

УДК 681.586.776:621.382

В. С. Осадчук, д. т. н., проф.; А. В. Осадчук, д. т. н., проф.; Е. Н. Ильченко
МИКРОЭЛЕКТРОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ
ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

Показана возможность преобразования оптической мощности на основе автогенераторного устройства, которое состоит из транзисторных структур с отрицательным сопротивлением, и в котором фоточувствительным элементом является фотодиод. Получены аналитические зависимости вольт-амперной характеристики и функции преобразования, которые могут быть использованы для инженерного расчета параметров преобразователей оптической мощности.

Ключевые слова: фотодиод, оптическое излучение, уровень жидкости, полное сопротивление, транзисторные структуры с отрицательным сопротивлением, математическая модель.

Введение

Почти 70 % всех измерений, которые проводятся в науке, промышленности и в сельском хозяйстве, связаны с измерением давления, расхода, количества и уровня веществ. Измерение уровня жидкости является актуальным вопросом контроля состояния среды. Выбор прибора измерения уровня жидкости зависит, прежде всего, от ее свойств, условий хранения и от параметров окружающей среды [1].

На сегодняшний день разработаны разные схемы для определения уровня жидкости. Сенсоры неоптического типа, такие как традиционные монтажные системы, также широко используются, но они относительно дорогие, обычно сложные в сборке и имеют другие недостатки. Оптические сенсоры имеют преимущества перед неоптическими. Так, оптические сенсоры не требуют электрического контакта с исследуемой жидкостью. Таким образом, оптические сенсоры могут быть изготовлены с относительно простой конструкцией [2]. Современное состояние развития информационно-измерительной техники характеризуется большим разнообразием методов преобразования значения мощности оптического излучения в электрический сигнал. Предоставление информативного параметра в аналоговой форме приводит к необходимости использования аналого-цифровых преобразователей, стоимость которых при высоких требованиях к точности приравнивается к стоимости микро-ЭВМ. В системах измерения уровня жидкости высокой точности можно достичь, используя оптические сенсоры на основе транзисторных структур с отрицательным сопротивлением с выходным частотным сигналом [3]. Такие преобразователи характеризуются высокой помехоустойчивостью, простотой и значительной точностью преобразования в цифровой код, а также удобством коммутаций в многоканальных измерительных системах [4, 5].

Итак, для использования этих преимуществ возникает необходимость в разработке частотных преобразователей оптического излучения.

Постановка задачи исследований

Для определения свойств частотного оптического преобразователя необходимо разработать математическую модель, на основе которой можно получить зависимость активной и реактивной составляющей полного сопротивления структуры от мощности оптического излучения и вывести функцию преобразования оптического преобразователя, который используется в системе измерения уровня жидкости. Эти вопросы рассматриваются в статье.

Математическая модель

Схема частотного преобразователя на основе биполярного и полевого транзисторов показана на рис. 1. Фоточувствительным элементом схемы является фотодиод.

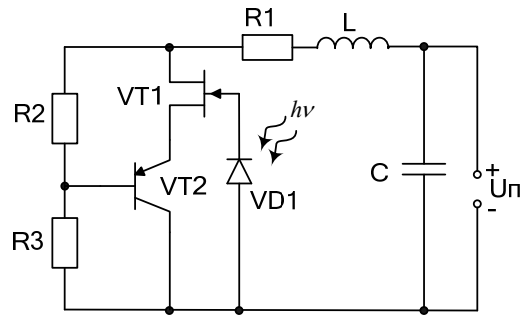


Рис. 1. Схема микроэлектронного оптического преобразователя с фотодиодом

Полевой и биполярный транзисторы VT1 и VT2 реализуют генератор электрических колебаний, в котором колебательный контур образован емкостной составляющей полного сопротивления на электродах сток-коллектор полевого и биполярного транзисторов и пассивной индуктивностью L.

Определение вольт-амперной характеристики (ВАХ) фотопреобразователя является существенным вопросом, поскольку на этой характеристике выбирается рабочая точка, что обуславливает самовозбуждение и стойкость работы генератора электрических колебаний преобразователя. Для определения ВАХ преобразователя рассматривается эквивалентная схема по постоянному току (рис. 2).

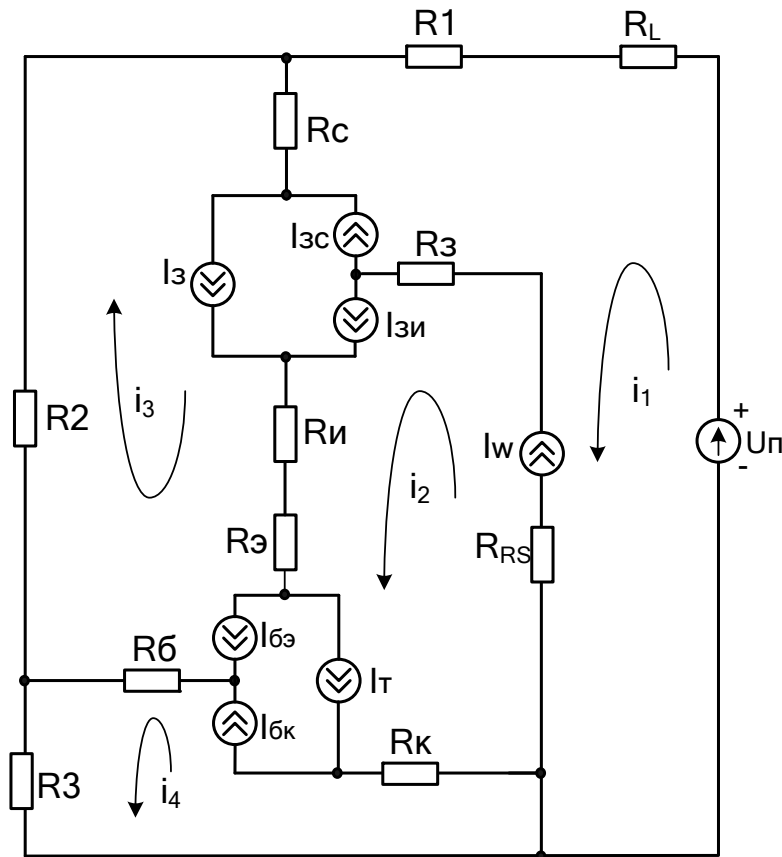


Рис. 2 Эквивалентная схема преобразователя по постоянному току

Определение аналитической зависимости ВАХ предоставит возможность убедиться в существовании отрицательного сопротивления, что соответствует падающему участку ВАХ.

Элементы эквивалентной схемы описываются такими величинами: R_6 – сопротивление

базы; R_k – сопротивление коллекторного перехода; R_3 – сопротивление эмиттерного перехода; R_3 – омическое сопротивление затвора; R_c – сопротивление p-n перехода стока; $R_{и}$ – сопротивление p-n перехода истока; R_{RS} – базовое сопротивление диода; R_2, R_3 – сопротивления делителя; R_L – сопротивление индуктивности колебательного контура; $I_{бк}$ – ток база-коллектор; $I_{бэ}$ – ток база-эмиттер; $I_{зс}$ – ток затвор-сток; $I_{зи}$ – ток затвор-исток.

Уравнения Кирхгофа, соответственно с направлениями выбранных контурных токов, имеют вид:

$$\begin{cases} U_{п} = (R_1 + R_L + R_c + R_{RS})(i_1 - I_w - I_{зс} - I_3 + I_{зи}) + R_c(i_3 + I_{зс} + I_3 - I_{зи} + I_{бэ} - I_T - I_{бк}) + \\ + (R_3 + R_{RS})(-i_2 - I_w - I_{зс} + I_3 - I_{зи} + I_{бэ} - I_T - I_{бк}) \\ 0 = (R_3 + R_{и} + R_3 + R_k + R_{RS})(i_2 + I_w - I_{зс} - I_3 + I_{зи} - I_{бэ} + I_T + I_{бк}) + \\ + (R_3 + R_{RS})(-i_1 + I_w + I_{зс} + I_3 - I_{зи}) + (R_{и} + R_3)(i_3 + I_{зс} + I_3 - I_{зи} + I_{бэ} - I_T - I_{бк}) + \\ + R_k(-i_4 + I_{бэ} - I_T - I_{бк}) \\ 0 = (R_2 + R_c + R_{и} + R_3 + R_6)(i_3 + I_{зс} + I_3 - I_{зи} + I_{бэ} - I_T - I_{бк}) + \\ + (R_{и} + R_3)(i_2 + I_w - I_{зс} - I_3 + I_{зи} - I_{бэ} + I_T + I_{бк}) + R_c(i_1 - I_w - I_{зс} - I_3 + I_{зи}) + \\ + R_6(i_4 - I_{бэ} + I_T + I_{бк}) \\ 0 = (R_3 + R_6 + R_k)(i_4 - I_{бэ} + I_T + I_{бк}) + R_6(i_3 + I_{зс} + I_3 - I_{зи} + I_{бэ} - I_T - I_{бк}) + \\ + R_k(-i_2 - I_w + I_{зс} + I_3 - I_{зи} + I_{бэ} - I_T - I_{бк}) \end{cases} \quad (1)$$

Систему уравнений (1) решаем по методу Гаусса с помощью пакета прикладных программ Matlab 5.2. Параметры эквивалентной схемы преобразователя, необходимые для расчета ВАХ, получены из работы [6]. На рис. 3 представлены теоретическая и экспериментальная ВАХ данного преобразователя.

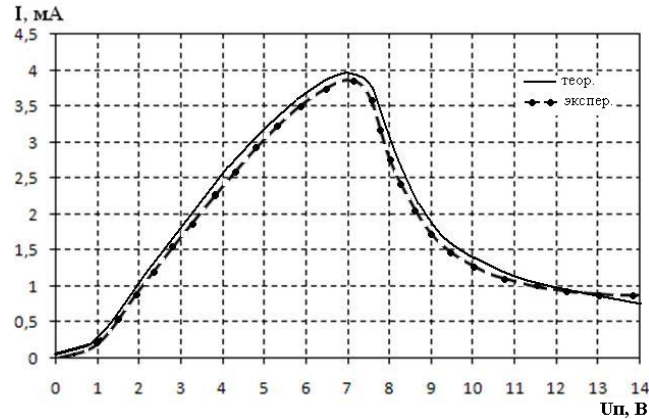


Рис. 3. Теоретическая и экспериментальная ВАХ частотного оптического преобразователя на основе биполярного и полевого транзисторов

Из зависимости видно, что участок отрицательного сопротивления лежит в пределах от 7,1 до 14 В напряжения питания. Экспериментальная установка представлена на рис. 4. Для экспериментальных исследований была изготовлена гибридная микросхема транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. В гибридной интегральной схеме были использованы кристаллы биполярного 2N3906 и полевого КП303 транзисторов.

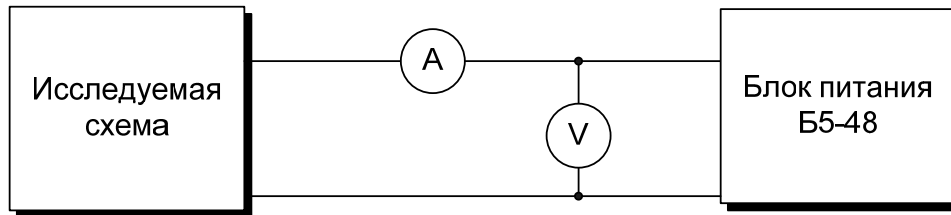


Рис. 4. Блок-схема измерительной установки для получения ВАХ

Функция преобразования определяется на основе эквивалентной схемы (рис. 5) с расчетом полного сопротивления на электродах сток-коллектор преобразователя, электрическая схема которого представлена на рис. 1. Эквивалентную схему (рис. 5) преобразовано в удобную для проведения расчетов (рис. 6).

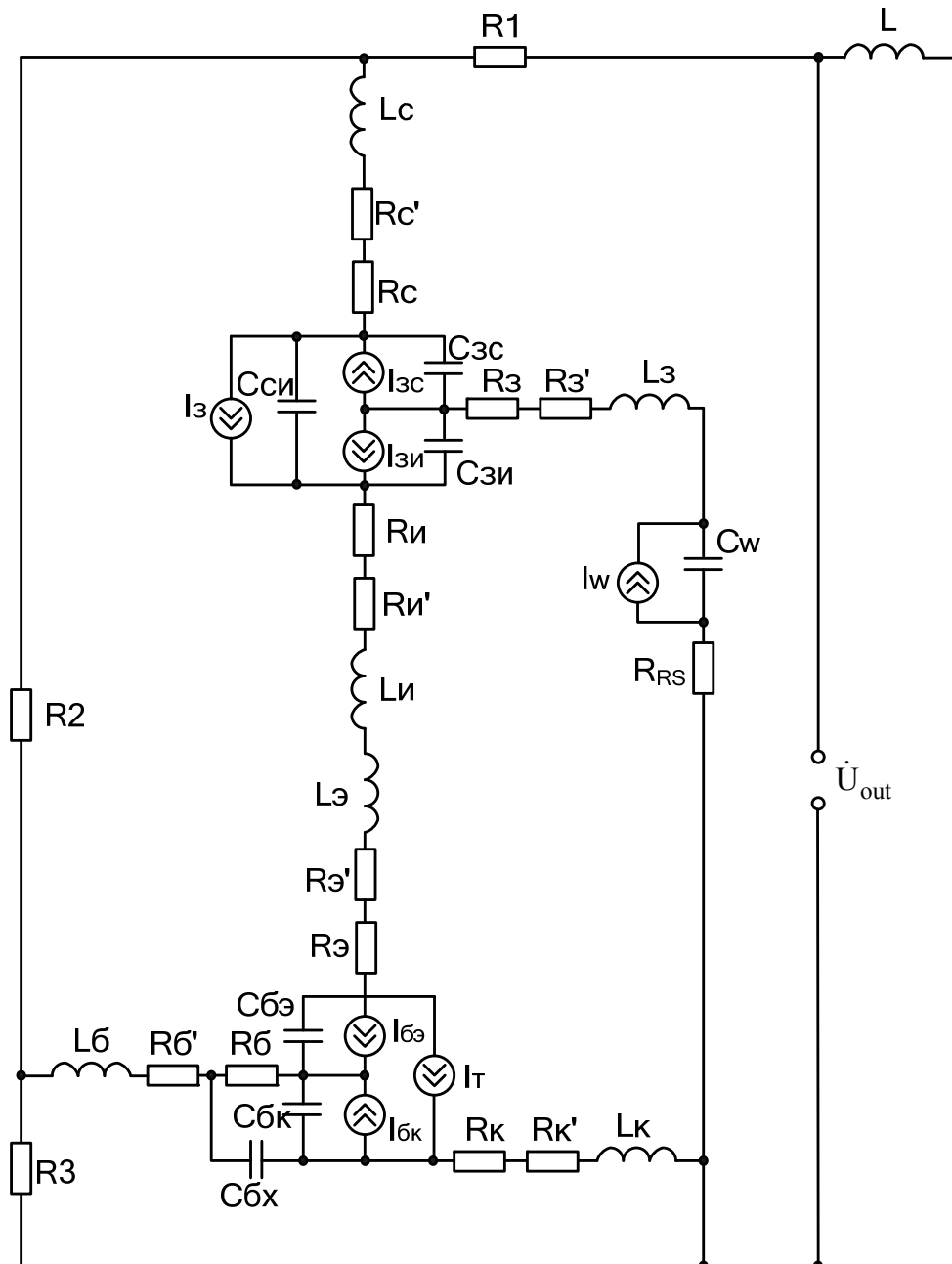


Рис. 5. Эквивалентная схема оптического преобразователя по переменному току

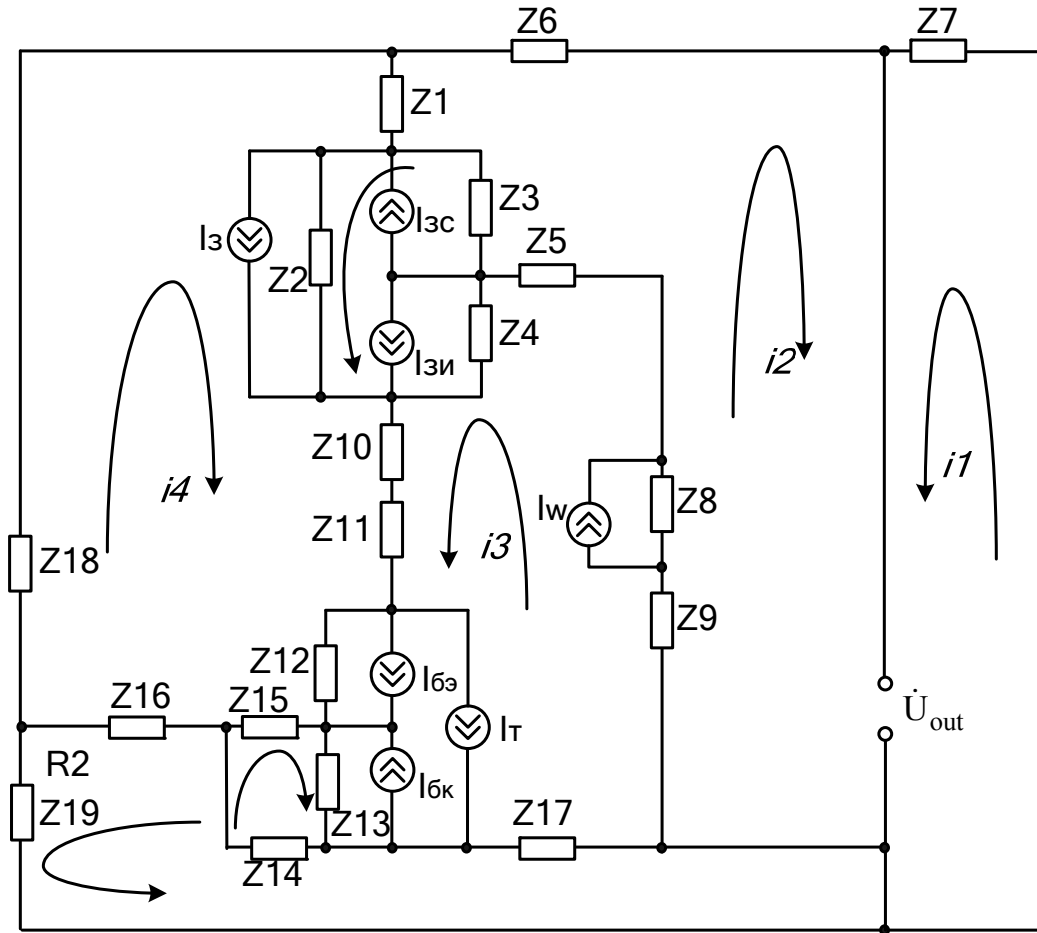


Рис. 6. Преобразованная эквивалентная схема оптического преобразователя по переменному току

Система уравнений Кирхгофа для переменного тока имеет вид:

$$\begin{cases}
 \dot{U}_{out} = Z_7 \cdot i_1 \\
 \dot{U}_{out} = (Z_6 + Z_9 + Z_8 + Z_5 + Z_3 + Z_1)i_2 - Z_1i_4 + (Z_5 + Z_8 + Z_9)i_3 + Z_3(-I_{3c} + I_{3и} + I_3) + \\
 + Z_3i_7 - Z_8I_w \\
 0 = (Z_5 + Z_4 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12} + Z_{13} + Z_{17} + Z_9 + Z_8)i_3 + (Z_5 + Z_8 + Z_9)i_2 + \\
 + (Z_{10} + Z_{11} + Z_{12})i_4 + Z_{13}i_6 - Z_{17}i_5 + Z_4(I_{3c} - I_{3и} - I_3) - Z_4i_7 - Z_8I_w + \\
 + Z_{12}(-I_{6a} + I_{6к} - I_7) + Z_{13}(-I_{6a} + I_{6к} - I_7) \\
 0 = (Z_1 + Z_2 + Z_{10} + Z_{11} + Z_{12} + Z_{15} + Z_{16} + Z_{18})i_4 + Z_2i_7 + Z_2(I_{3c} - I_{3и} + I_3) + \\
 + (Z_{10} + Z_{11} + Z_{12})i_3 + Z_{12}(-I_{6a} + I_{6к} - I_7) - Z_{15}i_6 + Z_{16}i_5 \\
 0 = (Z_{16} + Z_{19} + Z_{17} + Z_{14})i_5 + Z_{16}i_4 - Z_{17}i_3 + Z_{14}i_6 \\
 0 = (Z_{13} + Z_{14} + Z_{15})i_6 + Z_{13}i_3 + Z_{13}(-I_{6a} + I_{6к} - I_7) + Z_{14}i_5 - Z_{15}i_4 \\
 0 = (Z_2 + Z_4 + Z_3)i_7 + Z_2i_4 - Z_4i_3 + Z_3i_2 + Z_2(I_{3c} - I_{3и} - I_3) + Z_4(-I_{3c} + I_{3и} + I_3) + \\
 + Z_3(I_{3и} - I_{3c} + I_3),
 \end{cases} \quad (2)$$

где $Z_1 = (R_c + R'_c) + j\omega L_c$, $Z_2 = -j/(\omega C_{сн})$, $Z_3 = -j/(\omega C_{3c})$, $Z_4 = -j/(\omega C_{3и})$,
 $Z_5 = (R_3 + R'_3) + j\omega L_3$, $Z_6 = R_1$, $Z_7 = j\omega L$, $Z_8 = -j/(\omega C_w)$, $Z_9 = R_{RS}$,
 $Z_{10} = (R_{и} + R'_{и}) + j\omega L_{и}$, $Z_{11} = (R_9 + R'_9) + j\omega L_9$, $Z_{12} = -j/(\omega C_{6a})$, $Z_{13} = -j/(\omega C_{6к})$,
 $Z_{14} = -j/(\omega C_{6x})$, $Z_{15} = R_6$, $Z_8 = -j/(\omega C_w)$, $Z_{16} = R'_6 + j\omega L_6$, $Z_{17} = (R_k + R'_k) + j\omega L_k$,

$$Z_{15} = R_2, Z_{19} = R_3,$$

где $R'_б, R'_э, R'_к$ – омическое сопротивление базового, эмиттерного и коллекторного переходов соответственно; $L_б, L_э, L_к$ – индуктивность базового, эмиттерного и коллекторного переходов соответственно; $L_з, L_с, L_и$ – индуктивность электрода затвор, сток, исток; $C_{бэ}, C_{бк}$ – емкость эмиттерного и коллекторного переходов; $C_{бх}$ – входная емкость транзистора VT2; $C_{зс}, C_{зи}, C_{си}$ – емкость затвор-сток, затвор-исток, сток-исток.

Система уравнений (2) решена с помощью пакета прикладных программ Matlab 5.2, что позволило получить значение полного сопротивления, активная составляющая которого имеет отрицательное значение, а реактивная – емкостный характер.

Зависимости емкостной реактивной составляющей полного сопротивления от величины оптической мощности определяются как

$$X_C = -j/(\omega C_{эв}),$$

где ω – резонансная частота колебательного контура, которая зависит от величины мощности оптического излучения; $C_{эв}$ – эквивалентная емкость преобразователя, определяющаяся из системы уравнений (2).

Экспериментальная установка для получения функции преобразования представлена на рис. 7. Исследования проводились с использованием транзисторов типа 2N3906 и КП303, фотодиода с длиной волны 940 нм, конденсатора емкостью 470 нФ, резисторов 1 кОм (R1), 100 кОм (R2), 20 кОм (R3), пассивной индуктивности 100 мкГн.

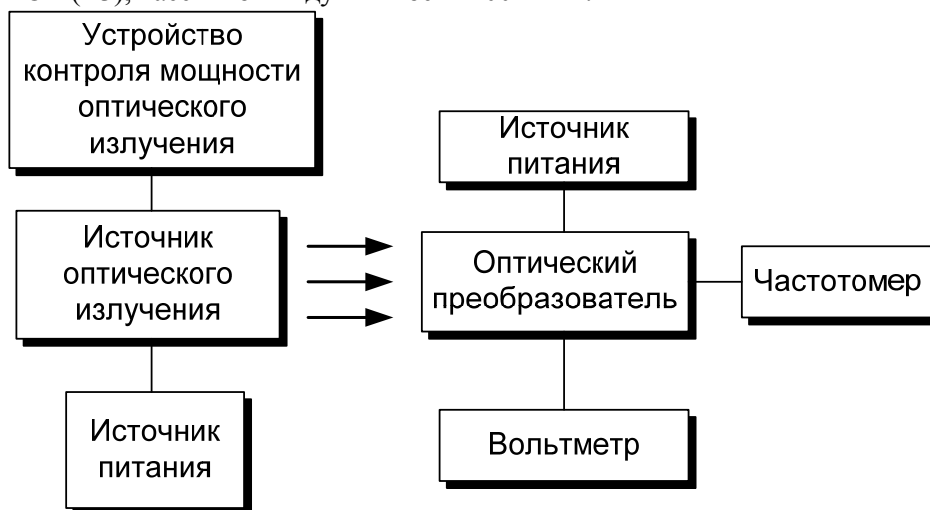


Рис. 7. Блок-схема измерительной установки для исследования зависимости частоты генерации преобразователя от оптического излучения

На рис. 8 представлена теоретическая и экспериментальная зависимости активной составляющей от напряжения питания для разных значений мощности оптического излучения. Из графика видно, что эта зависимость является почти линейной на участке от 11,5 В до 13 В ($20 \text{ мкВт} / \text{см}^2$) и от 11 В до 13 В ($147 \text{ мкВт} / \text{см}^2$). А при увеличении мощности оптического излучения активная составляющая уменьшается.

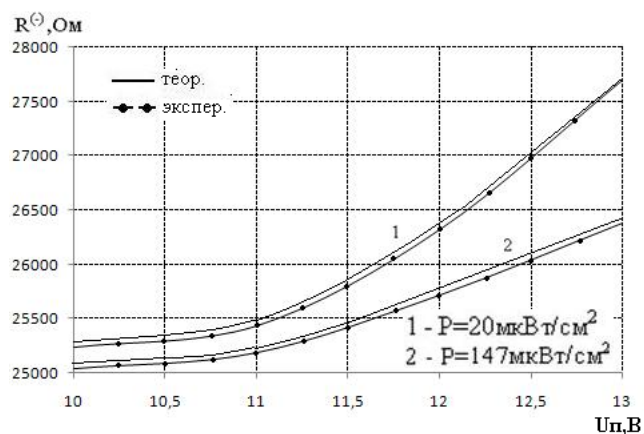


Рис. 8. Теоретические и экспериментальные зависимости активной составляющей полного сопротивления от напряжения питания

На рис. 9 представлена теоретическая и экспериментальная зависимости емкостной реактивной составляющей от напряжения питания. Из данного графика видно, что емкостная реактивная составляющая растет, причем при $P = 20 \text{ мкВт} / \text{см}^2$ от 10 до 11,5 В этот рост происходит в большей мере. Анализ хода кривых показывает, что с увеличением мощности оптического излучения емкостная реактивная составляющая уменьшается (при $U=11,5 \text{ В}$ на 10 Ом).

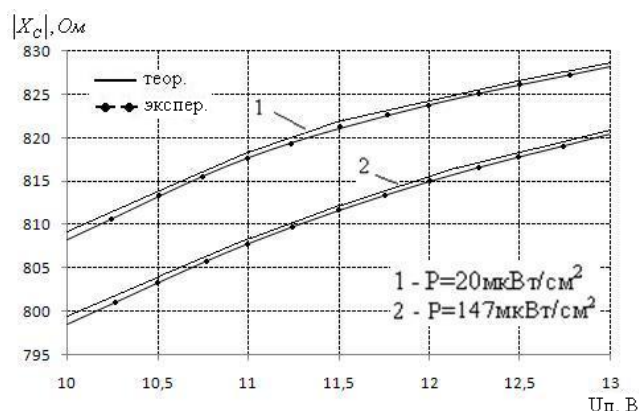


Рис. 9. Теоретические и экспериментальные зависимости емкостной реактивной составляющей полного сопротивления от напряжения питания

На рис. 10 показана зависимость частоты генерации от напряжения питания для разных мощностей оптического излучения. Видно, что частота генерации увеличивается при увеличении напряжения питания.

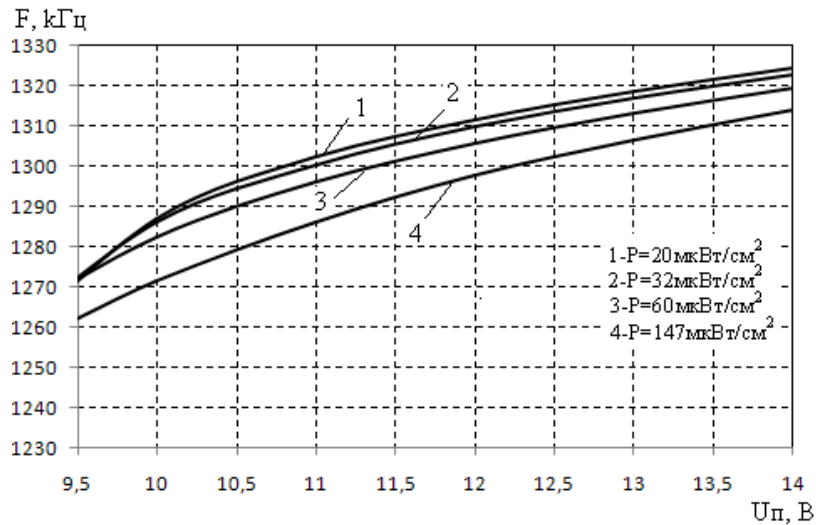


Рис. 10. Экспериментальная зависимость частоты генерации от напряжения питания при разных мощностях оптического излучения

На рис. 11 показана теоретическая и экспериментальная зависимости частоты генерации от мощности оптического излучения. Как видно из графика, лучшую зависимость для функции преобразования можно получить, если напряжение питания равно 10 В. Ведь тогда эта зависимость почти линейна. Также из рис. 11 видно, что частота генерации изменяется больше в диапазоне от 20 до 50 $\text{мкВт} / \text{см}^2$, а в диапазоне от 50 до 150 $\text{мкВт} / \text{см}^2$ изменяется почти линейно. Разногласие теоретических и экспериментальных данных не превышает $\pm 5\%$.

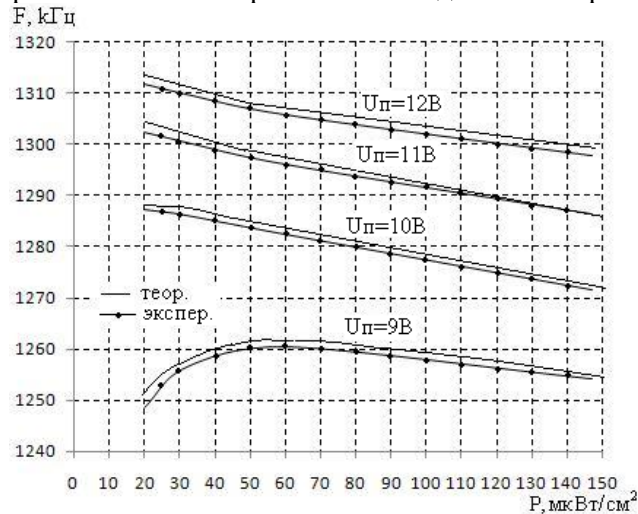


Рис. 11. Теоретическая и экспериментальная зависимости частоты генерации от мощности оптического излучения при разных напряжениях питания

Зависимость частоты генерации от мощности оптического излучения определялась по контуру обратного тока в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 5). В этом случае функция преобразования определяется таким выражением:

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_w(P) \cdot C_{зи} + C_w(P) \cdot C_{си} + C_{си} \cdot C_{зи}}{L \cdot C_w(P) \cdot C_{си} \cdot C_{зи}}} \quad (3)$$

Чувствительность преобразователя определяется из выражения (3) и описывается уравнением:

$$S_P^F = \frac{1}{4} \frac{(C_{зи} + C_{си}) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right) \cdot (C_w(P) \cdot C_{зи} + C_w(P) \cdot C_{си} + C_{си} \cdot C_{зи}) \cdot \left(\frac{\partial}{\partial P} C_w(P) \right)}{\pi \sqrt{\frac{L \cdot C_w(P) \cdot C_{си} \cdot C_{зи}}{C_w(P) \cdot C_{зи} + C_w(P) \cdot C_{си} + C_{си} \cdot C_{зи}}}} \quad (4)$$

На рис. 12 показана зависимость чувствительности оптического преобразователя от величины мощности оптического излучения.

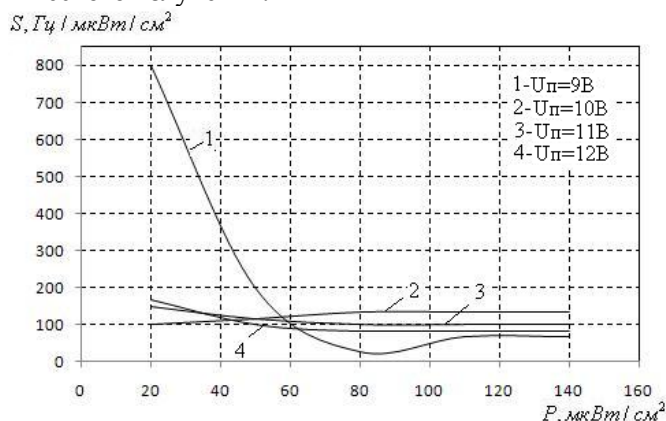


Рис. 12. Зависимость чувствительности оптического частотного преобразователя от мощности оптического излучения

Как видно из графика, чувствительность устройства составляет 100 – 800 Гц/мкВт/см². Максимальную чувствительность оптический частотный преобразователь имеет при напряжении питания 9 В.

Выводы

Разработана математическая модель частотного преобразователя на основе автогенератора с биполярным и полевым транзисторами. На основе модели получены аналитические выражения ВАХ, функции преобразования и уравнения чувствительности. Теоретические и экспериментальные зависимости показали, что чувствительность разработанного устройства составляет 100 – 800 Гц/мкВт/см². Максимальную чувствительность оптический частотный преобразователь имеет при напряжении питания 9 В.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хансуваров К. И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: учебное пособие для техникумов / К. И. Хансуваров, В. Г. Цейтлин – М.: Издательство стандартов, 1990. – 287 с.
2. Патент США № 7161165B2, МПК5 G01F 23/292. Optical transducer for continuously determining liquid level/ Alvin R. Wirthlin. – № 10/886174; Заявл. 07.07.2004; Опубл. 09.01.2007.
3. Осадчук А. В. Фоточувствительные преобразователи на основе структур с отрицательным сопротивлением: моногр. / А. В. Осадчук – Винница: Континент, 1998. – 130 с.
4. Новицкий П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками. / Новицкий П. В., Кноринг В. Г., Гутников В. С. – Л.: Энергия, 1970. – 424 с.
5. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від'ємним опором. / О. В. Осадчук – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. – 302 с.
6. Разевиг В. Д. Применение программ P-CAD и PSPICE для схемотехнического моделирования на ПЭВМ. Выпуск 2. Модели компонент аналоговых устройств / В. Д. Разевиг. – М.: Радио и связь, 1992. – 72 с.

Осадчук Владимир Степанович – д. т. н., профессор, кафедра электроники, тел.: (0432)-598013

Осадчук Александр Владимирович – д. т. н., профессор, заведующий кафедрой радиотехники.

Ильченко Елена Николаевна – аспирантка, кафедра электроники, e-mail.: alenail_86@mail.ru, тел.: (0432)-688911.
Винницкий национальный технический университет.