

УДК 621.383.4, 621.382.2/.3

## **ВЛИЯНИЕ КИНЕТИКИ РЕКОМБИНАЦИИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА НА КОЭФФИЦИЕНТ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ АМПЛИТУДНОГО МОДУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ ФОТОРЕЗИСТОРНОГО ОПТРОНА**

**Б. Н. Денисов, Я. А. Зазулин, А. Н. Шелкунов, Д. В. Пьянзин**

**Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва, 430005, Саранск, ул. Большевикская, 68**

Статья поступила в редакцию 20 августа 2018 г.

**Аннотация.** В статье рассмотрены смесители электрических сигналов, реализующие перемножение на основе фоторезисторного оптрона. Приводятся результаты исследования нелинейных искажения в устройствах, описанных выше, связанные с нелинейной кинетикой фоторезистора. Для повышения точности измерений предложена запись в безразмерных величинах дифференциального уравнения кинетики рекомбинации носителей тока, позволяющая упростить использование результатов экспериментальных исследований. В качестве безразмерной концентрации выбрано отношение концентрации свободных носителей в отсутствии возбуждения светом к концентрации свободных носителей при возбуждении. Высокая точность экспериментального измерения этой величины позволила повысить точность рассчитанных и измеренных величин. В материалах статьи приведены результаты расчетов экспериментальных исследований кинетики рекомбинации свободных носителей заряда и нелинейных искажений фоторезистора, изготовленного на основе высокоомного кремния. Получены соотношения для инженерных расчетов коэффициента нелинейных искажений фоторезисторов с квадратичной рекомбинацией. Предложен способ исключения нелинейных искажений модулирующего сигнала в амплитудном модуляторе на основе фоторезисторного оптрона. Показана возможность создания балансного модулятора на основе фоторезисторного оптрона, в котором отсутствуют нелинейные искажения сигнала несущего информацию. Приведены

экспериментальные данные расчетов и осциллограмм сигналов с амплитудной и балансной модуляцией.

**Ключевые слова:** амплитудный модулятор, фотопроводимость, фоторезисторный оптрон, кинетика фотопроводимости, коэффициент нелинейных искажений, балансный модулятор.

**Abstract.** The article describes the mixers of electrical signals that realize multiplication based on the photoresistor optocoupler. The results of the study of nonlinear distortion in the devices described above, related to the nonlinear kinetics of the photoresistor, are presented. To increase the accuracy of the measurements, a notation was proposed in the dimensionless quantities of the differential equation of the kinetics of carrier recombination, which makes it possible to simplify the use of the results of experimental studies. The ratio of the concentration of free carriers in the absence of excitation by light to the concentration of free carriers upon excitation is chosen as the dimensionless concentration. The high accuracy of the experimental measurement of this value made it possible to improve the accuracy of the calculated and measured values. The paper presents the results of calculations of experimental studies of the kinetics of recombination of free charge carriers and nonlinear distortions of a photoresistor made on the basis of high-resistance silicon. Relations are obtained for engineering calculations of the coefficient of nonlinear distortions of photoresistors with quadratic recombination. A method for eliminating nonlinear distortions of a modulating signal in an amplitude modulator based on a photoresistor optocoupler is proposed. The possibility of creating a balanced modulator based on a photoresistor optocoupler is shown, in which there are no nonlinear distortions of the signal carrying the information. Experimental data of calculations and oscillograms of signals with amplitude and balanced modulation are presented.

**Keywords:** amplitude modulator, photoconduction, photoresistant optron, kinetics of photoconduction, coefficient of nonlinear distortions, balanced modulator.

## 1. Введение

В [1,2] нами рассмотрен амплитудный модулятор на основе фоторезисторного оптрона. Достоинством такого модулятора является

идеальная гальваническая развязка несущего и модулирующего сигналов, простота изготовления и настройки. Недостатком такого модулятора является высокий коэффициент нелинейных искажений при глубине модуляции свыше 10%.

## 2. Постановка задачи

Рассмотрим принцип работы такого модулятора [1]. Пусть на фоторезистор падает свет, интенсивность которого изменяется по закону передаваемого сообщения  $S(t)$ . Подадим на фоторезистор напряжение несущего сигнала. В случае однородного возбуждения, омических контактов ток через фоторезистор равен:

$$I = \{\sigma'_0 + \sigma'[S(t)]\} \cdot U_m \cos \omega t = I_{0m} \cos \omega t + I(S(t)) \cdot \cos \omega t, \quad (1)$$

где  $I_{0m} = \sigma'_0 \cdot U_m$ ,  $I[S(t)] = \sigma'[S(t)] \cdot U_m$ ,  $\sigma'_0 = \sigma_0 \cdot C/d$ ,  $\sigma_0$  – равновесная проводимость,  $C$  – площадь контактов,  $d$  – между контактами,  $U_m$  – амплитуда напряжения несущего колебания,  $\sigma[S(t)]$  – фотопроводимость,  $\sigma'[S(t)] = \sigma[S(t)] \cdot C/d$ . Выражение (1) является классическим амплитудно-модулированным сигналом. В простейшем случае однотоновой модуляции интенсивности света по закону  $\Phi = \Phi_0(1 + \cos \Omega t)$  выражение (1) имеет вид:

$$I = I_{0m} \cos \omega t + \frac{\Delta I}{2} \cos(\omega - \Omega)t + \frac{\Delta I}{2} \cos(\omega + \Omega)t, \quad (2)$$

где  $I_{0m} = (en_0\mu_n + \chi ea\varepsilon\Phi_0\tau_n\mu_n)U_m C/l$ ,  $I_0 = (en_0\mu_n)U_m C/l$  – темновой ток  $\Delta I = \chi ea\varepsilon\Phi_0\tau_n\mu_n U_m C/l$  – амплитуда фототока,  $e, \mu_n, a, \gamma, \tau_n$  – соответственно заряд электрона, подвижность, коэффициент поглощения, квантовый выход и время жизни свободных носителей,  $n_0$  – равновесная концентрация электронов,  $C$  – площадь контактов,  $d$  – расстояние между контактами фоторезистора,  $\chi = 1 - R$  ( $R$  – коэффициент отражения). Глубина модуляции в данном случае равна:

$$M = \frac{\Delta I}{I_{0m}} = \frac{\chi ea\varepsilon\Phi_0\tau_n\mu_n}{(en_0\mu_n + \chi ea\varepsilon\Phi_0\tau_n\mu_n)} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0 + \Delta\sigma} = \frac{\Delta I}{I_0 + \Delta I}. \quad (3)$$

Соотношения 1 и 2 получены при условии линейной рекомбинации свободных носителей в собственном полупроводнике. Из выражения (3) следует, что при таком способе модуляции в принципе невозможно получить балансную модуляцию, т.к.  $\Delta I \leq I_0 + \Delta I$  и исключить нелинейные искажения в амплитудном модуляторе связанные с нелинейной кинетикой. Для корректного применения амплитудного модулятора на основе фоторезисторного оптрона необходимы исследования нелинейных искажений фоторезистора. Реальный фоторезистор является нелинейным элементом, даже в случае омических контактов и однородной генерации носителей светом в объеме. Впервые вопросы, связанные с нелинейной кинетикой фотопроводимости рассмотрены В.А. Малышевым с соавторами в работе [3]. Авторы [3] получили выражения для первой и второй гармоники сигнала на выходе фоторезистора при освещении его оптическим сигналом, интенсивность которого изменяется по гармоническому закону. При расчетах авторы полагали, что кинетика рекомбинации носителей подчиняется квадратичному закону. С целью получения аналитического выражения, дифференциальное уравнение кинетики они решали в малосигнальном приближении. Но при этих условиях в собственном полупроводнике реализуется закон линейной рекомбинации [4]. При малом изменении неравновесной концентрации свободных носителей, использование квадратичной кинетики является не корректным. В работе авторов [5] теоретически рассмотрены нелинейные искажения фоторезистора на основе кремния лигированного золотом. Теоретически и экспериментально классический случай нелинейных искажений при квадратичной рекомбинации до настоящего времени не рассматривался.

Целью работы является:

– теоретические и экспериментальные исследование нелинейных искажений вносимых фоторезистором с квадратичным законом рекомбинации в регистрируемый модулированный оптический сигнал,

- разработка инженерных методов вычисления нелинейных искажений фоторезистора, связанных с квадратичной рекомбинацией свободных носителей,
- исключение нелинейных искажений в амплитудном модуляторе на основе фоторезисторного оптрона,
- получение балансно-модулированных колебаний с помощью фоторезисторного оптрона и расчет нелинейных искажений несущего колебания.

### 3. Исследование нелинейных искажений фоторезистора с квадратичной рекомбинацией свободных носителей

В отсутствии инжекции основные нелинейные искажения могут быть связаны с кинетикой свободных носителей. Рассмотрим кинетику изменения концентрации свободных носителей в собственном полупроводнике в отсутствие контактной инжекции, при однородной генерации носителей и высоком уровне возбуждения светом, интенсивность которого изменяется по гармоническому закону. При отсутствии тока и при однородной генерации носителей уравнение непрерывности имеет вид [6]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = A + G_0 - \gamma n p, \quad (4)$$

где  $n = n_0 + \Delta n$ ,  $p = p_0 + \Delta p$ ,  $A$  – скорость генерации носителей с помощью внешнего воздействия,  $G_0$  – скорость тепловой генерации. Выражения (4) верны для времен  $t > \tau_2$ , где  $\tau_2$  – время релаксации горячих неравновесных носителей. В случае периодического возбуждения, соотношение (4) верно для частот  $\omega$  меньших величин  $2\pi/\tau_2$ , т.е. при записи указанных выше выражений полагают, что неравновесные носители распределены по энергиям так же как равновесные через время равное  $\tau_2$  [6]. При этом будем полагать, что коэффициент междузонной рекомбинации равновесных носителей и неравновесных равны. В состоянии теплового равновесия скорость тепловой генерации равна скорости рекомбинации равновесных носителей ( $G_0 = \gamma n_0^2$ ). Подставляя в выражение (4) значение  $n$  и  $p$  получим, полагая  $n=p$ ,  $\Delta n = \Delta p$ :

$$\frac{d\Delta n}{dt} = A - \alpha_0 \Delta n + \gamma \Delta n^2, \quad (5)$$

где выражение  $\alpha_0 = 2\gamma n_0$  называется скоростью рекомбинации равновесных свободных носителей, величину равную  $\tau_n = 1/\alpha_0$  – принято называть временем жизни равновесных свободных носителей, а  $\gamma \Delta n$  – скоростью рекомбинации при высоком уровне инжекции. Выражение (5) удобней записать в относительных единицах. Разделим соотношение (5) на  $2\gamma n_0^2$ .

$$\frac{d\Delta n'}{dt'} = A' - \Delta n' - \Delta n'^2 / 2, \quad (6)$$

где  $\Delta n/n_0 = \Delta n'$  – относительная концентрация, показывающая во сколько раз неравновесная концентрация превосходит равновесную,  $dt' = dt/\tau_n$ .  $A' = A/2\gamma n_0^2$  – относительная скорость генерации свободных носителей, показывающая, во сколько скорость генерации носителей внешним воздействием превосходит скорость генерации (рекомбинации) равновесных носителей. Скорость генерации неравновесных носителей при гармоническом оптическом возбуждении запишется как:

$$g = A(1 - \cos \omega t), \quad (7)$$

где  $A = \chi\alpha\beta\Phi_0/2$ ,  $\alpha$  – коэффициент поглощения света,  $\beta$  – квантовый выход,  $\Phi_0$  – интенсивность света в квант/сек·м<sup>2</sup>,  $\chi = 1 - R$ ,  $R$  – коэффициент отражения. Дифференциальное уравнение изменения концентрации неравновесных носителей в этом случае будет иметь вид:

$$\frac{d\Delta n}{dt} = A(1 - \cos \omega t) - b\Delta n - \gamma \Delta n^2, \quad (8)$$

где  $b = 2\gamma n_0$ ,  $1/b = \tau_n$  – время жизни свободных носителей при низком уровне  $R$  освещения,  $\Delta n \ll n_0$ . Рассмотрим высокий уровень инжекции  $\Delta n \gg n_0$ . В этом случае уравнение (8) запишется в виде

$$\frac{d\Delta n}{dt} = A(1 - \cos \omega t) - \gamma \Delta n^2. \quad (9)$$

Дифференциальное уравнение вида (9) не имеет решения в элементарных функциях. Решение (9) в аналитическом виде может быть найдено в квазистационарном приближении  $\omega \ll 2\pi\sqrt{\gamma A}$ . Величина  $1/\sqrt{\gamma A}$  имеет размерность времени и численно равна времени жизни неравновесных носителей при  $\Delta n = \Delta n_{cm} = \sqrt{A/\gamma}$ . В квазистационарном случае, полагая  $\frac{d\Delta n}{dt} \approx 0$ , решение (9) можно записать в виде:

$$\Delta n = \sqrt{\frac{A}{\gamma}}(1 - \cos \omega t) = \sqrt{\frac{2A}{\gamma}} \left| \sin \frac{\omega t}{2} \right|. \quad (10)$$

Проведем оценку коэффициента нелинейных искажений (КНИ) вносимых фоторезистором при квадратичной рекомбинации. Разложим выражение (10) в ряд Фурье:

$$\Delta n = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{2A}{\gamma}} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{1 \cdot 3} \cos \omega t - \frac{1}{3 \cdot 5} \cos 2\omega t + \frac{1}{5 \cdot 7} \cos 3\omega t - \dots \right). \quad (11)$$

Амплитуды гармоник ряда  $C_k$  согласно (11) можно записать в виде:

$$C_k = \frac{4}{\pi(2k+1)(2k-1)} \sqrt{\frac{2A}{\gamma}}, \quad (12)$$

где  $k$  – номер гармоники ( $k = 1, 2, 3, 4, \dots$ ). Выражение (12) позволяет рассчитать КНИ с помощью соотношения:

$$S = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} C_k^2}}{C_1}. \quad (13)$$

Подставляя (12) в (13) и учитывая, что  $C_1 = \frac{4}{3\pi} \sqrt{\frac{2A}{\gamma}}$  получим значение для

КНИ в случае низких частот.

$$S = 3 \sum_{k=2}^{\infty} \frac{1}{(4k^2 - 1)^2} \quad (14)$$

Сумма ряда (14) согласно [7] равна 0,2277181... Это предельное значение КНИ

фоторезистора с квадратичной кинетикой рекомбинации свободных носителей, работающего при указанных выше условиях. Рассмотрим промежуточные случаи. Как было показано выше дифференциальное уравнение (8) можно записать в нормированном виде в единицах  $b = 2\gamma n_0^2$ .

$$\frac{d\Delta n'}{dt'} = A'(1 - \cos \omega' t') - \Delta n' - \Delta n'^2 / 2, \quad (15)$$

где  $\Delta n/n_0 = \Delta n'$  - относительная концентрация, показывающая во сколько раз неравновесная концентрация превосходит равновесную,  $dt' = dt/\tau_n$ ,  $A' = A/2\gamma n_0^2$ ,  $\omega' = 2\pi\tau_n/T$ . В уравнении (15) постоянная времени при низком уровне возбуждения равна единице. Следовательно, относительная граничная круговая частота при низком уровне инжекции будет равна. Из уравнения (15) используя методы численного интегрирования можно определить для различных частот, уровня возбуждения, глубину модуляции и коэффициент нелинейных искажений. Полученные данные легко сравнивать с экспериментальными данными, т. к. величину  $A' = A/2\gamma n_0^2$  можно определить из опыта. Для случая постоянного возбуждения определим отношение стационарной неравновесной концентрации свободных носителей к равновесной. Так как ток пропорционален концентрации свободных носителей, следовательно:

$$y = \Delta n_c/n_0 = (I_c - I_t)/I_t, \quad (16)$$

где  $I_t$  – темновой ток,  $I_c$  – ток при стационарном освещении интенсивностью  $\Phi_0$  измеряемые экспериментально. Относительную интенсивность возбуждения определим из соотношения (6). В установившемся режиме ( $d\Delta n'/dt' = 0$ ) из (6) имеем:

$$A' = (\Delta n')^2/2 + \Delta n' = y^2/2 + y. \quad (17)$$

Для исследований использовался изготовленный нами фоторезистор на основе особоочистого высокоомного кремния ( $4 \times 2 \times 1 \text{ мм}$ ) с контактами из графена. Измеренная граничная частота фоторезистора составляла  $f=120$  КГц. Вольтамперная характеристика фоторезистора была линейной вплоть до 100В.



В качестве измерителя нелинейных искажений (КНИ) использовался прибор С6-11. Уровень возбуждения измерялся и рассчитывался с помощью соотношения (16). Соответствующая относительная интенсивность возбуждения определялась с помощью выражения (17) Все расчеты были проведены при низкой относительной частоте  $\omega' = 0.01$ , которая значительно меньше граничной частоты равной  $2\pi$ . В абсолютных единицах эта частота для нашего случая составляла 12КГц ( $f_{cp} = 120КГц$ ).

В таблице 1 приведены рассчитанные значение глубины модуляции  $M$ , коэффициента нелинейных искажений (КНЕ) в зависимости от величины  $y = \Delta n_c / n_0$ , которую в дальнейшем будем называть уровнем возбуждения.

Таблица 1

$y = \Delta n_c / n_0$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	3	4	5	6
$M$	0.09	0.166	0.23	0.286	0.333	0.5	0.6	0.667	0.71	0.75
$s\%$	2.27	4.16	5.76	7.13	8.32	12.46	14.9	16.5	17.63	18.46

На рис.1 и рис.2 приведены теоретические и экспериментальные зависимости коэффициента нелинейных искажений (КНИ) в зависимости от уровня возбуждения и глубины модуляции.

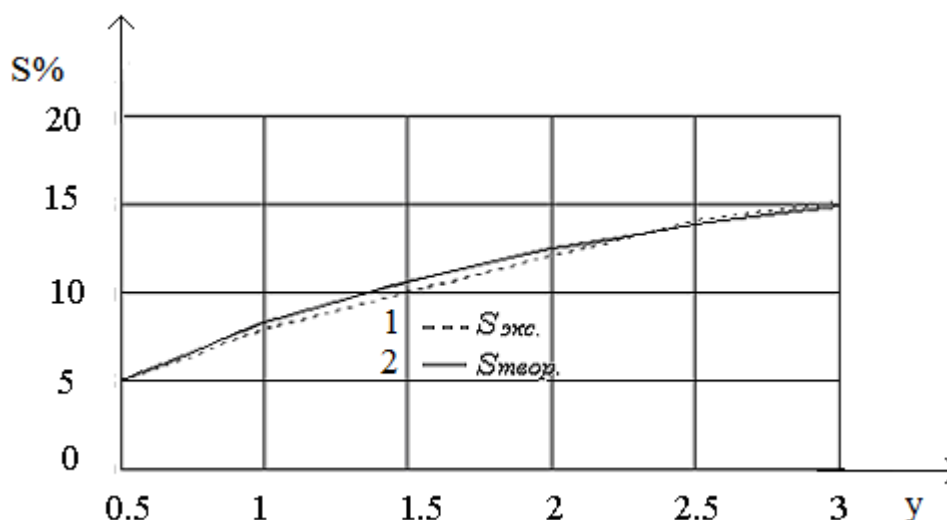


Рис.1 Зависимость коэффициента нелинейных искажений от уровня возбуждения. 1—экспериментальная, 2—рассчетная.

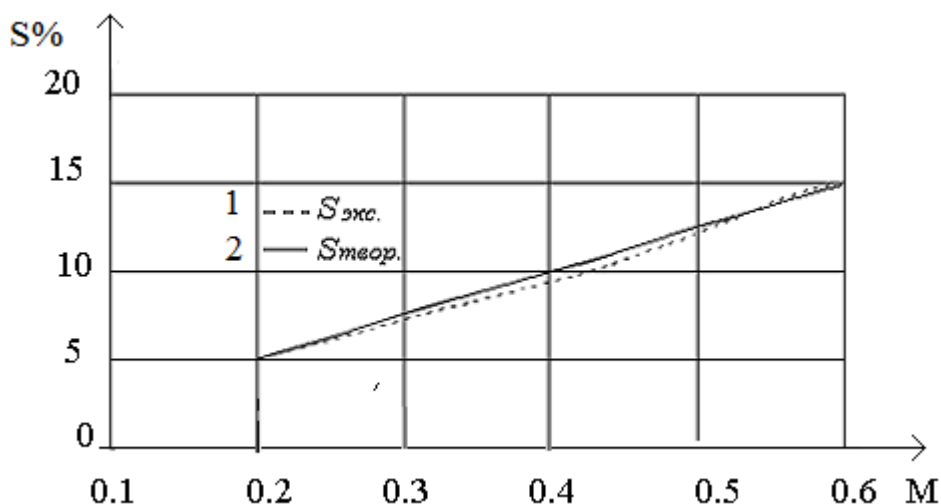


Рис.2 Зависимость коэффициента нелинейных искажений от глубины модуляции. 1—экспериментальная, 2—расчетная.

При расчетах была обнаружена закономерность, которая связывает коэффициент нелинейных искажений  $S$  с глубиной модуляции  $M$ .

$$S \approx 25M \quad (18)$$

Вплоть до высокого уровня возбуждения ( $y = 6$ ) КНИ линейно зависит от глубины модуляции. Из таблицы и графиков видна значительная зависимость нелинейных искажений вносимых фоторезистором от уровня возбуждения. Приемлемый КНИ, менее одного процента, может быть получен при глубине модуляции менее 0.05. Следовательно, амплитудный модулятор, изготовленный на основе фоторезистора, будет обладать низким коэффициентом нелинейных искажений  $s < 1.2\%$  при глубине модуляции меньше 5%. При более высокой глубине модуляции коэффициент нелинейных искажений быстро растет. Полностью исключить нелинейные искажения из спектра модулирующего сигнала несущего информацию невозможно, т.к. вторые и третьи гармоники низкочастотных гармоник (20Гц–10КГц) оказываются в спектре передаваемого сообщения. Получить балансно-модулированные колебания с помощью данного амплитудного модулятора невозможно. Необходимы другие решения связанные с схемными решениями.

#### 4. Балансный модулятор и нелинейные искажения в нем сигналов несущих информацию

Исключить нелинейные искажения в амплитудном модуляторе на основе фоторезисторного оптрона можно за счет изменения схемы подачи сигналов на фоторезисторный оптрон. Пусть в качестве несущего сигнала выступает оптический сигнал, модулированный по интенсивности с частотой несущего сигнала –  $\omega$ , падающий на фоторезистор:

$$\Phi = \Phi_0(1 + \cos \omega t). \quad (19)$$

Модулирующим сигналом является сигнал сообщения, преобразованный в напряжение, приложенное к фоторезистору. Для простоты рассмотрения будем полагать его однотональным:

$$U = U_0 + U_m \cos \Omega t. \quad (20)$$

Ток на выходе фоторезистора будет равен:

$$I = I_0 + \Delta I_0 + \Delta I_0 \cos \omega t + I_{m0} \cos \Omega t + \Delta I_m \cos \Omega t + \Delta I_m \cos \omega t \cos \Omega t, \quad (21)$$

где  $I_0 = \sigma_0 U_0$  – темновой ток при постоянном напряжении  $U_0$ ;  $\sigma_0 = en_0 \mu_n S / \ell$  – темновая проводимость фоторезистора;  $\Delta I_0 = \Delta \sigma U_0$  – фототок при напряжении  $U_0$ ;  $\Delta \sigma = \chi e a \beta \Phi_0 \tau_n \mu_n S / \ell$  – фотопроводимость при освещении интенсивностью  $\Phi_0$ ;  $\Delta I_m = \Delta \sigma U_m$  – фототок при напряжении  $U_m$ ;  $I_{m0} = \sigma_0 U_m$  – темновой ток при амплитуде переменного напряжения равного  $U_m$ .

Выражение (15) содержит амплитудно-модулированный сигнал имеющий вид:

$$I_{AM} = \Delta I_0 \cos \omega t + \frac{\Delta I_m}{2} \cos(\omega - \Omega)t + \frac{\Delta I_m}{2} \cos(\omega + \Omega)t. \quad (22)$$

В данном случае глубина модуляции равна

$$M = \frac{\Delta I_m}{\Delta I_0} = \frac{U_m}{U_0}, \quad (23)$$

$U_m$  – амплитуда модулирующего сигнала;  $U_0$  – постоянная составляющая напряжения модулирующего сигнала. Так как  $U_m$  может быть больше  $U_0$ , следовательно, возможно получение перемодулированного колебания, и балансно-модулированного колебания, если  $U_0 = 0$ . Нелинейные искажения

сигнала несущего информацию в данном случае будут связаны только с устройством, преобразующим сообщения в электрический сигнал (микрофон, видеокон). В балансном модуляторе на основе фоторезисторного оптрона линейные неискажения возникают только в несущем сигнале. Эти искажения связаны с нелинейной кинетикой фотопроводимости. Более высокие гармоники несущего сигнала могут быть легко отфильтрованы фильтром, настроенным на частоту несущего колебания. Использование гармоник в спектре несущего сигнала за счет нелинейной кинетики, позволяет поднять несущую частоту на порядок. Возможность получения балансно–модулированного колебания была проверена с помощью фоторезистора на основе чистого кремния. Частота несущего колебания ( $\omega$ ) равна 10кГц, частота модулирующего колебания  $\Omega = 500$ Гц. Отношение несущей частоты к модулирующей частоте равно 20. На рис. 3 приведена осциллограмма фототока на выходе фоторезистора. Для получения балансно–модулированного колебания, необходимо удалить из спектра, полученного колебания, гармоники модулирующего сигнала. На рис. 4 приведена осциллограмма тока на выходе фильтра. Моделирование фильтра осуществлялось путем введения множителя равному коэффициенту передачи фильтра на частоте  $\Omega$ . На рис. 5 и рис. 6 приведены рассчитанные с помощью соотношения (15) осциллограммы колебания. Из рисунков видно хорошее совпадение рассчитанных и измеренных кривых.

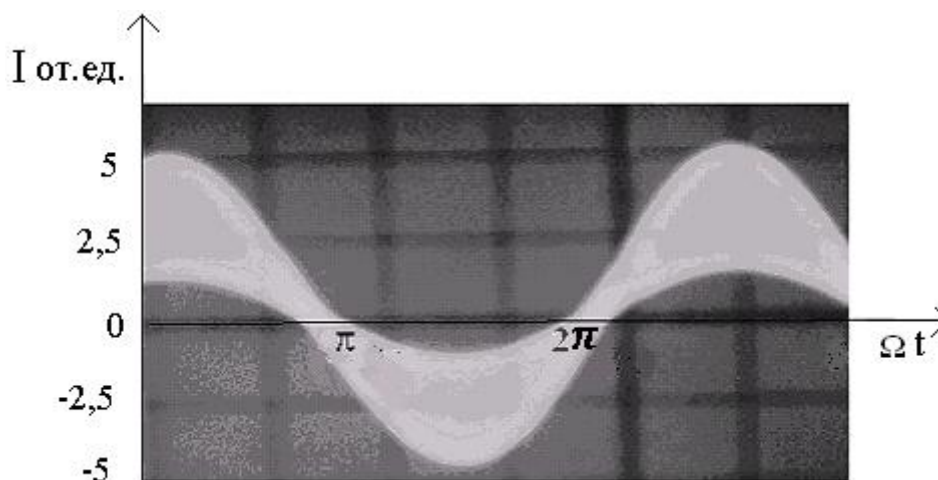


Рис. 3 Осциллограмма модулированного колебания на выходе фоторезистора.  
 $\omega/\Omega = 20$ ,  $\omega = 10$ кГц,  $\Omega = 500$  Гц

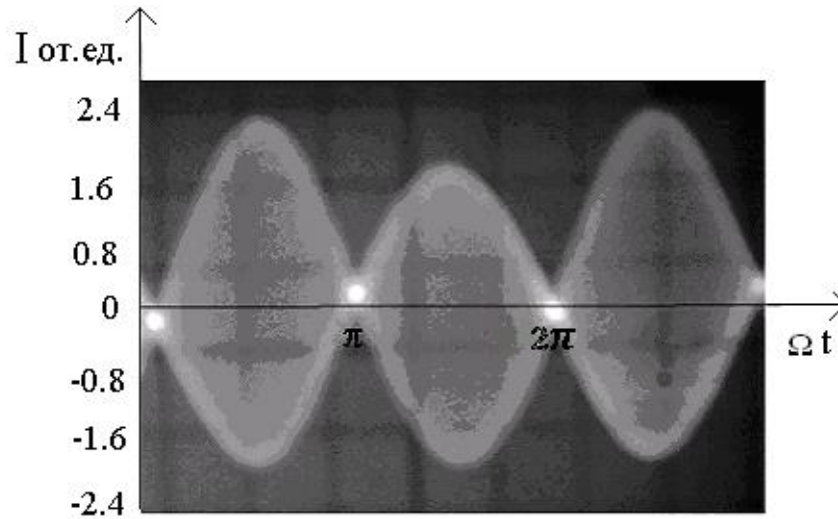


Рис. 4 Осциллограмма балансно-модулированного колебания на выходе фильтра. Коэффициент передачи фильтра на частоте модуляции  $\Omega$  равен 0,1.  $\omega$  – частота несущего сигнала.  $\omega/\Omega = 20$ ,  $\omega = 10$  кГц,  $\Omega = 500$  Гц.

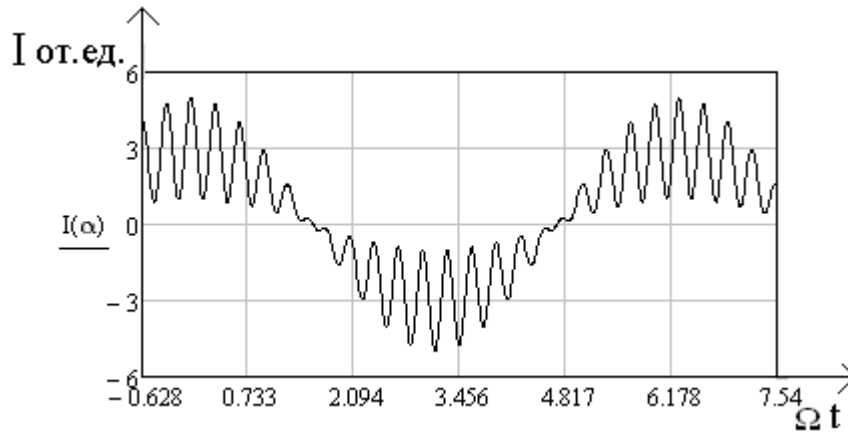


Рис. 5 Осциллограмма модулированного колебания на выходе фоторезистора при  $\omega/\Omega = 20$ , рассчитанная с помощью соотношения 15 без учета постоянной составляющей тока.  $\Delta\sigma/\sigma_0 = 2$

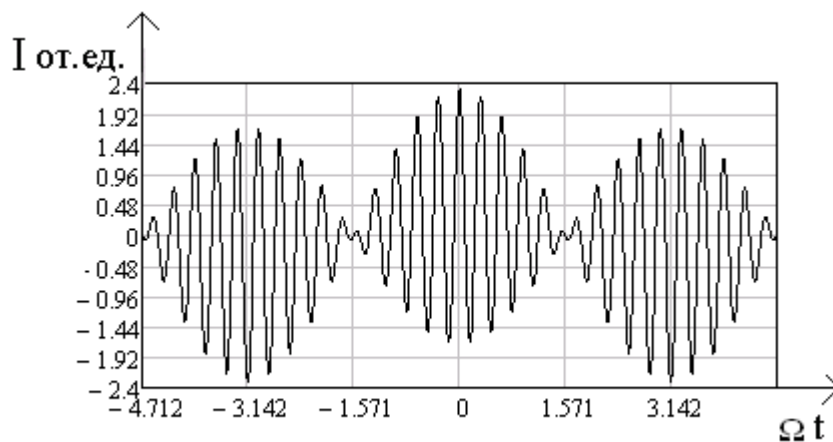


Рис. 6 Осциллограмма балансно-модулированного колебания на выходе фильтра рассчитанная с помощью выражения (15). Коэффициент передачи фильтра на частоте модуляции ( $\Omega = 500$  Гц) равен 0,1.  $\omega$  – частота несущего сигнала.  $\omega/\Omega = 20$

Рассмотрим достоинства и недостатки предложенных двух способов получения АМ сигналов с помощью фоторезистора.

Достоинствами обоих способов является идеальная гальваническая развязка несущего и модулирующего колебания, что резко упрощает конструкцию модулятора. Модулятор может состоять из двух элементов: фоторезистора и светодиода. Второй способ характеризуется крайне низким коэффициентом нелинейных искажений и возможностью получения балансно-модулированных колебаний. При наличии омических контактов у фоторезистора получение АМ колебаний не сопровождается нелинейными искажениями модулирующего сигнала. Все нелинейные искажения будут связаны только с устройством, преобразующим сообщение в электрический сигнал (микрофон, видеокон). Предложенная схема позволяет осуществлять переход из оптических каналов связи в радиоволновые без дополнительных электронных устройств.

Недостатками предложенных методов является: в первом случае нелинейные искажения при глубине модуляции свыше 10%. Эти искажения связаны с нелинейной кинетикой фотопроводимости и избавиться от них можно только за счет резкого снижения глубины модуляции. Другим недостатком первого способа является необходимость двойного преобразования сигнала сообщения. В начале сигнал сообщения преобразуется в электрический, а затем в оптический, что также вносит дополнительные искажения. С помощью первого способа невозможно получить балансно-модулированное колебание. Недостатком второго способа является невозможность получить несущее колебание частотой свыше  $f = 1/\tau$  Гц.

## 5. Заключение

Получены инженерные соотношения для расчета нелинейных искажений фоторезистора с квадратичной кинетикой рекомбинации свободных носителей. Проведены экспериментальные исследования нелинейных искажений фоторезистора на основе высокоомного кремния. Показано, что приемлемый КНИ, менее одного процента, может быть получен при глубине модуляции

менее 0.05. Предложен способ исключений нелинейных искажений модулирующего сигнала в амплитудном модуляторе на основе фоторезисторного оптрона при любой глубине модуляции. Предложено и исследовано устройство амплитудного модулятора на основе фоторезисторного оптрона без нелинейных искажений модулирующего сигнала и возможностью получения балансно-модулированных сигналов. Предложено математическая модель устройства, Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и рассчитанных данных.

### Литература

1. Денисов Б.Н. Фоторезистор как многофункциональный элемент оптоэлектроники. // Радиотехника и электроника, 2007, т.52, №4, с.509–512
2. Денисов Б.Н., Беглов В.И., Нищев К.Н., Турышев В.Н. Передатчик с амплитудной модуляцией. Патент на полезную модель № 39240, Россия, МПК-7 Н 03 С 5/02. Подан 39.03.2004 г. Опубл. 20.07.2004 г., бюл. № 20
3. Малышев В.А., Сапелкин С.В., Червяков Г.Г., Юхимец Е.А. Нелинейные преобразование сигнала модуляции света при квадратичной рекомбинации в фотоприёмнике. // Физика и техника полупроводников.- 1993- Т. 27, вып. 1.– С.179-182.
4. Шевцов Э.А., Белкин М.Е. Фотоприемные устройства волоконно-оптических систем передач М.: Радио и связь, 1992.–224 с.
5. Никишин Е.В., Базеев С.В., Пиксайкин В.О. Восстановление временной зависимости интенсивности света, частота модуляции которой больше граничной частоты фотоприемника на основе кремния с глубокими рекомбинационными центрами. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №2. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb18/3/text.pdf>.
6. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления. М: Мир, 1980.–208 С.

7. Прудников А.П., Брычков О.А., Маричев О.И. Справочник по высшей математике. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1981, 800 С.

**Для цитирования:**

Б. Н. Денисов, Я. А. Зазулин, А. Н. Шелкунов, Д. В. Пьянзин. Влияние кинетики рекомбинации носителей тока на коэффициент нелинейных искажений амплитудного модулятора на основе фоторезисторного оптрона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/15/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.15