в \sqrt{m} раз меньше, чем напряжение шума у обычного резистора того же номинала.

Сравним значение отношения сигнал/шум (ОСШ) на выходе ФПУ с обычным и искусственным резисторами в цепи ОС для случая приема модулированных по интенсивности (мощности) оптических сигналов. Формулы расчета ОСШ в режиме ограничения тепловым шумом резистора нагрузки ФД соответственно имеют вид:

— для фотодиода с токовым откликом ρ_i (А/Вт), нагруженного резистором R_n [3] —

$$(\text{ОСШ})_{\text{фд}}^2 = \frac{I_c^2}{I_{ш}^2} = (P_o \rho_i / \sqrt{2})^2 R_n / 4kT\Delta f = I_c^2 R_n / 8kT\Delta f; \quad (2)$$

— для фотоприемного устройства с обычным резистором R_{oc} в цепи ОС —

$$(\text{ОСШ})_{\text{ор}}^2 = [R_{oc} / (R_n + R_{oc})] (\text{ОСШ})_{\text{фд}}^2; \quad (3)$$

— для фотоприемного устройства с искусственным резистором в цепи ОС —

$$\begin{aligned} (\text{ОСШ})_{\text{ир}}^2 &= [(R_1 + R_2) / (mR_1 + R_2)] / (\text{ОСШ})_{\text{ор}}^2 = \\ &= [(R_2) / (mR_1 + R_2)] / (\text{ОСШ})_{\text{фд}}^2. \end{aligned} \quad (4)$$

В формуле (2) $I_c = P_o \rho_i / \sqrt{2}$ — амплитудное значение переменной (сигнальной) составляющей фототока, вызванного промодулированной на 100% оптической мощностью P_o [5, с. 217], $I_{ш}^2 = 4kT\Delta f / R_n$ — тепловой шум резистора нагрузки, A^2 .

Из формулы (5) следует, что при использовании ИР в ФПУ ОСШ на его выходе может приближаться к значению, которое обеспечивает сам ФД, нагруженный резистором R_n (в фотодиодном режиме работы), т. е. $\text{ОСШ}_{\text{ир}} \rightarrow \text{ОСШ}_{\text{фд}}$ при $m \rightarrow 0$.

Проведены экспериментальные исследования амплитудно-частотных и спектральных шумовых характеристик следующих макетов: собственно ИР (рис. 1), фотоприемных устройств с искусственным (рис. 2) и обычным [3] резистором в цепи ОС. Длина волны оптической несущей 0,85 мкм. Использовался *pin*-фотодиод марки ФД271 на входе узкополосного (К544УД1А) и широкополосного (К544УД2А) операционного усилителя (ОУ1). Эквивалентное сопротивление ИР составляет 1 МОм.

Анализ экспериментальных результатов для ФПУ с ИР позволил сделать вывод, что ИР имеет те же недостатки [3], что и преобразователь "ток—напряжение" с резистором большого номинала в цепи ОС — узкая полоса пропускания и обогащение спектра шумов ВЧ-составляющими вследствие входной емкости ОУ1. Выигрыш от применения ИР в цепи ОС ощутим в относительно узкой полосе частот, которая для ФПУ с ИР определяется номиналом резистора R_1 .

Для оценки эффекта уменьшения уровня шума при использовании ИР ширина полосы пропускания ма-

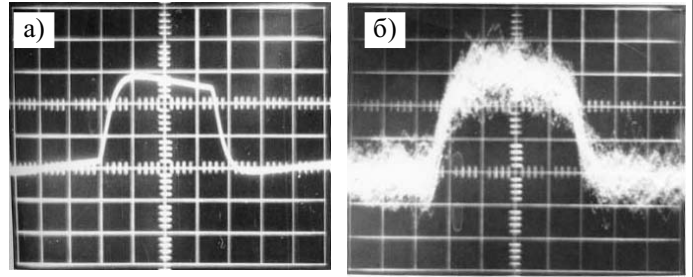


Рис. 3. Осциллограммы сигнала (а) и смеси сигнала и шума (б) на выходе ФПУ с обычным резистором в цепи ОС

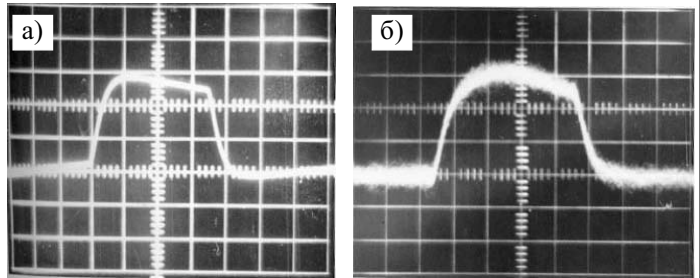


Рис. 4. Осциллограммы сигнала (а) и смеси сигнала и шума (б) на выходе ФПУ с искусственным резистором в цепи ОС

кетов ФПУ ограничивалась ФНЧ третьего порядка до 6 кГц. Осциллограммы смеси напряжений сигнала (меандр с частотой следования 2 кГц) и шума на выходе ФПУ приведены на **рис. 3** (в цепи ОС обычный резистор номиналом 1 МОм) и **рис. 4** (в цепи ОС искусственный резистор, имеющий $R_3 = 1$ МОм).

Осциллограммы напряжений на рис. 3, а и 4, а отвечают ситуации, когда оба устройства обрабатывают сигнал большой амплитуды, и подтверждают идентичность оптоэлектрических преобразовательных характеристик обоих макетов ФПУ.

Эпюры на рис. 3, б и 4, б соответствуют случаю обработки макетами ФПУ одного и того же оптического сигнала низкого уровня, сравнимого с шумами. Видно, что ФПУ с ИР обеспечивает большее значение ОСШ. При указанных условиях измерений увеличение значения ОСШ по напряжению составило 2,1 раза (6,5 дБ).

Результаты исследований подтвердили теоретические предпосылки [2, 3] и показали, что использование искусственного резистора в цепи обратной связи микроэлектронного фотоприемного устройства позволяет улучшить значение отношения сигнал/шум только в относительно узкой полосе пропускания — $\Delta f \leq 10$ кГц.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Percival W. S. An electrically "cold" resistance // Wireless Engineer.— 1939.— Vol. 16, May.— P. 237—240.
2. Forward R. L. Reducing noise in photoamplifier circuits with low noise artificial resistors // J. Appl. Phys.— 1982.— Vol. 52, N 5.— P. 3365—3371.
3. Корнейчук В. И., Рогалевич О. А., Заяц С. А. Исследование микроэлектронных фотоприемных устройств среднескоростных ВОСП // Наукові праці ОНАЗ.— 2002.— № 1.— С. 56—62.
4. Корнейчук В. И., Панфилов И. П. Волоконно-оптические системы передачи.— Одесса: Друк, 2001.
5. Корнейчук В. И., Макаров Т. В., Панфилов И. П. Оптические системы передачи.— К.: Техніка, 1994.