Рассмотрим случай, когда отклонение струны в начальный момент времени в некотором месте струны произведено «ударом», то есть $g(x) = \mu_{\Delta}(x, a, b, c)$, f(x) = 0. «Удар» будем считать достаточно резким, так что $a = b - sL;\ c = b + sL, s < 0{,}5$ и также $b = mL$. При этом максимальное звуковое давление, создаваемое каждой гармоникой струны равно:

$$\Delta P_{max,n} = 2\rho c\mu_m \frac{1}{(\pi n)^2 s}\left(2\sin\frac{\pi n b}{L} - \sin\frac{\pi n a}{L} - \sin\frac{\pi n c}{L}\right),$$

и относительное максимальное давление равно:

$$\frac{\Delta P_{max,n}}{\Delta P_{max,1}} = \frac{1}{n^2}\frac{2\sin(\pi n m) - \sin(\pi n(m-s)) - \sin(\pi n(m+s))}{2\sin(\pi m) - \sin(\pi(m-s)) - \sin(\pi n(m+s))}.$$

График этой величины для различных гармоник в зависимости от места приложения воздействия представлен на рисунке 2, в частности видно, что не все гармоники присутствуют в колебаниях в зависимости от места приложения воздействия. Полученные формулы и приведенные рисунки позволяют определить определенные закономерности в колебаниях струны.

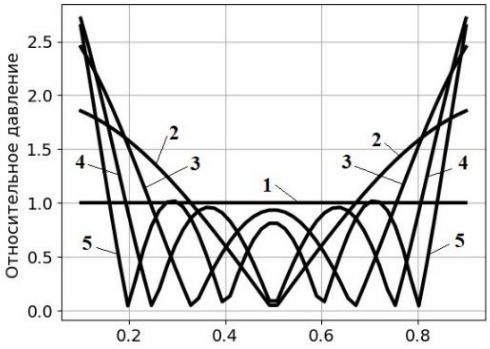

Рисунок 2 – Зависимость относительного давления от точки приложения воздействия («удар») при s = 0,1 для различных гармоник n = 1 (*1*), 2 (*2*), 3 (*3*), 4 (*4*), 5 (*5*)

Литература

1. Fletcher, N. H. The Physics of Musical Instruments / N. H. Fletcher, T. D. Rossing. – New York: Springer-Verlag, 1991. – 620 p.

2. Малых, М. Д. Уравнения математической физики / М. Д. Малых. – М., 2012. – 177 с.

УДК 004.056:061.68

ВЫБОР СИГНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ С КАНАЛОМ ОПОВЕЩЕНИЯ ПО СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Бокуть Л. В.[1], Деев Н. А.[2]

[1]Белорусский национальный технический университет
[2]Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Минск, Беларусь

Аннотация. В работе рассмотрены различные варианты формирования двоичных сигналов, которые позволяют обеспечить помехоустойчивость к узкополосным и импульсным помехам в системах пожарной сигнализации. Рассмотрены шумоподобные сигналы (ШПС), сигналы с параллельно-составной структурой, а также использование различных частот для входящих в группу сигналов.
Ключевые слова: помехоустойчивость, информационная последовательность абонентов, узкополосные помехи.

THE CHOICE OF SIGNALS OF INFORMATION TRANSFER IN THE FIRE ALARM SYSTEMS WITH THE CHANNEL OF THE NOTIFICATION ON THE ALTERNATING CURRENT MAIN

Bokut L. V.[1], Deev N. V.[2]

[1]Belarusian National Technical University
[2]The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Belarus

Summary. In work various options of formation of binary signals which allow to provide noise stability to narrow-band and pulse hindrances in fire alarm systems are considered. Noise-type signals (SPS), signals with parallel and compound structure and also use of various frequencies for the signals entering into group are considered.
Keywords: noise stability, information sequence of subscribers, narrow-band hindrances.

Адрес для переписки: Бокуть Л. В., ул. Якуба Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lvbokut@bntu.by

В системах пожарной сигнализации линии связи должны быть защищены от воздействия пожара и сохранять работоспособность до завершения эвакуации людей. Проблема защиты от пожара линий связи решается различными способами. В работе [1] представлен анализ известных решений этой проблемы.

Как мы осуждали ранее, «активное использование низковольтных электросетей для передачи данных в системах удаленного управления и оповещения предоставляет очевидную альтернативу различным проводным и беспроводным линиям связи» [2].

Проведем исследование передачи данных по силовым линиям (PLC) и использования каналов передачи информации по низковольтным сетям переменного тока в системах пожарной сигнализации. Высокий уровень помех в низковольтной промышленной сети переменного тока существенно ограничивает их применение в качестве трансляционных систем и требует разработки устройств с повышенной помехозащищенностью и надежностью [3].

Помехи в канале оповещения по сети переменного тока носят, как известно, импульсно-непрерывный характер. Статистическое описание таких помех отличается от гауссовских помех. В связи с этим наиболее помехоустойчивыми системами передачи информации по указанным каналам следует считать системы с широкополосными шумоподобными сигналами (ШПС) и сигналами с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

За счет частотно-временной избыточности ШПС обеспечивают требуемую помехоустойчивость по отношению к узкополосным и импульсным помехам.

Основные характеристики шумоподобных сигналов определяются в первую очередь требуемой скоростью передачи информации, количеством абонентов, пропускной способностью каналов связи [3].

Примем для определенности диапазон частот канала в пределах 100÷150 кГц, количество информационных источников (абонентов) – 250, полосу спектра передаваемого сигнала ΔF = 10 кГц. При временном уплотнении сигналов абонентов и последовательном опросе абонентов скорость передачи информации C_i каждого абонента определяется вышеуказанными условиями и равна $C_i = 250/c,\ i = \overline{1{,}250}$. Отсюда следует, что скорость обновления информации, поступающей от абонента, равна 1/*c*. При этом база B_a сигнала каждого абонента определяется соотношением $B_a = \Delta F/C_i = 40, i = \overline{1{,}250}$. Параметр B_a шумоподобного сигнала обеспечивает запас помехоустойчивости системы передачи пожарной сигнализации.

Итак, за счет использования ШПС обеспечивается эффективный прием сигналов на фоне помех.

Рассмотрим возможные варианты формирования информационной последовательности абонентов. Абонентская последовательность в простейшем случае определяется его двоичным номером. При количестве абонентов *N* = 250 число двоичных разрядов определяется величиной $n = \log_2 N = 8$. При базе $B_a = 40$ эффективная база сигнала, приведенная к одиночному разряду двоичного числа, равна $B_{эфф} = B_a/n = 5$.

Для того чтобы сохранить помехоустойчивость системы передачи информации, заложенной в базе B_a сигнала, различение абонентов можно осуществить на основе различения *N* ортогональных сигналов, формируемых, например, с помощью функций Уолша $W_i,\ i = \overline{1{,}250}$.

Вероятность искаженного приема пакета длительностью *N* бит на *i*-том частотном канале p^i при наличии гармонической помехи на частоте $f_П$ зависит от отстройки частоты $f_П$ от центральной частоты рабочего канала f_i и при гипотезе о независимости распределения шума на соседних символьных интервалах равна [4]:

$$P^i = 1 - \left(1 - p^i(h, \gamma_i, \mu)\right)^N, i\epsilon[0, M-1],$$

где $\gamma_i = 4T(f_П - f_i)$ – отстройка помехи от центральной частоты i-того частотного канала, нормированная к девиации частоты при ММС, $\mu = A_П/A_С$ – отношение амплитуды помехи к амплитуде полезного сигнала.

Пакет будет принят неправильно при приеме с ППРЧ при появлении каких-то ошибок на каждом из *M* частотных каналов. Тогда вероятность искаженного приема пакета длительностью *N* бит равна

$$P = \prod_{i=0}^{M-1} P^i = \prod_{i=0}^{M-1}\left[1 - \left(1 - p^i(h, \gamma_i, \mu)\right)^N\right]. \quad (1)$$

Средняя вероятность битовой ошибки при приеме пакета сообщений равна:

$$p = 1 - (1 - P)^{1/N}. \quad (2)$$

Далее получим, подставив (1) в (2):

$$p = 1 - \left(1 - \prod_{i=0}^{M-1} P^i\right)^{1/N} =$$

$$1 - \left(1 - \prod_{i=0}^{M-1}\left[1 - \left(1 - p^i(h, \gamma_i, \mu)\right)^N\right]\right)^{1/N}. \quad (3)$$

Наконец, получим полное выражение для средней вероятности неверного приема при *M* канальном ППРЧ, подставив в (3) выражение для вероятности битовой ошибки приема на *i*-том частотном канале.

Третий вариант формирования сигнала связан с расширением частотного ресурса за счет использования различных частот для входящих в группу сигналов. Использование разных частот делает систему устойчивой к узкополосным помехам. Узкополосная помеха воздействует на один или несколько сигналов, работающих на своих частотах, а не на всю систему.

Частотное уплотнение требует увеличения полосы канала в *k* раз, что усложняет систему передачи и приема информации. Для разделения сигналов необходимо наличие на приемной стороне полосовых фильтров, это усложняет аппаратуру.

Литература

1. Модульный принцип построения пожарной сигнализации для жилых помещений / И. Е. Зуйков, А. Г. Василевский, А. А. Антошин, Д. Л. Есипович //

Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: сб. тез. докл. 5-й Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2009 г.: в 3 т. – Мн., 2009. – Т. 1. – С. 314–317.

2. Антошин, А. А. Передача информации между удаленными компонентами системы пожарной сигнализации / А. А. Антошин, Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Безопасность человека и общества: совершенствование системы реагирования и управления защитой от чрезвычайных ситуаций: сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф. – Мн: УГЗ, 2018. – С. 11–16.

3. Антошин, А. А. Система пожарной сигнализации с передачей данных по низковольтной сети переменного тока / А. А. Антошин, Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2012. – № 2(32). – С. 88–99.

4. Присяжнюк, И. В. Повышение помехоустойчивости приема сообщений в охранных радиотехнических системах при наличии замираний и внешних помех: дис. … канд. техн. наук: 05.12.04 / И. В. Присяжнюк. – СПб., 2005. – 134 с. – URL: https://search.rsl.ru/ ru/ record/ 01003299820 (дата обращения: 19.09.2025).

УДК 621.382.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СУБМИКРОННОГО КРЕМНИЕВОГО ЛАВИННОГО ФОТОДИОДА

Борздов А. В., Борздов В. М., Буйновский Д. Н.

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Аннотация. С помощью многочастичного метода Монте-Карло проведено моделирование тока в кремниевом лавинном фотодиоде со структурой p^+–i–p–n^+, работающем в режиме обратного смещения при воздействии пикосекундных импульсов лазерного излучения с длиной волны 650 нм. Рассмотрены диодные структуры с различной толщиной и различными уровнями легирования рабочих областей.
Ключевые слова: лавинный фотодиод, кремний, метод Монте-Карло.

SIMULATION OF ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF A SUBMICRON SILICON AVALANCHE PHOTODIODE

Borzdov A. V., Borzdov V. M., Buinouski D. N.

Belarusian State University, Minsk, Belarus

Abstract. Using the ensemble Monte Carlo method, we simulated the current in a silicon avalanche photodiode with a p^+–i–p–n^+ structure operating in reverse-bias mode under the influence of picosecond pulses of laser radiation with a wavelength of 650 nm. Diode structures with different thicknesses and doping levels of the device's operating regions were considered.
Keywords: avalanche photodiode, silicon, Monte Carlo method.

Адрес для переписки: Борздов А. В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: BorzdovAV@bsu.by

Полупроводниковые фотодиодные структуры находят широкое применение в оптоэлектронике как преобразователи оптического излучения в электрические сигналы. Полупроводниковые фотодиоды, в частности кремниевые, являются основными элементами для создания детекторов излучения видимого и инфракрасного спектрального диапазона. Работать такие фотодиоды могут как в обычном токовом режиме, так и в режиме счета отдельных единичных фотонов [1, 2].

Численное моделирование электрических характеристик фотодиодов является важной задачей в рамках разработки и проектирования таких элементов с целью прогнозирования их рабочих характеристик. Для моделирования электрических характеристик интегральных субмикронных фотодиодов и фототранзисторов одним из наиболее перспективных методов является самосогласованное моделирование на основе многочастичного метода Монте-Карло [3–6]. Многочастичный метод Монте-Карло, как метод кинетического моделирования, позволяет проводить имитацию процессов переноса носителей заряда в приборных полупроводниковых структурах. При этом существует возможность учета при моделировании основных, наиболее значимых, процессов рассеяния носителей заряда, а также процессов их генерации-рекомбинации. В случае лавинных фотодиодов (ЛФД) со структурой p^+–i–p–n^+, работающих в режиме обратного смещения, особенно важным является учет процессов лавинного умножения носителей заряда вследствие процессов межзонной ударной ионизации.

Схематически структура моделируемого ЛФД представлена на рисунке 1. Излучение направлено нормально к поверхности и охватывает область между электродами длиной $LC = 0{,}5$ мкм. Толщина i-слоя равна $Wi = 0{,}4$ мкм, а толщины легированных слоев полагаются одинаковыми ($Wd1 = Wd2 = Wd3$) и равными либо 0,1 мкм, либо 0,2 мкм. Концентрации донорной и акцепторной примесей в n+- и p+-областях при расчетах полагаются равными 1024 $м^{-3}$, а уровень легирования p-области варьируется от 1021 до 1023 $м^{-3}$.

Расчет фототока в рассмотренных ЛФД проводится в рамках самосогласованного двумерного моделирования методом частиц [3, 7]. Интенсивность излучения составляет 1011 Вт/м2, длительность импульса – 1 пс. Излучение включается в момент времени t = 0 пс. Температура