

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

УДК 681.393.3

Е. И. АЛГАЗИН
В. Б. МАЛИНКИН
А. В. МАЛИНКИН

Новосибирский государственный
технический университет
Сибирский государственный
университет телекоммуникаций
и информатики, г. Новосибирск

ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ИНВАРИАНТНОЙ СИСТЕМЫ ПРИЕМА РАДИОСИГНАЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Оценена помехоустойчивость инвариантной системы передачи информации, основанной на использовании колоколообразной огибающей с высокочастотным заполнением. При этом учтено воздействие переходных процессов канала связи, полосовых фильтров и фильтров нижних частот. Приведено аналитическое выражение оценки инварианта при воздействии мультипликативной и аддитивной помехи.

Ключевые слова: инвариант, переходный процесс, АМ-модуляция, вероятность ошибки, помехоустойчивость.

1. Введение

В [1–3] исследовалось поведение инвариантных систем при воздействии мультипликативной и аддитивной помехи. В этих работах использовалась бесконечно большая полоса пропускания канала связи и не учитывались влияния различных фильтров. Одна-

ко следует заметить, что любая система имеет входные полосовые фильтры и фильтры нижних частот.

Данная статья посвящена исследованию помехоустойчивости инвариантной системы при наличии переходного процесса канала связи, наличии фильтров в приемном оборудовании и воздействии на

принимаемый сигнал мультипликативной и аддитивной помехи.

2. Постановка задачи

Имеем канал связи, ограниченный частотами f_n и f_b . Коэффициент передачи канала связи на интервале стационарности является постоянным. Длительность информационной и обучающей последовательности относятся как 3:2. Алгоритм приема использует механизм усреднения для демодуляции информационного сигнала.

Требуется оценить помехоустойчивость инвариантной системы при воздействии мультипликативной и аддитивной помехи и наличии фильтров приема.

3. Решение поставленной задачи

В данном исследовании для передачи информационных и обучающих сигналов используется колоколообразная огибающая с высокочастотным заполнением. На приемной стороне такие сигналы принимаются с помощью алгоритма синхронного детектирования.

Как показано в [1–3], оценка инварианта может быть рассчитана с помощью следующего аналитического выражения:

$$\widehat{INV}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (kINV_1 S(i) + \xi(i))}{\sum_{j=1}^L \sum_{m=1}^L (kS_{об} S(j) + \eta(m, j))} S_{об} \quad (1)$$

где \widehat{INV}_1 — оценка 1-го инварианта; k — коэффициент передачи канала связи; INV_1 — 1-ый инвариант; L — количество накоплений обучающего сигнала; n — количество отсчетов огибающей; $S_{об}$ — обучающий сигнал; $\xi(i)$ — i -ый отсчет аддитивной помехи информационного сигнала; $\eta(m, j)$ — j -ый отсчет аддитивной помехи в m -ой реализации обучающего сигнала; $S(i)$ — i -ый отсчет колоколообразной огибающей радиоимпульса.

Учет влияния полосовых фильтров и фильтров нижних частот на информационный и обучающий сигнал при обработке в частотной области сводится к следующему:

$$P_{вч}(jk\omega_{1вч}) = S_{вч}(jk\omega_{1вч}) k_{вч}(jk\omega_{1вч}), \quad (2)$$

$$P_{нч}(jk\omega_{1нч}) = P_{вч}(jk(\omega_{1вч} + \Omega)) k_{нч}(jk\omega_{1нч}), \quad (3)$$

где k — номер гармоники ($k \in \{0; N - 1\}$); N — число отсчетов в блоке; $\omega_{1вч}$ — первая гармоника; $S_{вч}(jk\omega_{1вч})$ — спектр входного сигнала; $k_{вч}(jk\omega_{1вч})$ — комплексный коэффициент передачи высокочастотного полосового фильтра; $P_{вч}(jk\omega_{1вч})$ — результирующий спектр входного ВЧ сигнала; Ω — частота, на которую происходит сдвиг результирующего спектра входного сигнала из области высоких частот в область нижних частот; $k_{нч}(jk\omega_{1нч})$ — комплексный коэффициент передачи фильтра нижних частот; $\omega_{1нч}$ — первая гармоника НЧ сигнала; $P_{нч}(jk\omega_{1нч})$ — результирующий спектр входного НЧ сигнала.

При этом фазовые характеристики рассчитываются следующим образом

$$\varphi_{нч}(jk\omega_{1нч}) = \varphi_{сигн.вч}(jk\omega_{1вч}) + \varphi_{фвч}(jk\omega_{1вч}) + \varphi_{вч \rightarrow нч}(j\Omega) + \varphi_{фнч}(jk\omega_{1нч}), \quad (4)$$

где $\varphi_{нч}(jk\omega_{1нч})$ — результирующая фаза демодулированного сигнала; $\varphi_{сигн.вч}(jk\omega_{1вч})$ — фазовая составляющая сигнала ВЧ; $\varphi_{фвч}(jk\omega_{1вч})$ — фазовая характери-

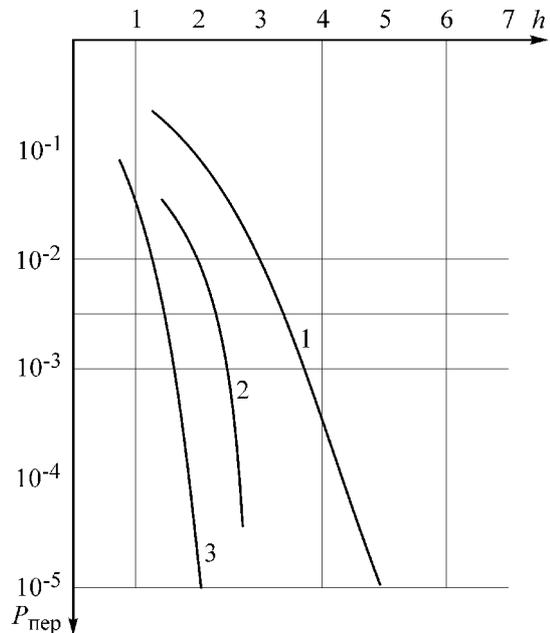


Рис. 1. Кривые помехоустойчивости при наличии мультипликативной помехи (вероятность ошибки при $k = 1$)
 1 — система с классической АМ-модуляцией;
 2 — инвариантная система с выделением колоколообразной огибающей;
 3 — инвариантная система с бесконечно широкой полосой пропускания и выделением прямоугольной огибающей

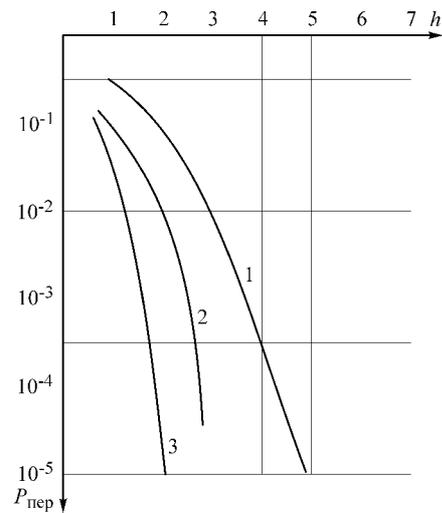


Рис. 2. Кривые помехоустойчивости при наличии мультипликативной помехи (вероятность ошибки при $k = 0,7$)
 1 — система с классической АМ-модуляцией;
 2 — инвариантная система с выделением колоколообразной огибающей;
 3 — инвариантная система с бесконечно широкой полосой пропускания и выделением прямоугольной огибающей

стика фильтра ВЧ; $\varphi_{вч \rightarrow нч}(j\Omega)$ — фазовая составляющая сигнала ВЧ, сдвинутого в НЧ область; $\varphi_{фнч}(jk\omega_{1нч})$ — фазовая характеристика фильтра НЧ.

В результате данного подхода [4, 5] была рассчитана помехоустойчивость инвариантной системы в случае влияния мультипликативной и аддитивной помехи и влияние различных фильтров.

На рис. 1 и 2 приведены кривые помехоустойчивости.

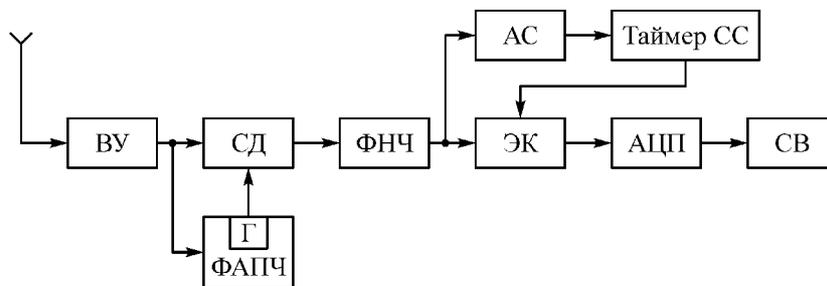


Рис. 3. Приемная часть инвариантной системы передачи информации, основанная на выделении огибающей при помощи обычного синхронного детектора
 ВУ — входное устройство (имеет полосу пропускания 7–8 гармоник несущей);
 СД — синхронный детектор; ФАПЧ — устройство фазовой автоподстройки частоты;
 Г — генератор; ФНЧ — фильтр нижних частот; АС — анализатор сигнала;
 ЭК — электронный ключ; АЦП — аналого-цифровой преобразователь;
 СВ — специвычислитель; таймер СС — таймер системы синхронизации

В расчетах использовался порог при демодуляции равный полусумме инвариантов.

Из рис. 1 и 2 видно, что влияние переходных процессов в инвариантной системе по сравнению с системой, имеющей бесконечно большую полосу пропускания, незначительно.

Следует заметить, что для классических методов передачи, основанных на АМ-модуляции, для уменьшения влияния переходных процессов в фильтрах НЧ подбирались параметры фильтров, обеспечивающие минимум вероятности ошибки [6].

По результатам исследований предложена структура инвариантной системы передачи информации, которая изображена на рис. 3.

4. Выводы

Проведен анализ помехоустойчивости инвариантной системы при воздействии комплекса помех и различных фильтров.

Предложенная структура обработки сигналов может найти широкое применение в специализированных радиосистемах для помехоустойчивой передачи управляющих сигналов.

Библиографический список

1. Алгазин, Е. И. Инвариантная некогерентная система передачи и ее характеристики / Е. И. Алгазин, А. П. Ковалевский, В. Б. Малинкин // Омский научный вестник. — 2008. — № 4 (73). — С. 154–157.
2. Алгазин, Е. И. Помехоустойчивость инвариантной системы передачи информации при наличии слабых корреляционных связей / Е. И. Алгазин, А. П. Ковалевский, В. Б. Малинкин // Красноярск : Вестник СибГАУ, 2008. — № 4 (21). — С. 29–32.

3. Алгазин, Е. И. Инвариантная система при нелинейной обработке сигналов / Е. И. Алгазин, А. П. Ковалевский, В. Б. Малинкин // Омский научный вестник. — 2009. — № 3 (83). — С. 272–274.

4. Калабеков, Б. А. Микропроцессоры и их применение в системах передачи и обработки сигналов / Б. А. Калабеков. — Радио и связь, 1988. — 368 с.

5. Бакалов, В. П. Теория электрических цепей / В. П. Бакалов, П. П. Воробийенко, Б. И. Крук. — М. : Радио и связь, 1988. — 444 с.

6. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. — М. : Дрофа, 2006. — 719 с.

АЛГАЗИН Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры общей электротехники Новосибирского государственного технического университета.

МАЛИНКИН Виталий Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры многоканальной связи и оптических систем (МЭС и ОС) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

МАЛИНКИН Андрей Витальевич, аспирант заочной формы обучения кафедры многоканальной связи и оптических систем (МЭС и ОС) Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики.

Адрес для переписки: nat_gus@ngs.ru

Статья поступила в редакцию 19.10.2011 г.

© Е. И. Алгазин, В. Б. Малинкин, А. В. Малинкин

Книжная полка

Мур, Дж.Ф. Все, что вы хотите сделать с фотокамерой мобильного телефона : руководство / Дж. Ф. Мур ; пер. с англ. — М. : Новый Издат. дом, 2005. — 368 с. — ISBN 5-9643-0055-3.

Эта книга является исчерпывающим руководством по использованию вашего мобильного телефона с фотокамерой. Издание содержит пошаговые инструкции, которые помогут вам создавать лучшие фотографии, редактировать и корректировать фотоизображения, передавать фотоснимки на свой компьютер, на другие мобильные телефоны, помещать фотоснимки в Сети и посылать их по электронной почте друзьям. Улучшите свои методы фотосъемки! В вашем распоряжении советы по кадрированию фотографий, освещению картинок, глубине резкости и съемке видео. С помощью этой книги вы также научитесь печатать свои лучшие фотографии и даже сможете создать свой собственный бесплатный web-сайт.

УСТАНОВКА ДЛЯ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО РАВНОМЕРНОГО НАГРЕВА ОБЪЕКТОВ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Предложена конструкция СВЧ-установки для концентрации энергии на поверхности нагреваемого объекта. В установке использована вибраторная решетка на основе поверхностного волновода, расположенная внутри рефлектора в виде зеркального параболического проводящего цилиндра. В область концентрации СВЧ-энергии размещают нагреваемый объект.

Ключевые слова: поверхностный волновод, СВЧ-излучение, нагрев.

Во многих отраслях производственной деятельности используют СВЧ-излучение. Среди задач применения СВЧ-излучения крайне важным является обеспечение объекта концентрацией СВЧ-излучения на его поверхности. Решение такой задачи является крайне актуальным для деревообрабатывающей и нефтеобрабатывающей промышленности, сельского хозяйства и других отраслей.

В деревообрабатывающей промышленности решение задачи качественной, быстрой и малозатратной сушки древесины остается актуальной, несмотря на достигнутые результаты. В последнее время усилился интерес к СВЧ-сушке древесины твердых пород. В содержании работы [1] для сушки древесины в установке предложено использовать комбинированный принцип действия, включающий конвективный и диэлектрический нагрев.

В работе [2] предложена СВЧ-вакуумная сушка, позволяющая высушивать оцилиндрованные бревна с начальной влажностью 80 % до конечной влажности 15 % с уменьшением энергозатрат. СВЧ-излучение, воздействуя на влажную древесину, приводит к закипанию влаги, которая создает избыточное давление. Такое давление приводит к выдавливанию из капилляров мелких капель влаги и образованию пара. Образовавшаяся влага выносится за пределы древесины диффузионным потоком. Горячий пар, выходящий из древесины, создает тепловую завесу, которая препятствует снижению температуры дерева.

В малогабаритной сушилке [3], позволяющей при значительной скорости сушки добиться высококачественного высушенного материала используют рабочую камеру, содержащую блок магнетронов и систему распределения энергии электромагнитного поля в диапазоне СВЧ по длине камеры.

Применяемые устройства для СВЧ-сушки древесины характеризуются трудностями концентрации мощности генераторов и распределения плотности энергии вдоль камеры, в которой происходит облучение объекта.

В настоящее время для СВЧ-сушки предложена установка, в основе которой лежит использование поверхностного волновода [4]. В такой установке нагреваемый объект размещают в поле поверхностного

волновода. Применение для СВЧ-сушки поверхностного волновода по сравнению с традиционными способами имеет следующие преимущества:

- в достижении минимальных значений металлоемкости установки, излучаемой мощности и мощности, которую требуется утилизировать;
- обеспечение равномерного нагрева длинномерных объектов сушки;
- значительное снижение стоимости установки для сушки древесины.

Применение поверхностного волновода позволяет разработать новые устройства СВЧ-сушки. В нашем случае речь идет об установке СВЧ-излучения, в которой используется вибраторная решетка на основе поверхностного волновода, расположенная внутри рефлектора в виде зеркального параболического проводящего цилиндра. Такая вибраторная решетка позволит получить равномерное распределение СВЧ-энергии на площади (поверхности).

Известна вибраторная решетка [5, 6], содержащая однопроводную линию передачи поверхностной волны и вибраторную решетку, образованную размещением вибраторов коллинеарно проводу однопроводной линии передачи (ОЛП) поверхностной волны.

При возбуждении однопроводной линии передачи устанавливается соответствующая поверхностной волне структура волны электромагнитного поля типа E_{00} , содержащая радиальную и продольную составляющие электрического поля, и соответствующую составляющую магнитного поля [7, 8]. Вибраторы решетки выполнены в виде цилиндров, надетых на провод, и установлены на проводе вдоль продольной линии напряженности электрического поля, радиальная составляющая поля не наводит электрического тока, т.к. направление радиальной составляющей напряженности электрического поля перпендикулярно оси вибратора. На рис. 1 показана схема расположения двух продольных вибраторов (фрагмент антенной решетки), которые надеты на провод ОЛП и возбуждаются под действием напряженности электрического поля волны E_{00} , распространяющейся в ОЛП.

Достижение равномерного распределения СВЧ-энергии для сушки объекта обеспечивается тем, что

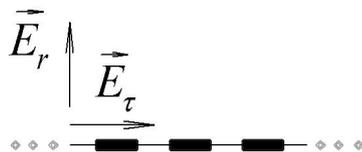


Рис. 1. Схема расположения вибраторов антенной решетки (фрагмент) и составляющих напряженности электрического поля в ОЛП

вибраторная решетка, содержащая однопроводную линию передачи поверхностной волны с размещенными соосно проводу вибраторами, расположена внутри зеркального параболического проводящего цилиндра на фокальной оси. В сечении, перпендикулярном фокальной оси расположена парабола с точкой фокуса, поэтому распределение поля, излученного антенной решеткой, в ортогональном оси решетки направлении близко к равномерному.

На рис. 2 изображена схема установки на основе поверхностного волновода для сушки объекта.

На рис. 2а схематично показан ход лучей, идущих от элемента антенной решетки. Из рис. 2б видно, что установка включает вибраторную решетку 1, состоящую из вибраторов 2, провод однопроводной линии передачи (ОЛП) 3, устройства возбуждения поверхностной волны 4, согласованную нагрузку 5, генератора СВЧ-колебаний 6 и зеркальный параболический проводящий цилиндр 7 (рефлектор).

Устройство возбуждения поверхностной волны [7] является трансформатором волн со структурой Т- в волну Е-типа.

Коллинеарная антенная решетка 1 расположена внутри зеркального параболического проводящего цилиндра 7. Антенная решетка, входящая в установку, состоит из одинаковых вибраторов 2, представляющих собой объемные тела с проводящими цилиндрическими поверхностями, надетыми на диэлектрическую поверхность провода 3 однопроводной линии передачи (линия Губо [8]). ОЛП оканчивается согласованной нагрузкой 5. Генератор СВЧ-колебаний (6), расположенный вне зеркального параболического проводящего цилиндра (на рис. 2 не показан), соединен с узлом возбуждения поверхностной волны 4.

Установка для концентрации энергии на поверхности функционирует следующим образом.

Сигнал с генератора СВЧ-колебаний 6 с помощью устройства возбуждения 4 возбуждает в проводе 3 поверхностную волну E_{00} . В находящихся на проводе вибраторах 2 антенной решетки 1 под действием продольной составляющей напряженности электрического поля волны E_{00} наводится электрический ток, в результате чего происходит излучение СВЧ-энергии.

Излучение, порождаемое вибраторами 2, распространяясь внутри объема параболического цилиндра, выходит параллельным пучком лучей (рис. 2). Следовательно, энергия, приходящаяся на единицу площади раскрытия зеркального параболического цилиндра (плотности энергии), будет одинаковой.

Степень возбуждения вибраторов определяется коэффициентом связи « K_i » поверхностной волны из расчета достижения равномерного по длине L распределения энергии переизлучаемого поля Т-типа, осуществляемого под действием продольной составляющей напряженности электрического поля:

$$K_i = \frac{P_i}{P},$$

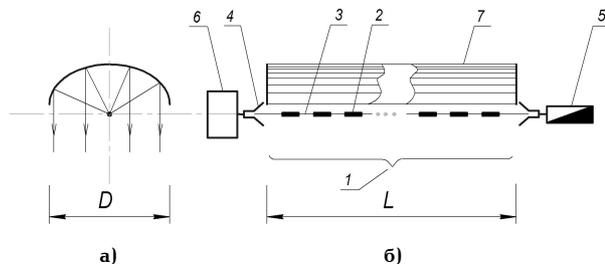


Рис. 2. Схема установки для концентрированного равномерного нагрева объектов СВЧ-излучением, а) ход лучей в раскрытии параболического цилиндра, б) структурная схема установки, где 1 — вибраторная решетка, 2 — вибратор, 3 — провод однопроводной линии передачи, 4 — устройство возбуждения, 5 — согласованная нагрузка, 6 — генератор, 7 — рефлектор

где P — мощность энергии СВЧ, переносимая поверхностной волной;

P_i — мощность энергии СВЧ, образованная поверхностной волной в i -том вибраторе рассматриваемой коллинеарной антенной решетки под действием продольной составляющей напряженности электрического поля [9].

Излучение коллинеарной антенной решетки, распространяясь внутри зеркального параболического цилиндра, отражается от поверхности параболоида и равномерно концентрируется на площади раскрытия параболического цилиндра S . Вибраторы, возбуждаемые под действием продольной составляющей напряженности электрического поля поверхностной волны E_{00} , в дальнейшем сами переизлучают электромагнитную энергию Т-структуры. Вся переизлученная СВЧ-энергия вибраторной решетки сосредоточена на площади раскрытия параболического цилиндра S , а оставшаяся (не переизлученная) СВЧ-энергия поступает на согласованную нагрузку 5.

Таким образом, вибраторная решетка, равномерно излучает СВЧ-энергию по всей длине L коллинеарной антенной решетки в ортогональной ОЛП плоскости, обеспечивая, концентрацию потока СВЧ-излучения на площади раскрытия зеркального параболического цилиндра S_p (рис. 2):

$$S_p = D L,$$

где D — диаметр раскрытия зеркального параболического проводящего цилиндра (рефлектора), L — длина коллинеарной антенной решетки.

Объект для поверхностного нагрева размещают в установке в области концентрации потока СВЧ-излучения.

Преимуществами установки на основе вибраторной решетки, размещенной на проводе поверхностного волновода и обеспечивающей концентрацию энергии СВЧ-излучения на поверхности (площади) объекта, являются:

— во-первых, достигается равномерное распределение плотности СВЧ-излучения в раскрытии зеркального параболического проводящего цилиндра, которая обусловлена размещением на фокальной оси коллинеарной антенной решетки излучателей;

— во-вторых, частичная электрическая замкнутость объема зеркального параболического проводящего цилиндра обеспечивает частичное экранирование процессов в объектах, находящихся внутри зеркального параболического цилиндра;

— в-третьих, происходит увеличение концентрации СВЧ-энергии на заданной поверхности (площади) S_p ;

— в четвертых, минимальные металлоемкость и стоимость установки.

Предложенная конструкция установки может быть использована не только для сушки древесины в деревообрабатывающем производстве, но и в сельском хозяйстве, а также для СВЧ-нагрева объектов, используемых в различных отраслях промышленности.

Первоначально оценим энергозатраты на сушку заданного объема конкретной древесины (ель), имеющей определенную начальную влажность W_n , которую надо довести до конечной влажности W_k в течение определенного времени t . Учитывая сложную зависимость энергозатрат от количества влаги диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и затухания энергии с глубиной, сначала следует ограничиться решением статической задачи. В дальнейшем, учитывая особенности установки, внесем соответствующие коррективы.

Найдем связь между подводимой мощностью P_0 временем экспозиции t и начальной влажностью древесины W_n . Прежде всего, определимся с частотой генератора, типом древесины, начальной и конечной влажностью.

Итак, подводимая мощность P_0 подается на устройство возбуждения поверхностной волны в проходе, связанном определенным образом с коллинеарной антенной решеткой. Допустим, потери мощности составят 5%. Учитывая, что большая часть установки экранирована, можно допустить, что потери малы и ими можно пренебречь. Тогда поток мощности в раскрыве параболического цилиндра будет

$$|P| = \frac{0,95P_0}{S_p} = \frac{0,95P_0}{D \cdot L}$$

где D — раскрыв параболы, L — длина антенной решетки.

Нагреваемый объект имеет площадь, на которую падает поток $|P|$, равную S_0 . Поэтому на объект падает поток в $D \cdot L/S_p$ раз меньший, т.е. $|P|_0 = \frac{0,95P_0S_0}{(D \cdot L)^2}$.

Поток $|P|_0$ порождает в объекте напряженность электрического поля E_0 , равную

$$\sqrt{|P|_0} \cdot \sqrt{Z} = E_0$$

и в объекте выделяется мощность, равная

$$P_A \approx \omega t g \delta \varepsilon V E_p^2,$$

где ω — круговая частота, V — объем объекта, ε — относительная диэлектрическая проницаемость, $t g \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь, E_p — напряженность электрического поля в объекте.

Выделяемая в объекте мощность приводит к тепловыделению Q , которое связано с теплоемкостью c , массой объекта m и разностью между начальной и конечной температурой нагрева ΔT . Поэтому имеет место равенство

$$Q = \frac{P_A}{t} = cm\Delta T.$$

Таким образом, уравнение

$$0,95P_0Z\omega t g \delta \varepsilon V h \left(\frac{S_0}{S_p} \right)^2 = cm\Delta T \cdot t$$

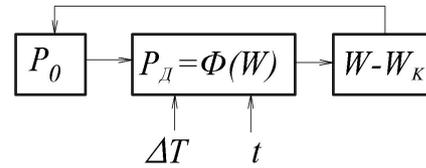


Рис. 3. Схема алгоритма процесса сушки объекта

связывает электродинамические и физические параметры с энергетикой и временем экспозиции. Что касается влажности, она в неявном виде скрыта в диэлектрической проницаемости и тангенсе угла диэлектрических потерь в виде несложных выражений.

Представленное уравнение параметрическое, т.к. $t g \delta$, ε , Z зависят от времени экспозиции и характер зависимости считать линейным нельзя. Указанные явления предстоит дополнительно исследовать теоретически и экспериментально.

Для примера проведем расчет требуемой мощности СВЧ генератора для нагрева древесины типа «ель» на $\Delta T = 60$ °C за время, равное 4 час. Частота колебаний $f = 915$ МГц. Объем древесины $V = (0,2 \times 0,9 \times 3) \text{ м}^3$. Начальная влажность $W_n = 40$ %, конечная $W_k = 8$ %. Положим, что относительная диэлектрическая проницаемость сухой древесины $\varepsilon = 4,2$, а влажной $\varepsilon = (8 \div 10)$, соответственно, удельная проводимость сухой древесины $\sigma = 10^{-3} \text{ См/м}$, а влажной $\sigma = 10^{-2} \text{ См/м}$. Удельная теплоемкость $c = 1,7 \text{ кДж/кг К}$.

$$A = \frac{cm\Delta T}{0,95Z\omega t g \delta \varepsilon h \left(\frac{S_0}{S_p} \right)^2},$$

$$P_0 = At, \text{ где}$$

где $\varepsilon \omega t g \delta = \sigma$ — удельная проводимость,

Z — волновое сопротивление облучаемого объекта,

$$Z = \frac{Z_0}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{120\pi}{3} \approx 125 \text{ Ом.}$$

$$P_0 \approx 10,5 \cdot 10^4 \text{ Вт}$$

Таким образом, при времени нагрева 4 часа доведение массы объекта до разности температур $\Delta T = 60$ °C потребуются $P_0 = 7,5$ кВт.

Далее потребуются испарить влагу в количестве, определяемой начальной и конечной влажностью. Теплота парообразования $Q_n = \lambda m$. Соответственно, требуемая мощность источника нагрева составит Q_n/t . Так как тепловыделение P_A поддерживается постоянно, то затраченное время определяется формулой

$$t_1 = \frac{Q_n}{P_A} = \frac{Q_n}{\sigma h \left(\frac{S_0}{S_p} \right)^2 0,95P_0Z}$$

Итак, проведенный расчет показывает, что энергетические затраты мало зависят от способа реализации сушки. Вместе с тем резервы экономии энергии есть. Они заключены в организации процесса сушки по некоторому критерию, который вводится в систему авторегулирования мощности и времени завершения сушки. Алгоритм сушки может быть записан в виде (рис. 3).

Процесс сушки завершается достижением конечного значения требуемой влажности W_k .

Дальнейшей задачей исследования является проведение натурного эксперимента на установке, в основе которой лежит предложенная конструкция.

Библиографический список

1. СВЧ плюс вакуум: от сложного к простому [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.svch-tecnologii.ru/HTML/lesprom04-10.pdf> (дата обращения: 07.10.2011).
2. Технологии сушки древесины [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.get-ground.ru/articles/1.php> (дата обращения: 07.10.2011).
3. Малогабаритная СВЧ сушилка для леса мод. «МС-2» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kodosagregat.ru/z12st4.htm> (дата обращения: 19.08.2011).
4. Дударев, А. В. Разработка опытной установки СВЧ-сушки древесины / А. В. Дударев, Д. В. Риттер [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://conf.omg.tu.ru/node/20> (дата обращения: 09.09.2011).
5. Пат. 2118874 Российская Федерация, МПК Н 01 О 21/00. Вибраторная решетка [Текст] / Кисмерешкин В. П., Лобова Г. Н.; заявитель и патентообладатель Опытно-конструкторское бюро «Иртыш». — № 94020606/09; заявл. 02.06.1994; опубл. 10.09.1998, Бюл. № 25. — 6 с.
6. Кисмерешкин, В. П. Об использовании открытых линий передачи в антенной технике / В. П. Кисмерешкин, Г. Н. Лобова // Антенно-фидерные устройства, системы и средства

радиосвязи : сб. тр. 3-й Межд. науч.-техн. конф. — Воронеж, 1997. — Т. 2. — С. 290—300.

7. Пат. 2144720 Российская Федерация, МПК Н 01 Q 9/00, Н 01 Q 9/44. Устройство возбуждения поверхностной волны [Текст] / Кисмерешкин В. П., Лобова Г. Н. — № 98118738/09; заявл. 12.10.1998; опубл. 20.01.2000, Бюл. № 2. — 12 с.
8. Ефимов, И. Е. Радиочастотные линии передачи / И. Е. Ефимов. — М. : Сов. Радио, 1964. — 600 с.
9. Кисмерешкин, В. П. Моделирование линейной антенной решетки на основе однопроводной линии передачи / В. П. Кисмерешкин, Г. Н. Лобова // Приборы и техника эксперимента. — 1996. — № 5. — С. 85—86.

КИСМЕРЕШКИН Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Средства связи и информационная безопасность».

ЛОБОВА Галина Николаевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Средства связи и информационная безопасность».

КОСТОЧКИНА Надежда Анатольевна, аспирантка кафедры «Средства связи и информационная безопасность».

Адрес для переписки: lobova_galina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10.11.2011 г.

© В. П. Кисмерешкин, Г. Н. Лобова, Н. А. Косточкина

Книжная полка

Справочник по вакуумной технике и технологиям / Под ред. Д. Хоффман, Б.Сингха, Дж.Томаса III : пер. с англ. — М. : Техносфера, 2011. — 736 с. — ISBN 978-5-94836-294-6.

Предлагаемый справочник по вакуумной технике и технологиям является переводом книги, созданной американскими специалистами. В справочнике приведены фундаментальные положения технологии вакуума и физики поверхности, рассмотрены конструкции различных типов насосов и средств измерения вакуума и течеискания. Подробно описаны различные вакуумные системы и технологии. Приведены примеры применения вакуумной техники. Большое внимание в справочнике уделено описанию технологии получения и поддержания безмасляного вакуума. Справочник содержит значительный объем экспериментальных данных, необходимых при проектировании и эксплуатации специального вакуумного технологического оборудования. Справочник является прекрасным дополнением к отечественным изданиям и будет полезен для инженерно-технических работников и специалистов, занимающихся конструированием, изготовлением и эксплуатацией вакуумных систем, а также для студентов и аспирантов технических вузов.

Торопкин, М. В. Как создать ламповый усилитель своими руками : Руководство / М. В. Торопкин, Д. А. Андреев. — М. : Наука и техника, 2012. — 288 с. — ISBN 978-5-94387-856-5.

Книга поможет читателю собрать свой первый Hi-Fi ламповый усилитель. Начальные главы являются современным справочником по электронным лампам, применяемым в аппаратуре высококачественного звукоусиления. Это подробное руководство по конструированию усилительных каскадов, сопровождаемое обзором наиболее интересных схемотехнических решений. Интересны методики расчета и создания готовых конструкций выходных трансформаторов. Ряд трансформаторов разработан и воплощен в опытных образцах с последующим тестированием специально для читателей этой книги (публикуется впервые)! Тем, кто решил приобрести готовый усилитель или сравнить характеристики моделей заводского изготовления, будет интересен обзор рынка ламповых Hi-Fi усилителей. Материал поможет сделать правильный выбор при покупке. А «Обзор ресурсов Интернет по ламповой Hi-Fi усилительной технике» позволит существенно расширить кругозор читателей в области ламповой схемотехники и помочь в поиске специальной информации в сети Интернет. Книга предназначена для широкого круга радиолюбителей.

621.317.7/Ч-46

Чередов, А. И. Первичные измерительные преобразователи : учеб. пособие / А. И. Чередов, А. В. Щелканов ; ОмГТУ. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — 90 с. — ISBN 978-5-8149-0989-3.

Рассмотрены основные характеристики, физические основы некоторых видов первичных измерительных преобразователей различных физических величин (ПИП). Приведены основные характеристики некоторых отечественных и зарубежных ПИП.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ СВЕРХВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА ЗДОРОВЬЕ РАБОТАЮЩИХ

При обследовании работников трех предприятий Омской области, где имеются рабочие места с источниками электромагнитных излучений сверхвысокой частоты (СВЧ), было выявлено увеличение частоты простудных заболеваний, аллергических ринитов и функциональных расстройств со стороны сердечно-сосудистой системы. У рабочих отмечались головные боли, нарушения со стороны органов зрения, регистрировались проблемы со стороны желудочно-кишечного тракта, мочевыделительной и опорно-двигательной систем, чаще встречались изменения со стороны щитовидной железы. Полученные результаты показывают необходимость проведения дальнейших исследований.

Ключевые слова: промышленные источники излучений, электромагнитные излучения сверхвысокой частоты, обследование работников, состояния здоровья, негативные последствия.

Известно, что производственные условия влияют на здоровье работающих. Негативное воздействие производственных факторов и прогнозируемый ущерб здоровью работников зависят от их фактических величин. В современных условиях для оценки условий труда на рабочих местах используется система гигиенических критериев [1], которая основывается на сравнении фактически измеренных величин производственных факторов с ПДУ.

Результаты аттестации рабочих мест по условиям труда, которая в обязательном порядке должна проводиться во всех организациях, а также результаты производственного контроля условий труда, позволяют получить объективное представление об условиях труда и дать количественную оценку воздействия вредных и опасных производственных факторов на здоровье работников предприятий различных видов экономической деятельности.

Одним из малоизученных факторов, несомненно оказывающих влияние на здоровье работающих, является неионизирующее излучение. В многочисленных работах Международной Комиссии по радиологической защите, Международной Федерации Ассоциаций специалистов по технике безопасности и гигиене труда и Международной Ассоциации по инспекции труда, посвященных данной проблеме, приводятся сведения о вредном воздействии электромагнитных излучений. Однако негативное влияние на работающих неионизирующих излучений радиочастотного диапазона 300 МГц — 30 ГГц требует дальнейшего исследования.

В данной работе рассматриваются вопросы оценки воздействия на работающих неионизирующих излучений радиочастотного диапазона 300 МГц — 30 ГГц. Исследование проводилось в 2005 — 2010 годы на предприятиях Омской области, где имеются ра-

бочие места с источниками электромагнитных излучений сверхвысокой частоты (СВЧ).

При работе с СВЧ используются различные защитные мероприятия: защитные экраны, защита временем, защита расстоянием, дополнительный отпуск, периодические медицинские осмотры. Однако, несмотря на принимаемые организационно-технические меры, работники подвергаются вредному воздействию СВЧ.

Целью работы явилось исследование влияния малых доз электромагнитных излучений сверхвысокой частоты на здоровье работающих.

Для этого на исследуемых рабочих местах проводились измерения плотности потока энергии электромагнитных полей (ЭМП). Измерения проводились измерителем уровней электромагнитных излучений ПЗ-41 на 3-х уровнях от поверхности пола с учетом рабочей позы: 0,5 м, 1,0 м и 1,4 м — при рабочей позе сидя; 0,5 м, 1,0 м и 1,7 м — при рабочей позе стоя, с учетом всех требований к проведению контроля уровней электромагнитных полей на рабочих местах [2]. Рассчитав энергетические экспозиции ЭМП диапазона частот 300 МГц — 30 ГГц (ЭЭппэ), определили вероятность ущерба для здоровья работающих, сравнив фактические экспозиции с ПДУ.

На рабочих местах, где фактическая ЭЭппэ превышает ПДУ, условия труда характеризуются как вредные, а там, где фактическая ЭЭппэ меньше ПДУ, условия труда характеризуются как допустимые [1]. Результаты представлены на рис. 1.

Из рисунка видно, что 2 % работающих подвергаются вредному воздействию излучений СВЧ. Для них ущерб здоровью очевиден. У этой категории работников вероятно возникновение профессионального заболевания, которое в официальной медицинской документации классифицируется как «по-

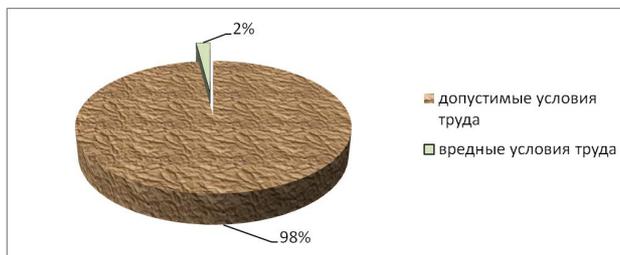


Рис. 1. Доля рабочих мест с вредными условиями труда при воздействии СВЧ

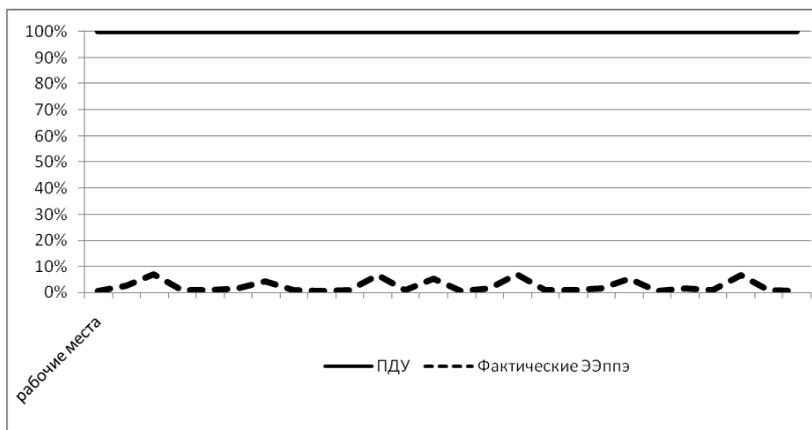


Рис. 2. Фактические экспозиции (ЭЭппэ) для наиболее типичных исследуемых рабочих мест (РМ) в сравнении с ПДУ

следствия острого и хронического воздействия СВЧ-поля». Причем различают 5 синдромов в клинике последствий СВЧ-облучения: вегетативный, диэнцефальный, астенический, астеновегетативный и ангиодистонический.

Для остальной группы работников (98 %) ущерб, наносимый здоровью, может носить только негативный характер. Как, например, в случае присутствия в воздухе рабочей зоны вредных веществ, концентрация которых не превышает ПДК.

Анализ результатов исследования показал, что в большинстве случаев величина фактических энергетических экспозиций даже несоизмерима с величиной ПДУ, то есть на порядок ниже (рис. 2).

Из рисунка видно, что фактические уровни ЭЭппэ на рабочих местах, где не выявлены превышения по отношению к ПДУ, составляют не более 0,1 ПДУ. Такие рабочие места, опираясь на фактические результаты измерений, мы разделили на 3 группы: РМ с уровнями ЭЭппэ $\leq 0,005$ ПДУ, с уровнями ЭЭппэ $\leq 0,03$ ПДУ, с уровнями ЭЭппэ $\leq 0,1$ ПДУ. Доли рабочих мест, относящихся к различным группам уровней энергетических экспозиций, представлены на рис. 3.

Причиной проведенного анализа явилось предположение, что воздействие излучений СВЧ на работников исследуемых организаций таких незначительных уровней, не оказывает необратимого воздействия на их здоровье. Наносимый ущерб здоровью имеет скорее психологическую подоплеку. «Если на меня действует излучения СВЧ, значит, я буду болеть», «Я плохо себя чувствую из-за того, что у меня на рабочем месте есть источник излучения СВЧ».

Наблюдаемый контингент включал представителей обоих полов (в большинстве своем мужчины), в возрасте от 21 года до 77 лет, со стажем работы в условиях воздействия СВЧ от года до 35 лет. Из рисунка видно, что в основном (62 %) уровни электро-

магнитных излучений СВЧ ничтожно малы. И вероятно не могут оказывать какого-либо значимого влияния на здоровье работников данной категории.

Однако работники в своем большинстве высказывают серьезные опасения по поводу своего здоровья. Они жалуются на плохое самочувствие во время работы, на головные боли, головокружение, ухудшение зрения, указывают на постоянную потребность в медикаментах и прочее. Результаты медицинских осмотров, которым подвергаются такие работники с периодичностью 1 раз в 2 года, как правило, их не удовлетворяют. Хотя результаты периодических медицинских осмотров не вызывают каких-либо опасений, связанных с ухудшением здоровья работников под воздействием СВЧ.

Необходимо отметить, что для однозначного научно обоснованного опровержения данных субъективных симптомов необходимы длительные медицинские наблюдения в небольшом объеме, чем требуют нормативные документы [3]. Дополнительно к осмотру терапевта, невропатолога и окулиста необходимо осматривать работников кардиологом, эндокринологом, а лабораторные исследования дополнить развернутым анализом крови [4]. Для контроля изменения массы тела в течение рабочей смены необходимо предусмотреть взвешивание работников в начале и в конце рабочего дня. Если анализировать эти данные по стажу работы, сравнивать результаты с паспортом здоровья этих работников, а также соотносить их с показаниями работников подобных работ, только без СВЧ, то можно, учитывая механизм биологического действия, утверждать о степени вредности воздействия СВЧ таких незначительных уровней на организм работников.

Известно, что эффект воздействия СВЧ-поля на биологические объекты определяется количеством проникающей в них и поглощаемой ими

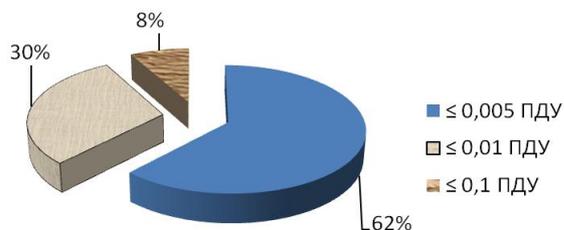


Рис. 3. Доля рабочих мест с низкими уровнями энергетических экспозиций

электромагнитной энергии. Значительная часть энергии микроволн поглощается тканями организма и превращается в тепло, что объясняют возникновением колебания ионов и дипольных молекул воды, содержащихся в тканях. Наиболее эффективное поглощение микроволн отмечается в тканях с большим содержанием воды: кровь, тканевая жидкость, слизистая желудка, кишок, хрусталик глаза и др. Механизмы нетеплового или специфического действия СВЧ-излучения связаны с кооперативными процессами, основанными на резонансных взаимодействиях биологических макромолекул (биологические молекулы, входящие в состав мембраны); с синхронизацией существующих в норме несфазированных колебаний множества осцилляторов живой клетки (например, колебания гемма в молекуле гемоглобина эритроцита или колебания молекул в мембране) или с полярной перестройкой биомолекул, способной дать на резонансной частоте колебания большой амплитуды за счет перекачки энергии.

Точкой приложения СВЧ-излучения, как патогенного фактора, является система регуляции, что проявляется угнетением и истощением процессов нервной и эндокринной регуляции; сдвигами в обмене веществ, угнетением синтетических процессов; снижением неспецифической резистентности организма, ослаблением иммунных процессов; снижением адаптации к факторам окружающей среды. Следствием перечисленного будут: повышение заболеваемости, преморбитные состояния, отягощение имеющихся хронических заболеваний, функциональные расстройства сердечно-сосудистой и кровяной систем, невротические расстройства, нарушения гормонального баланса, преждевременное старение организма и т.д.

Между тем в процессе беседы с работниками исследуемых рабочих мест у нас сложилось мнение, что влияние на их здоровье в большей степени оказывают не действующие электромагнитные излучения, а субъективное психологическое убеждение о вредном воздействии на них СВЧ. Поэтому мы провели анкетирование на предмет «субъективной оценки здоровья» работников по методу [5] в нашей модификации, анкета включала 43 вопроса с выбором одного из пяти вариантов ответа.

Были опрошены две категории работников, занятых на схожих работах, но находящихся в разных отделах тех же организаций. Первая категория — работники, на которых воздействуют СВЧ, вторая категория — без СВЧ. Группы обследованных были сопоставлены по возрасту и стажу работы.

Оценка ответов и их соотношение позволили нам выделить наиболее показательные результаты анкетирования работников. Вероятные последствия можно объединить в группы, представленные в табл. 1.

Как показали наши исследования, в группе работников, подвергнутых воздействию СВЧ, в 3,6 раза

Таблица 1

Результаты анкетирования
«Субъективная оценка здоровья»

Вероятные последствия воздействия СВЧ	Положительные ответы, %	
	работников с источниками излучений СВЧ	работников без источников излучений СВЧ
Заболевания простудного характера	17,9	5
Аллергический ринит	42,9	35
Расстройства сердечно-сосудистой системы	53,6	45
Различия нервно-психического состояния	65	64,3
Головные боли	50	35
Проблемы со зрением	71,4	55
Проблемы желудочно-кишечного тракта	39,3	20
Проблемы мочевыделительной системы	46,4	35
Проблемы опорно-двигательного аппарата	46,4	20
Изменения со стороны щитовидной железы	53,6	20

чаще встречались простудные заболевания, в 1,2 раза — аллергический ринит. Функциональные расстройства со стороны сердечно-сосудистой системы отмечались чаще в 1,2 раза. Однако различий со стороны нервно-психического состояния (усталость и ухудшение самочувствия к концу рабочего дня, раздражительность, эмоциональная неустойчивость, снижение работоспособности, сонливость, нарушение сна, тревожность) нами обнаружено не было. Между тем у рабочих первой группы в 1,5 раза чаще отмечались головные боли. Нарушения со стороны органов зрения также были в 1,3 раза выше. Кроме того, чаще отмечались проблемы со стороны желудочно-кишечного тракта — в 2 раза, мочевыделительной системы — в 1,3 раза и опорно-двигательной системы — в 2,3 раза. В 2,7 раза чаще встречались изменения со стороны щитовидной железы.

Таким образом, результаты анкетирования доказывают наличие проблемы несоответствия субъективной оценки здоровья работников, работающих с источниками СВЧ, и объективной оценки влияния электромагнитных излучений СВЧ, полученной в результате проведения измерений.

Для решения данной проблемы становится очевидной необходимость оценки состояния здоровья работников данных предприятий с помощью регулярных медицинских обследований. Такая оценка возможна, например, при анализе результатов развернутого анализа крови.

Проведенная работа позволила выделить наиболее уязвимые органы и системы организма работников, на которые негативно влияют источники СВЧ-излучений. Основные результаты представлены на рис. 4.

На основании вышеизложенного, можно заключить, что воздействие на работников даже незначительных уровней СВЧ оказывает негативное влияние на их здоровье.

Результаты проведенной работы позволили сделать следующие выводы:

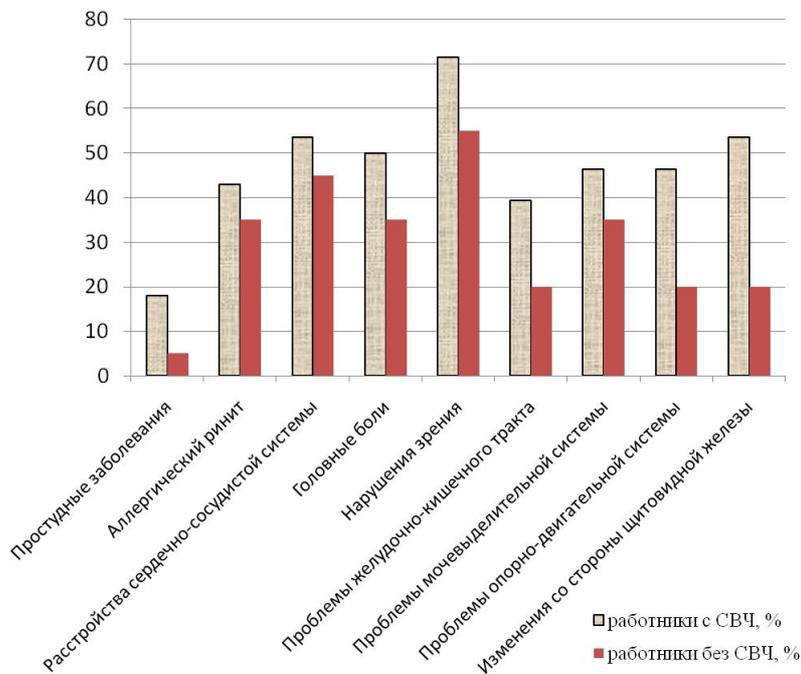


Рис. 4. Вероятные профзаболевания работников исследуемых предприятий

1. Работа с источниками излучения СВЧ влияет на здоровье работников.

2. Выявленный ущерб, наносимый здоровью работников, зависит от диапазона частот и, самое главное, от фактического уровня электромагнитных излучений.

3. Ущерб здоровью работающих с источниками излучения СВЧ носит не только физический (объективный) характер, но и психологический (субъективный).

Между тем сравнительно малый объем исследуемых рабочих мест не позволяет нам утверждать об однозначности полученных выводов, однако результаты исследований, по нашему мнению, являются основанием для проведения масштабной научной работы.

Библиографический список

1. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда [Текст] : Р 2.2.2006-05 : утв. Руководителем Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации Г.Г. Онищенко 29.07.2005. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=85537> (дата обращения: 30.11.2011).

2. Физические факторы производственной среды. Электромагнитные поля в производственных условиях [Текст] : СанПиН 2.2.4.1191-03 : утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации, первым заместителем министра здравоохранения Российской Федерации Г.Г. Онищенко 30.01.2003. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php> (дата обращения: 30.11.2011).

3. Об утверждении перечней вредных и (или) опасных производственных факторов и работ, при выполнении которых проводятся предварительные и периодические медицинские осмотры (обследования), и Порядка проведения этих осмотров (обследований) [Текст] : Приказ Минздравсоцразвития РФ от 16.08.2004 N 83 (ред. от 16.05.2005) / М-во юстиции Рос. Федерации — РФ 10.09.2004 N 6015. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=53855> (дата обращения: 30.11.2011).

4. О порядке проведения предварительных и периодических медицинских осмотров работников и медицинских регламентах допуска к профессии [Текст] : Приказ Минздравмедпрома России от 14.03.96 № 90 в ред. Приказов Минздрава России от 11.09.2000 № 344, от 06.02.2001 № 23. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kadrovik.ru/docs/pr.minzdrav.medproma.14.03.96n90.htm> (дата обращения: 30.11.2011).

5. Руководство к практическим занятиям по нормальной физиологии [Текст] / Н. Н. Алипов, [и др.] ; под ред. С. М. Бурдылиной, В. М. Смирнова. — М. : Академия, 2005. — 336 с.

СЕРДЮК Виталий Степанович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности».

БАКИКО Елена Владимировна, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности».

ЗУЕВА Ольга Михайловна, доктор медицинских наук, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности».

КОНЬШИН Дмитрий Владимирович, доцент (Россия), кандидат технических наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности».

Адрес для переписки : bakiko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.12.2011 г.

© В. С. Сердюк, Е. В. Бакико, О. М. Зуева, Д. В. Коньшин

ПРИМЕНЕНИЕ КВАТЕРНИОНОВ В ЗАДАЧАХ НАВЕДЕНИЯ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РЕТРАНСЛЯТОРА СВЯЗИ НА БЕСПИЛОТНОМ ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ

В статье рассматривается подход к применению математического аппарата кватернионов для управления лучом антенной системы с электрическим сканированием. Описаны основные этапы расчета параметров наведения. С целью снижения ошибки наведения антенной системы ретранслятора связи разработана модель прогнозного движения беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, ретранслятор связи, антенная система, луч, параметры наведения, кватернион, прогнозирование.

Введение

Рассматривается система радиосвязи, состоящая из двух наземных станций (НС) и ретранслятора связи (РС) на беспилотном летательном аппарате (БЛА) вертолетного типа, находящегося на режиме висения. На РС установлены узконаправленные АС с управляемой характеристикой направленности, в качестве которых используются фазированные антенные решетки (ФАР). Команды управления формируются по сигналам бортового навигационного комплекса (БНК). Для уменьшения ошибки наведения, обусловленной дискретностью выдачи навигационных показаний, выполняется прогнозирование пространственного перемещения БЛА. Краткое описание системы представлено в [1–3].

В процессе функционирования рассматриваемой системы в направлениях на НС поддерживается требуемое значение характеристики направленности АС РС. Данный процесс требует постоянного пересчета параметров наведения, под которыми понимаются углы, определяющие ориентацию луча ФАР в системе координат АС. Так как бортовые вычислители обладают ограниченными ресурсами, то методы математического анализа и численного решения, используемые для определения параметров наведения, должны обладать минимальной вычислительной сложностью.

Выбор кинематических параметров

При определении параметров наведения АС РС на БЛА выполняется преобразование между системами координат, угловое расположение между которыми может задаваться различными кинематическими параметрами.

В задачах наведения антенн спутниковой связи в качестве кинематических параметров широко используются направляющие косинусы [4], являющиеся наиболее общим способом задания ортогонального преобразования, но присутствие тригонометрических функций осложняет аналитическое и численное (особенно на бортовых вычислителях) решение задач по расчету параметров наведения.

В качестве кинематических параметров предлагается использовать параметры Эйлера (Родрига-Гамильтона), позволяющие повысить эффективность аналитического исследования и численного решения многих задач динамики и управления угловым движением твердого тела, при этом удобным математическим аппаратом являются кватернионы [5, 6].

Кватернионные методы механики твердого тела относятся к современным методам теоретической механики, успешно развивающимся в последние годы и нашедшим эффективное применение также в задачах навигации, управления движением, механики космического полета и т.д.

Краткая теория кватернионов

Кватернион — четырехмерное число, составленное из одной действительной единицы 1 и трех векторных мнимых единиц Гамильтона i_1, i_2, i_3 с действительными элементами q_0, q_1, q_2, q_3 следующего вида:

$$Q = (q_0, q_1, q_2, q_3) = q_0 1 + q_1 i_1 + q_2 i_2 + q_3 i_3. \quad (1)$$

В тригонометрической форме кватернион (1) может быть представлен в виде:

$$Q = |Q| (\cos \vartheta + \bar{\xi} \sin \vartheta), \quad (2)$$

где $|Q| = \sqrt{\|Q\|}$ — модуль кватерниона, $\|Q\| = q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2$ — норма кватерниона; ϑ — угол вращения, $\bar{\xi}$ — единичный вектор, вокруг которого осуществляется вращение.

Представление (2) позволяет получить наглядную геометрическую интерпретацию кватерниона (рис. 1), согласно которой каждому нормированному кватерниону ($\|Q\| = 1$) может быть поставлена дуга $\text{arcs } Q$ большого круга, плоскость которого определяется вектором $\bar{\xi}$, а длина дуги — углом ϑ . Направление дуги задано направлением вектора $\bar{\xi}$, а ее положение на круге произвольно.

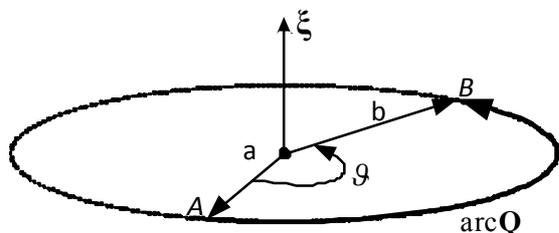


Рис. 1. Представление кватерниона на сфере

Представление кватерниона (1) в тригонометрической форме (2) удобно тем, что позволяет легко найти корни уравнения $Q^n = P$ согласно формуле Муавра:

$$Q^n = |Q|^n (\cos n\vartheta + \bar{\xi} \sin n\vartheta). \quad (3)$$

Выражение (3) позволяет разбить один поворот, заданный дугой $\arcs P$, на n поворотов, заданных дугой $\arcs Q$.

Алгебра кватернионов позволяет представить преобразование координат в пространстве в простой и удобной форме:

$$\vec{L}' = Q \circ \vec{L} \circ \bar{Q}, \quad (4)$$

где $\vec{L} = x_1 i_1 + y_1 i_2 + z_1 i_3$ — координаты точки в исходной системе координат; $\vec{L}' = x'_1 i_1 + y'_1 i_2 + z'_1 i_3$ — координаты после преобразования; \circ — знак кватернионного умножения; Q — нормированный кватернион, двойной угол вращения которого определяет взаимное расположение двух систем координат; $\bar{Q} = q_0 1 - q_1 i_1 - q_2 i_2 - q_3 i_3$ — кватернион, сопряженный кватерниону Q .

Математический аппарат кватернион более подробно описан в [5, 6].

Постановка задачи

Исходными данными являются координаты (долгота, широта и высота) размещения НС и БПЛА. Ориентация АС (углы бокового отклонения, подъема и вращения) в системе координат БПЛА задается в исходных данных или определяется исходя из координат размещения НС и РС. Наблюдаемыми параметрами, характеризующими пространственную неустойчивость БПЛА, являются показания БНК (крен, тангаж, рыскание и скорости их изменения). В качестве условий задано, что наблюдаемые параметры поступают с определенной частотой.

Для уменьшения ошибки наведения, вызванной получением наблюдаемых параметров через дискретные промежутки времени, необходимо разработать модель прогнозного движения БПЛА, позволяющую рассчитать траектории движения лучей ФАР до получения очередных показаний БНК по результатам прогнозирования пространственного перемещения БПЛА.

На основании исходных данных, наблюдаемых параметров, результатов прогнозирования необходимо разработать модель определения параметров наведения АС РС через кинематические параметры Эйлера (Родрига-Гамильтона) используя математический аппарат кватернионов.

Модель прогнозного движения

Прогнозирование пространственного положения БПЛА позволяет определить кватернион поворота при получении показаний БНК на один шаг вперед. В качестве ограничений установлено, что на участке выдачи показаний БНК скорость и направление вращения БПЛА изменяются незначительно и их изменением можно пренебречь.

1. Геометрическому сложению дуг на сфере (рис. 2а) соответствует дуга представляющая произведение кватернионов в обратном порядке [5]:

$$\arcs Q_{t_{i+1}} = \arcs Q_{t_i} + \arcs \Delta Q = \arcs(\Delta Q \circ Q_{t_i}). \quad (5)$$

Учитывая свойства алгебры кватернионов, кватернион поворота ΔQ БПЛА из текущего состояния Q_{t_i} в прогнозируемое $Q_{t_{i+1}}$ при соблюдении условия нормировки ($\|Q\| = 1$) определяется выражением [5]:

$$\Delta Q = Q_{t_{i+1}} \circ \bar{Q}_{t_i}. \quad (6)$$

2. В результате преобразования в тригонометрическую форму (2) определяется угол конечного поворота ϑ , изменение которого по времени t позволяет получить интерполяционную формулу кватерниона прогнозного движения на интервале выдачи показаний T при непрерывном управлении наведением АС:

$$\Delta Q(t) = \cos\left(\frac{\vartheta}{T}t\right) + \bar{\xi} \sin\left(\frac{\vartheta}{T}t\right). \quad (7)$$

3. При дискретном управлении наведением АС поворот разбивается на n участков (рис. 2б), а кватернион единичного поворота ΔQ_0 определяется как:

$$\Delta Q_0 = \cos\left(\frac{\vartheta}{n}\right) + \bar{\xi} \sin\left(\frac{\vartheta}{n}\right). \quad (8)$$

Кватернион текущего положения БПЛА каждым шагом управления на интервале выдачи показаний определяется выражениями:

$$\begin{cases} Q_{t_i+\tau} = \Delta Q_0 \circ Q_{t_i}; \\ Q_{t_i+2\tau} = \Delta Q_0 \circ \Delta Q_0 \circ Q_{t_i} = \Delta Q_0 \circ Q_{t_i+2\tau}; \\ \dots \\ Q_{t_i+(n-1)\tau} = \underbrace{\Delta Q_0 \circ \dots \circ \Delta Q_0}_{n-1} \circ Q_{t_i} = \Delta Q_0 \circ Q_{t_i+(n-2)\tau}; \\ Q_{t_i+n\tau} = Q_{t_i}; \end{cases} \quad (9)$$

где τ — продолжительность шага управления.

Учитывая свойства ассоциативности кватернионного умножения, система (9) преобразована к рекуррентной форме, позволяющей определить кватернион текущего положения БПЛА $Q_{t_i+j\tau}$ на j -ом шаге управления в течение интервала выдачи показаний:

$$Q_{t_i+j\tau} = \Delta Q_0 \circ Q_{t_i+(j-1)\tau}, \text{ при } j = 1 \dots (n-1). \quad (10)$$

Полученные в выражениях (7) и (10) значения кватернионов текущего положения БПЛА $\Delta Q(t)$ и Q_{t_i+j} используются в работе модели определения параметров наведения при непрерывном и дискретном управлении лучом ФАР.

Модель определения параметров наведения

1. Преобразование географических координат НС ($\mu_{нс}, \theta_{нс}, H_{нс}$) и БПЛА ($\mu_{ла}, \theta_{ла}, H_{ла}$) из сферической системы координат в прямоугольную ($\vec{L}_{нс}$ и $\vec{L}_{ла}$ соответственно) задается выражениями:

$$\vec{L} = \begin{cases} x = (R + H) \cdot \cos \mu \cdot \cos \theta; \\ y = (R + H) \cdot \cos \mu \cdot \sin \theta; \\ z = (R + H) \cdot \sin \theta; \end{cases} \quad (11)$$

где $\vec{L} = x i_1 + y i_2 + z i_3$ — трехмерный вектор прямоугольных координат; R — радиус сферы земной поверхности; μ, θ, H — долгота, широта и высота.

2. Кватернион поворота $Q_{\lambda a}$, задающий направление на БПЛА, определяет преобразованием углов Эйлера в компоненты кватерниона [6]:

$$Q_{\lambda a} = \begin{cases} q_0 = \cos \frac{\theta_{\lambda a}}{2} \cos \frac{\mu_{\lambda a} + \alpha_{\lambda a}}{2}; \\ q_1 = \sin \frac{\theta_{\lambda a}}{2} \cos \frac{\mu_{\lambda a} - \alpha_{\lambda a}}{2}; \\ q_2 = \sin \frac{\theta_{\lambda a}}{2} \sin \frac{\mu_{\lambda a} - \alpha_{\lambda a}}{2}; \\ q_3 = \cos \frac{\theta_{\lambda a}}{2} \sin \frac{\mu_{\lambda a} + \alpha_{\lambda a}}{2}. \end{cases} \quad (12)$$

где $\theta_{\lambda a}, \mu_{\lambda a}$ — географические координаты БПЛА (широта и долгота); $\alpha_{\lambda a}$ — курс БПЛА.

3. Преобразование координат НС в систему координат БПЛА в кватернионной форме, согласно (4) и (12) задается выражением:

$$\vec{L}'_{\text{НС}} = Q_{\lambda a} \circ (\vec{L}_{\text{НС}} - \vec{L}_{\lambda a}) \circ \bar{Q}_{\lambda a}, \quad (13)$$

где $\vec{L}'_{\text{НС}} = x'_{\text{НС}} i_1 + y'_{\text{НС}} i_2 + z'_{\text{НС}} i_3$ — вектор, определяющий точку размещения НС в системе координат БПЛА.

4. Направление на НС в системе координат БПЛА задается углами ориентации АС (углы подъема $\psi'_{\text{П}}$, бокового отклонения $\psi'_{\text{б}}$ и вращения $\psi'_{\text{в}}$), определяемых выражениями:

$$\begin{cases} \psi'_{\text{П}} = \arcsin \frac{y'_{\text{НС}}}{\sqrt{x'^2_{\text{НС}} + y'^2_{\text{НС}} + z'^2_{\text{НС}}}}; \\ \psi'_{\text{б}} = \arctan \frac{-z'_{\text{НС}}}{x'_{\text{НС}}}; \quad \psi'_{\text{в}} = \arctan \frac{y'_{\text{НС}}}{z'_{\text{НС}}}. \end{cases} \quad (14)$$

5. Кватернион $Q'_{\text{ас}}$, задающий поворот АС РС в направлении на НС в системе координат БПЛА, определяется преобразованием углов Крылова (14) в компоненты кватерниона [6]:

$$Q'_{\text{ас}} = \begin{cases} q_0 = \cos \frac{\psi'_{\text{П}}}{2} \cos \frac{\psi'_{\text{б}}}{2} \cos \frac{\psi'_{\text{в}}}{2} - \\ \quad - \sin \frac{\psi'_{\text{П}}}{2} \sin \frac{\psi'_{\text{б}}}{2} \sin \frac{\psi'_{\text{в}}}{2}; \\ q_1 = \sin \frac{\psi'_{\text{П}}}{2} \sin \frac{\psi'_{\text{б}}}{2} \cos \frac{\psi'_{\text{в}}}{2} + \\ \quad + \cos \frac{\psi'_{\text{П}}}{2} \cos \frac{\psi'_{\text{б}}}{2} \sin \frac{\psi'_{\text{в}}}{2}; \\ q_2 = \sin \frac{\psi'_{\text{П}}}{2} \cos \frac{\psi'_{\text{б}}}{2} \cos \frac{\psi'_{\text{в}}}{2} + \\ \quad + \cos \frac{\psi'_{\text{П}}}{2} \sin \frac{\psi'_{\text{б}}}{2} \sin \frac{\psi'_{\text{в}}}{2}; \\ q_3 = \cos \frac{\psi'_{\text{П}}}{2} \sin \frac{\psi'_{\text{б}}}{2} \cos \frac{\psi'_{\text{в}}}{2} - \\ \quad - \sin \frac{\psi'_{\text{П}}}{2} \cos \frac{\psi'_{\text{б}}}{2} \sin \frac{\psi'_{\text{в}}}{2}. \end{cases} \quad (15)$$

Ориентация АС может не совпадать с направлением на НС, тогда кватернион ориентации АС РС

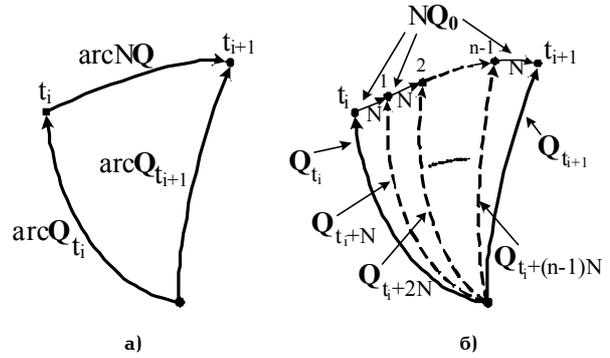


Рис. 2. Геометрическая интерпретация кватерниона прогнозируемого поворота БПЛА (а) и его разбиения на единичные повороты (б)

$Q'_{\text{ас}}$ определяется согласно выражению (15) исходя из заданных углов ориентации $\psi'_{\text{П}}, \psi'_{\text{б}}, \psi'_{\text{в}}$.

6. Отклонение БПЛА от заданного положения (пространственная нестабильность) определяется углами рыскания $\Delta\psi$, тангажа $\Delta\upsilon$ и крена $\Delta\phi$. Кватернион $\Delta Q'_{\lambda a}$, описывающий перемещение БПЛА, определяется преобразованием углов Крылова в компоненты кватерниона согласно выражению (15), при этом вместо углов $\psi'_{\text{б}}, \psi'_{\text{П}}, \psi'_{\text{в}}$ используются углы $\Delta\psi, \Delta\upsilon, \Delta\phi$ соответственно.

7. Кватернион поворота $Q''_{\text{пн}}$, задающий направление на НС в результате поворота АС $Q'_{\text{ас}}$ и вращения БПЛА $\Delta Q'_{\lambda a}$, определяется произведением соответствующих кватернионов в обратном порядке [5]:

$$Q''_{\text{пн}} = \Delta Q'_{\lambda a} \circ Q'_{\text{ас}}. \quad (16)$$

Преобразование точки наведения луча ФАР в систему координат АС с учетом поворота БПЛА и АС (16) осуществляется аналогично выражению (11):

$$\vec{L}''_{\text{НС}} = Q''_{\text{пн}} \circ \vec{L}'_{\text{НС}} \circ \bar{Q}''_{\text{пн}}, \quad (17)$$

где $\vec{L}''_{\text{НС}} = x''_{\text{НС}} i_1 + y''_{\text{НС}} i_2 + z''_{\text{НС}} i_3$ — вектор, определяющий точку размещения НС в системе координат АС.

8. Параметры наведения луча ФАР (углы отклонения по горизонтали θ_x и вертикали θ_y) в системе координат АС определяются как проекции на координатные оси с помощью выражения:

$$\begin{cases} \theta_x = \arcsin \frac{z''_{\text{НС}}}{\sqrt{x''^2_{\text{НС}} + y''^2_{\text{НС}} + z''^2_{\text{НС}}}}; \\ \theta_y = \arcsin \frac{y''_{\text{НС}}}{\sqrt{x''^2_{\text{НС}} + y''^2_{\text{НС}} + z''^2_{\text{НС}}}}. \end{cases} \quad (18)$$

Полученные параметры наведения (18) в дальнейшем используются для определения необходимого фазового распределения в ФАР.

Заключение

В представленных моделях описание вращения БПЛА и преобразования координат между различными системами осуществляется кинематическими параметрами Эйлера (Родрига-Гамильтона), а в качестве математического аппарата используются кватернионы.

Разработанные модели позволяют описать движение БПЛА одним кинематическим уравнением, при преобразовании между системами координат сократить количество вычислений, а применение тригонометрических функций свести к минимуму.

Представленные математические модели прогнозного движения БЛА и определения параметров наведения АС РС, являются основой для разработки алгоритмов управления характеристикой направленности ФАР, что является направлением дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Проблемы повышения эффективности функционирования ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате / А. Ю. Сивов и [др.] // Науч.-техн. сб. по матер. Межведомственной конф. на 11-й Межд. специализированной выставке «Граница-2009». — М. : ПНИЦ ФСБ России, 2010. — С. 109–114.
2. Алешин, М. Г. Повышение энергетической эффективности системы радиосвязи с ретранслятором на беспилотном летательном аппарате / М. Г. Алешин, С. В. Дьяконов, А. Ю. Сивов // Тр. 66-й науч.-техн. конф., посвящ. Дню радио. — СПб. : СПБНТОРЭС, 2011. — С. 174–175.
3. Алешин, М. Г. Обоснование антенной системы ретранслятора связи на беспилотном летательном аппарате / М. Г. Але-

шин, А. Ю. Сивов // Радиотехника, электроника и связь — 2011 : сб. докладов по результатам Межд. науч.-техн. конф. — М. : Радиотехника, 2011. — С. 382–391.

4. Машбиц, Л. М. Компьютерная картография и зоны спутниковой связи / Л. М. Машбиц. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Горячая линия-Телеком, 2009. — 236 с.

5. Бранец, В. Н. Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / В. Н. Бранец, Н. П. Шмыглевский. — М. : Наука, 1973. — 320 с.

6. Челноков, Ю. Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения / Ю. Н. Челноков. — М. : ФИЗМАТЛИБ, 2006. — 512 с.

СИВОВ Александр Юрьевич, кандидат технических наук, начальник факультета.

АЛЕШИН Михаил Геннадьевич, адъюнкт.

Адрес для переписки: amq261@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 23.11.2011 г.

© А. Ю. Сивов, М. Г. Алешин

УДК 621.3+519.24

Е. Ю. КОПЫТОВ
А. А. ЛЮБЧЕНКО

Омский государственный
университет путей сообщения

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ОШИБОК ДИАГНОСТИРОВАНИЯ В МОДЕЛЯХ ПРОЦЕССОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Предложена методика определения зависимости вероятностей ошибок первого и второго рода встроенной аппаратуры диагностирования (АД) от периодичности технического обслуживания (ТО).

Ключевые слова: моделирование, математическая модель, надежность, техническое обслуживание.

Введение

В математических моделях процессов ТО чаще всего значения вероятностей ошибок первого и второго рода однократно задают при моделировании и далее не меняют. Однако если эти коэффициенты показывают вероятности ошибок встроенной АД, то важно знать зависимость их значений от времени, поскольку это позволяет учитывать старение аппаратуры диагностики (особенно встроенной), так как АД подвергается тем же воздействиям, что и объект контроля.

Ошибка диагностирования первого рода (α) — это вероятность признать исправный объект неисправным, а ошибка диагностирования второго рода (β) — это вероятность признать неисправный объект исправным.

Методика определения ошибок диагностирования встроенной АД

Для определения зависимости $\alpha_1(T)$ возьмем восстанавливаемую систему, построенную на основе мо-

дели полумарковских случайных процессов [1, 2]. Для упрощения расчетов примем, что в данной системе существуют только ошибки первого рода встроенной АД. Рассмотрим граф вероятностей переходов данной системы (рис. 1). Начальным состоянием системы является исправное и работоспособное состояние S_0 . Через случайное время τ в системе может произойти опасный отказ, который с вероятностью $F_{02}(T)$ будет обнаружен и система перейдет в состояние S_2 из которого, спустя время восстановления $t_{в}$, с вероятностью, равной единице, она перейдет в исправное состояние S_0 . Если отказ не будет обнаружен встроенной аппаратурой диагностики, то система с вероятностью $\alpha_1(T)[1 - F_{02}(T)]$ перейдет в состояние ложного отказа S_3 из которого, спустя время устранения ложного отказа $t_{в.л.}$ с вероятностью, равной единице, она перейдет в исправное состояние S_0 . Если за время, равное периоду технического обслуживания

T в системе не произошло отказов, то она с вероятностью равной $[1 - \alpha_1(T)][1 - F_{02}(T)]$ перейдет в состояние ТО S_{TO} . За время ТО действия обслуживающего персонала могут вызвать в системе отказ, и она с вероятностью $F_{TO}(t_{TO})$ перейдет в состояние опасного отказа S_2 . Если за время выполнения работ по восстановлению в систему не было внесено отказа, то она с вероятностью $1 - F_{TO}(t_{TO})$ возвращается в исправное состояние S_0 и начинается ее эксплуатация по новому циклу.

На основании графа состояний и методики, изложенной в [1, 3] запишем матрицу переходных вероятностей данной системы:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & F_{02}(T) & \alpha_1(T) \cdot [1 - F_{02}(T)] \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 - F_{TO}(t_{TO}) & F_{TO}(t_{TO}) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (1 - \alpha_1(T)) \cdot [1 - F_{02}(T)] \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

где $\alpha_1(T)$ — вероятность ошибки первого рода встроенной аппаратуры диагностики,

$F_{02}(T)$ — функция распределения наработки на опасный отказ:

$$F_{02}(T) = 1 - e^{-\lambda T}, \quad (2)$$

$F_{TO}(t_{TO})$ — функция распределения наработки на опасный отказ при техническом обслуживании, для дальнейшего упрощения расчетов принимаем $F_{TO}(t_{TO}) = 0$.

Запишем матрицу-строку финальных вероятностей:

$$\pi = [\pi_0(T), \pi_2(T), \pi_3(T), \pi_{TO}(T)]. \quad (3)$$

Определим финальные вероятности нахождения системы в S_i -х состояниях. Для этого умножим матрицу-строку финальных вероятностей π на матрицу переходных вероятностей P . При этом должно выполняться следующее условие:

$$\begin{cases} \pi = \pi \cdot P, \\ \sum \pi_i = 1. \end{cases} \quad (4)$$

В результате умножения матриц получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \pi_0(T) = \pi_{TO}(T) + \pi_2(T) + \pi_3(T), \\ \pi_2(T) = \pi_0(T) \cdot F_{02}(T), \\ \pi_3(T) = \pi_0(T) \cdot \alpha_1(T) \cdot [1 - F_{02}(T)], \\ \pi_{TO}(T) = \pi_0(T) \cdot (1 - \alpha_1(T)) \cdot [1 - F_{02}(T)], \\ \pi_0(T) + \pi_2(T) + \pi_3(T) + \pi_{TO}(T) = 1. \end{cases} \quad (5)$$

Решим систему уравнений (5) и получим выражения для финальных вероятностей:

$$\pi_0(T) = \{1 + F_{02}(T) + \alpha_1(T) [1 - F_{02}(T)] + [1 - \alpha_1(T)][1 - F_{02}(T)]\}^{-1}. \quad (6)$$

Для удобства записи представим выражение (6) в виде:

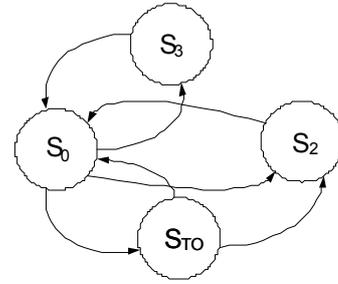


Рис. 1.

$$\pi_0(T) = \frac{1}{A}. \quad (7)$$

Тогда выражения для финальных вероятностей запишем с учетом (7).

$$\pi_2(T) = F_{02}(T) \cdot \frac{1}{A}. \quad (8)$$

$$\pi_3(T) = \alpha_1(T) \cdot [1 - F_{02}(T)] \cdot \frac{1}{A}. \quad (9)$$

$$\pi_{TO}(T) = (1 - \alpha_1(T)) \cdot [1 - F_{02}(T)] \cdot \frac{1}{A}. \quad (10)$$

Определим истинное $\omega_i(T)$ и наблюдаемое $v_i(T)$ время нахождения системы в рассматриваемых состояниях. Истинное время определяем для работоспособных состояний по формуле [3]:

$$\omega_i(T) = \sum_j p_{ij} \int_0^T \tau_{ij} dF_{ij}(\tau_{ij}), \quad (11)$$

где p_{ij} — вероятность перехода из рассматриваемого состояния,

τ_{ij} — время пребывания системы в этом состоянии, $F_{ij}(\tau_{ij})$ — функция распределения для одного шага процесса.

В данном случае работоспособными и приносящими доход являются следующие состояния: S_0 и S_3 . Истинное время нахождения в этих состояниях равно средней наработке за период длиной T . Определим $\omega_0(T)$ в соответствии с (11).

$$\omega_0(T) = p_{02} \int_0^T \tau_{02} dF_{02}(\tau_{02}) + p_{03} \int_0^T \tau_{03} dF_{03}(\tau_{03}) + p_{0TO} \int_0^T \tau_{0TO} dF_{0TO}(\tau_{0TO}). \quad (12)$$

Запишем функции распределения для одного шага процесса (вероятности переходов в каждое из состояний):

$$F_{02}(\tau) = \begin{cases} \frac{F_{02}(\tau)}{F_{02}(T)}, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (13)$$

$$F_{03}(\tau) = \begin{cases} \frac{[1 - F_{02}(\tau)]}{[1 - F_{02}(T)]}, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (14)$$

$$F_{0TO}(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (15)$$

Подставим полученные функции распределения для одного шага процесса в (12) и получим следующее выражение:

$$\begin{aligned} \omega_0(T) = & F_{02}(T) \int_0^T \tau d \frac{F_{02}(\tau)}{F_{02}(T)} + \\ & + \alpha_1(T) \cdot [1 - F_{02}(T)] \int_0^T \tau d \frac{[1 - F_{02}(\tau)]}{[1 - F_{02}(T)]} + \\ & + (1 - \alpha_1(T)) \cdot [1 - F_{02}(T)] T. \end{aligned} \quad (16)$$

Преобразуем (16):

$$\begin{aligned} \omega_0(T) = & \int_0^T \tau dF_{02}(\tau) + \alpha_1(T) \int_0^T \tau d[1 - F_{02}(\tau)] + \\ & + (1 - \alpha_1(T)) \cdot [1 - F_{02}(T)] \cdot T. \end{aligned} \quad (17)$$

Выражение $\int_0^T \tau dF(\tau)$ является интегралом Стильтеса. Взять этот интеграл можно путем интегрирования по частям [4].

$$\begin{aligned} \omega_0(T) = & T \cdot F_{02}(T) - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau + \\ & + \alpha_1(T) \cdot T \cdot [1 - F_{02}(T)] - \alpha_1(T) \int_0^T [1 - F_{02}(\tau)] d\tau + \\ & + (1 - \alpha_1(T)) \cdot [1 - F_{02}(T)]. \end{aligned} \quad (18)$$

После преобразований выражение $\omega_0(T)$ примет вид:

$$\omega_0(T) = T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau - \alpha_1(T) \int_0^T [1 - F_{02}(\tau)] d\tau. \quad (19)$$

Время нахождения системы в состоянии ложного отказа S_3 будет определяться составляющими времени восстановления в соответствии с технологическим процессом обслуживания. За это время будет устранен ложный отказ.

$$\omega_3(T) = t_{в.л.} \quad (20)$$

Определим наблюдаемое время нахождения системы во всех состояниях, кроме ТО исправной системы. Отличие истинного и наблюдаемого времени заключается в том, что истинное время описывает только работоспособные состояния. Наблюдаемое время обусловлено наличием ошибок диагностирования и определяется для всех состояний по формуле [3]:

$$v_i(T) = \sum_j p_{ij} \int_0^T \tau_{ij} dF_{ij}(\tau_{ij}). \quad (21)$$

Для рассматриваемой модели истинное и наблюдаемое время нахождения в состояниях S_0 и S_3 будут равны, так как в этой модели присутствуют только ошибки диагностирования первого рода встроенной АД.

$$v_0(T) = \omega_0(T). \quad (22)$$

$$v_3(T) = \omega_3(T). \quad (23)$$

Наблюдаемое время нахождения системы в состоянии опасного отказа S_2 определяется составляющими времени восстановления

$$v_2(T) = t_{в.} \quad (24)$$

Коэффициент готовности определяется через отношение времени нахождения системы в состояниях, приносящих доход, к общему наблюдаемому времени нахождения системы во всех состояниях, кроме ТО исправной системы и ТО при скрытом отказе.

$$K_T(T) = \frac{\pi_0(T)\omega_0(T) + \pi_3(T)\omega_3(T)}{\pi_0(T)v_0(T) + \pi_2(T)v_2(T) + \pi_3(T)v_3(T)}. \quad (25)$$

После подстановки значений и преобразований получаем:

$$\begin{aligned} K_T(T) = & \frac{T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau - \alpha_1(T) \int_0^T [1 - F_{02}(\tau)] d\tau +}{T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau - \alpha_1(T) \int_0^T [1 - F_{02}(\tau)] d\tau + t_{в.} \cdot F_{02}(T) +} \\ & \frac{+ t_{в.л.} \cdot \alpha_1(T) \cdot [1 - F_{02}(T)]}{+ t_{в.л.} \cdot \alpha_1(T) \cdot [1 - F_{02}(T)]}. \end{aligned} \quad (26)$$

Выразив из (27) $\alpha_1(T)$, получим зависимость ошибки первого рода от периодичности ТО. После всех преобразований получаем:

$$\begin{aligned} \alpha_1(T) = & \frac{K_T(T) \cdot \left[T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau + t_{в.} \cdot F_{02}(T) \right] -}{K_T(T) \cdot \left[\int_0^T [1 - F_{02}(\tau)] d\tau - t_{в.л.} \cdot [1 - F_{02}(T)] \right] +} \\ & \frac{- T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau}{+ t_{в.л.} \cdot [1 - F_{02}(T)] - \int_0^T [1 - F_{02}(\tau)] d\tau} \end{aligned} \quad (27)$$

Для определения зависимости $\beta_1(T)$ будем использовать следующий граф (рис. 2). Для упрощения расчетов примем, что в данной системе существуют только ошибки второго рода встроенной АД. Начальным состоянием системы является исправное и работоспособное состояние S_0 . Через случайное время τ в системе может произойти опасный отказ, который с вероятностью $1 - \beta_1(T)$ будет зарегистрирован, тогда система с вероятностью $(1 - \beta_1(T))F_{02}(T)$ перейдет в состояние отказа S_2 , из которого, спустя время восстановления $t_{в.}$, с вероятностью, равной единице, она перейдет в исправное состояние S_0 . Если отказ зарегистрирован не будет, то с вероятностью $\beta_1(T)F_{02}(T)$ система перейдет в состояние скрытого отказа S_3 . В состоянии S_3 система будет находиться до наступления проверки. В момент времени $t = T$ она, с вероятностью, равной единице, перейдет в состояние технического обслуживания. Если за время, равное периоду технического обслуживания T в системе не произошло отказов, то она с вероятностью равной $1 - F_{02}(T)$ перейдет в состояние ТО $S_{ТО}$. За время ТО действия обслуживающего персонала могут вызвать в системе отказ, и она с вероятностью $F_{ТО}(t_{ТО})$ перейдет в состояние опасного отказа S_2 . Если за время выполнения работ по восстановлению в систему не было внесено отказа, то она с вероятностью $1 - F_{ТО}(t_{ТО})$ возвращается в исправное состояние S_0 и начинается ее эксплуатация по новому циклу.

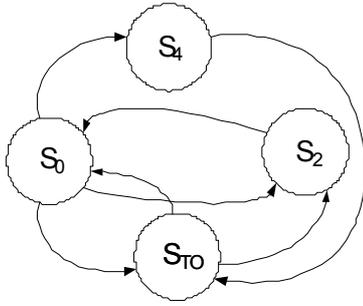


Рис. 2.

Матрица переходных вероятностей данной системы имеет вид:

$$P = \begin{pmatrix} 0 & (1 - \beta_1(T)) \cdot F_{02}(T) \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 - F_{TO}(t_{TO}) & F_{TO}(t_{TO}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1(T) \cdot F_{02}(T) & 1 - F_{02}(T) \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (28)$$

Далее расчет выполняется аналогично определению зависимости $\alpha_1(T)$.

Запишем матрицу-строку финальных вероятностей:

$$\pi = [\pi_0(T), \pi_2(T), \pi_4(T), \pi_{TO}(T)] \quad (29)$$

Финальные вероятности нахождения системы в S_i -х состояниях, при этом должно выполняться условие (4):

$$\begin{cases} \pi_0(T) = \pi_2(T) + \pi_{TO}(T), \\ \pi_2(T) = \pi_0(T) \cdot (1 - \beta_1(T)) \cdot F_{02}(T), \\ \pi_4(T) = \pi_0(T) \cdot \beta_1(T) \cdot F_{02}(T), \\ \pi_{TO}(T) = \pi_0(T) \cdot [1 - F_{02}(T)] + \pi_4(T), \\ \pi_0(T) + \pi_2(T) + \pi_4(T) + \pi_{TO}(T) = 1. \end{cases} \quad (30)$$

Решим систему уравнений (30) и получим выражения для финальных вероятностей:

$$\pi_0(T) = \{2 + \beta_1(T)F_{02}(T)\}^{-1} \quad (31)$$

Для удобства записи представим выражение (32) в виде:

$$\pi_0(T) = \frac{1}{A}. \quad (32)$$

Тогда выражения для финальных вероятностей запишем с учетом (32).

$$\pi_2(T) = (1 - \beta_1(T)) \cdot F_{02}(T) \cdot \frac{1}{A}. \quad (33)$$

$$\pi_4(T) = \beta_1 \cdot F_{02}(T) \cdot \frac{1}{A}. \quad (34)$$

$$\pi_{TO}(T) = [1 - F_{02}(T)] \cdot \frac{1}{A} + \beta_1(T) \cdot F_{02}(T) \cdot \frac{1}{A}. \quad (35)$$

Истинное время нахождения в состоянии S_0 равно:

$$\omega_0(T) = p_{02} \int_0^T \tau_{02} dF_{02}(\tau_{02}) + p_{04} \int_0^T \tau_{04} dF_{04}(\tau_{04}) + p_{0TO} \int_0^T \tau_{0TO} dF_{0TO}(\tau_{0TO}). \quad (36)$$

Запишем функции распределения для одного шага процесса:

$$F_{02}(\tau) = \begin{cases} \frac{F_{02}(\tau)}{F_{02}(T)}, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (37)$$

$$F_{04}(\tau) = \begin{cases} \frac{F_{04}(\tau)}{F_{04}(T)}, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (38)$$

$$F_{0TO}(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (39)$$

Подставим полученные функции распределения для одного шага процесса в (36) и получим следующее выражение:

$$\omega_0(T) = (1 - \beta_1(T)) \cdot F_{02}(T) \int_0^T \tau d \frac{F_{02}(\tau)}{F_{02}(T)} + \beta_1(T) \cdot F_{02}(T) \int_0^T \tau d \frac{F_{02}(\tau)}{F_{02}(T)} + [1 - F_{02}(T)] \cdot T. \quad (40)$$

Преобразуем (40):

$$\omega_0(T) = (1 - \beta_1(T)) \int_0^T \tau dF_{02}(\tau) + \beta_1(T) \int_0^T \tau dF_{02}(\tau) + [1 - F_{02}(T)] \cdot T. \quad (41)$$

$$\omega_0(T) = (1 - \beta_1(T)) \cdot \left[T \cdot F_{02}(T) - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau \right] + \beta_1(T) \cdot \left[T \cdot F_{02}(T) - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau \right] + [1 - F_{02}(T)] \cdot T. \quad (42)$$

После преобразований выражение $\omega_0(T)$ примет вид:

$$\omega_0(T) = T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau. \quad (43)$$

Наблюдаемое время нахождения в состоянии S_0 равно:

$$\nu_0(T) = p_{02} \int_0^T \tau_{02} dF_{02}(\tau_{02}) + p_{04} \int_0^T \tau_{04} dF_{04}(\tau_{04}) + p_{0TO} \int_0^T \tau_{0TO} dF_{0TO}(\tau_{0TO}). \quad (44)$$

Запишем функции распределения для одного шага процесса:

$$F_{02}(\tau) = \begin{cases} \frac{F_{02}(\tau)}{F_{02}(T)}, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (45)$$

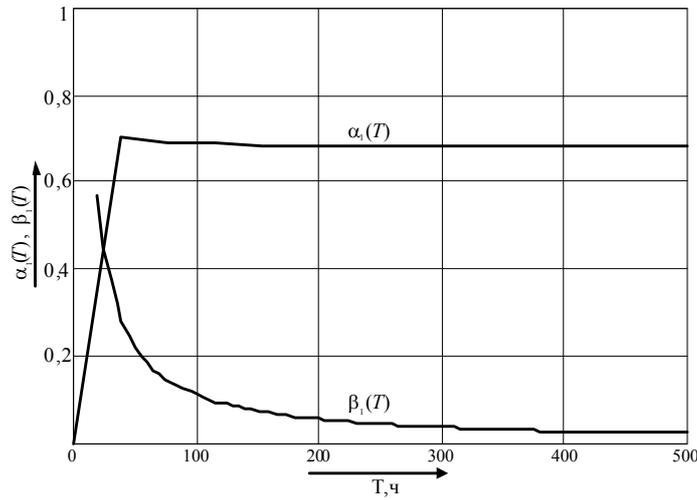


Рис. 3. Результат моделирования зависимостей $\alpha_1(T)$ и $\beta_1(T)$

$$F_{04}(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (46)$$

$$F_{070}(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{при } \tau < T \\ 1, & \text{при } \tau \geq T \end{cases} \quad (47)$$

Подставим полученные функции распределения для одного шага процесса в (44) и получим следующее выражение:

$$v_0(T) = (1 - \beta_1(T)) \cdot F_{02}(T) \int_0^T \tau d \frac{F_{02}(\tau)}{F_{02}(T)} + \beta_1(T) \cdot F_{02}(T) \cdot T + [1 - F_{02}(T)] \cdot T. \quad (48)$$

Преобразуем (48):

$$v_0(T) = (1 - \beta_1(T)) \int_0^T \tau dF_{02}(\tau) + \beta_1(T) \cdot F_{02}(T) \cdot T + [1 - F_{02}(T)] \cdot T. \quad (49)$$

$$v_0(T) = (1 - \beta_1(T)) \cdot \left[T \cdot F_{02}(T) - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau \right] + \beta_1(T) \cdot F_{02}(T) \cdot T + [1 - F_{02}(T)] \cdot T. \quad (50)$$

После преобразований выражение $v_0(T)$ примет вид:

$$v_0(T) = T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau + \beta_1(T) \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau. \quad (51)$$

Наблюдаемое время нахождения системы в состоянии опасного отказа S_2 определяется составляющими времени восстановления:

$$v_2(T) = t_B. \quad (52)$$

В состоянии скрытого отказа S_4 наблюдаемое время равно периоду эксплуатации системы, так как встроенная система диагностики не способна выявить отказы подобного типа.

$$v_4(T) = T. \quad (53)$$

Коэффициент готовности для данной системы имеет вид

$$K_T(T) = \frac{\pi_0(T)\omega_0(T)}{\pi_0(T)v_0(T) + \pi_2(T)v_2(T) + \pi_4(T)v_4(T)}. \quad (54)$$

После подстановки значений и преобразований получаем:

$$K_T(T) = \frac{\left[T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau \right]}{\left[T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau - \beta_1 \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau \right] + t_B \cdot (1 - \beta_1)} \rightarrow \frac{1}{F_{02}(T) + T \cdot \beta_1 \cdot F_{02}(T)}. \quad (55)$$

Выразив из (55) $\beta_1(T)$ получим зависимость ошибки второго рода от периодичности ТО. После всех преобразований имеем:

$$\beta_1(T) = \frac{T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau - K_T(T) \cdot \left[T - \int_0^T F_{02}(\tau) d\tau + t_B \cdot F_{02}(T) \right]}{K_T(T) \cdot \left[\int_0^T F_{02}(\tau) d\tau - t_B \cdot F_{02}(T) + T \cdot F_{02}(T) \right]}. \quad (56)$$

Результаты моделирования

Рассмотрим графики моделирования зависимостей $\alpha_1(T)$ и $\beta_1(T)$ (рис. 3). Значение коэффициента готовности для определения $\alpha_1(T)$ примем равным $K_T(T) = 0,9999945$, для $\beta_1(T)$ примем $K_T(T) = 0,9999975$.

Анализируя зависимость $\alpha_1(T)$, можно сделать следующий вывод: ошибка первого рода встроенной АД является зависимой от периодичности обслуживания, возрастая с увеличением периодичности ТО. Следовательно, будет возрастать количество ложных срабатываний, что приведет к увеличению затрат на ТО систем такого типа.

При анализе зависимости $\beta_1(T)$ наблюдаем, казалось бы, парадоксальную картину – уменьшение вероятности ошибки второго рода с ростом периодичности ТО. Если бы это соответствовало истине, то с увеличением периода ТО наблюдалось бы уменьшение числа скрытых отказов, но на практике этого не происходит. На самом деле, наличие ошибок второго рода маскирует отказы, произошедшие в системе,

следовательно, увеличивается время исправной работы, но не истинное, а наблюдаемое время. Это отражается на показателях надежности — уменьшается коэффициент готовности системы.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить и проанализировать характер изменения значений вероятностей ошибок первого и второго рода встроенной АД от периодичности ТО.

Библиографический список

1. Держо, Г. Г. Организация технического обслуживания электрических устройств на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / Г. Г. Держо // Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. — Омск, 1993. — 47 с.

2. Тихонов, В. И. Марковские процессы / В. И. Тихонов, М. А. Миронов. — М. : Сов. радио, 1977. — 488 с.

3. Герцбах, И. Б. Модели профилактики / И. Б. Герцбах. — М. : Сов. радио, 1959. — 216 с.

4. Корн, Г. Справочник по математике / Г. Корн, Т. Корн. — М. : Наука, 1974. — 832 с.

КОПЫТОВ Евгений Юрьевич, аспирант кафедры «Радиотехнические и управляющие системы».

Адрес для переписки: jenya87@list.ru

ЛЮБЧЕНКО Александр Александрович, аспирант кафедры «Радиотехнические и управляющие системы».

Адрес для переписки: lyubchenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.09.2011 г.

© Е. Ю. Копытов, А. А. Любченко.

УДК 621.373.5.001.5

**А. Н. ЛЯШУК
С. А. ЗАВЬЯЛОВ
А. Н. ЛЕПЕТАЕВ**

Омский государственный
технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ПОВЕРХНОСТНО-АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ МЕТОДОМ ДВУХПОЛЮСНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

В статье исследуются узлы высокочастотного (ВЧ) генератора, выполненного на ПАВ фильтре. Анализ генератора производится исходя из его представления в виде системы из двух элементов: пассивного линейного узкополосного частото-задающего элемента и активного нелинейного широкополосного элемента — схемы возбуждения. Сопоставляются результаты графоаналитического определения частот генерации с экспериментальными результатами измерения частоты выходного ВЧ сигнала реального макета.

Ключевые слова: поверхностно-акустическая волна; ПАВ; генератор; резонатор; фильтр; генератор, управляемый напряжением; моделирование генераторов.

1. Введение

Источники высокочастотных опорных колебаний являются неотъемлемой частью современной аппаратуры передачи данных. Рост требований к миниатюризации аппаратуры и увеличение скорости и объема передаваемых данных требует повышения рабочих частот. Для военных применений требуется устойчивость к ударным воздействиям большой амплитуды.

Задача синтеза ВЧ источников опорных колебаний с рабочими частотами в диапазоне 150 МГц и выше, удовлетворяющего комплексу требований по термостабильности, ударостойкости (способности сохранять работоспособность с обеспечением заданных технических характеристик после прекращения ударного воздействия), массогабаритным и энергетическим показателям, простоте реализации является актуальной, что подтверждается востребованностью подобных генераторов, в частности, в военной технике. Пути решения задачи синтеза подобных гене-

раторов ограничены — это создание источников опорных колебаний на основе высокочастотных кварцевых генераторов с последующим умножением частоты, использование элементной базы современной MEMS-технологии (MicroElectroMechanical Systems, технология микроэлектромеханических систем) [1], и, на взгляд авторов, более предпочтительный путь — создание ВЧ источников опорных колебаний с использованием ПАВ структур.

ПАВ структуры в зависимости от типа устройства (двухполюсный ПАВ резонатор, четырехполюсная ПАВ линия задержки (ЛЗ)) и своей специфики (материала пьезоэлектрика, топологии) позволяют создавать различные по свойствам и сложности реализации ПАВ генераторы, в частности, перестраиваемые по частоте — перестраиваемые ПАВ генераторы как на кварцевых ПАВ резонаторах, так и ПАВ ЛЗ. Кварцевые ПАВ ГУНы имеют небольшой диапазон перестройки по частоте, а для ПАВ ГУНов на ЛЗ характерна сложность схемных решений (как пра-

вило это двухкаскадные схемы с внешним фазовращателем) [2–7]. В [8] приводится описание ПАВ генератора, во многом лишенного указанных выше недостатков. На его базе можно создавать ВЧ источники опорных колебаний, удовлетворяющих комплексу требований по термостабильности и ударостойкости.

2. Задачи

Для разработки генератора на основе ПАВ-фильтра необходимо решить следующие задачи:

- обосновать требования к электрическим свойствам ПАВ структуры для проектирования ГУН с широкой перестройкой по частоте;
- провести экспериментальное исследование узлов ПАВ ГУН и сопоставить полученные экспериментальные данные с результатами аналитического (графического) определения частот генерации.

3. Решение поставленных задач

Существует два разных подхода к задаче проектирования конкретного автогенератора с устройством на ПАВ [9]. Один из них — разработка автогенератора под конкретное устройство на ПАВ, которое есть в наличии у разработчика. Другой подход — это создание устройства на ПАВ с заданными электрическими и механическими свойствами, что может дать существенное улучшение параметров автогенератора. Определим ряд требований к ПАВ устройству для создания генератора управляемого напряжением с широкой перестройкой по частоте.

Ширина полосы перестройки ГУН на основе ПАВ резонатора или ПАВ фильтра зависит от полосы пропускания ПАВ структуры. Передаточная характеристика ПАВ элемента в основном определяется свойствами передаточных функций передающего и приемного встречно-штыревых преобразователей (ВШП), а также согласующих цепей. Эффективность, ширина полосы частот и электрическое сопротивление ВШП как наиболее распространенного устройства возбуждения и приема ПАВ определяются только его геометрическими размерами и физическими параметрами пьезоэлектрика (подложки), поэтому существуют некоторое оптимальное количество пар электродов N_0 , при котором можно получить максимальную эффективность при заданном электрическом сопротивлении преобразователя [10]. С учетом связи между относительной шириной полосы пропускания $\Delta f/f$ и величиной N_0 можно записать [10]:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{N_0} = \sqrt{\frac{4 \cdot k^2_{св}}{\pi}} = 1.128 \cdot k_{св},$$

где $k^2_{св}$ — коэффициент электромеханической связи.

Значения $k^2_{св}$ сильно отличаются для разных материалов: для ниобата лития $k^2_{св}$ составляет примерно 0,05, для танталата лития Z и Y ориентации — 0,01, а для кварца — 0,002. Оценивая потери в ПАВ структуре, следует отметить, что использование пьезокристаллов ниобата лития, германата висмута и пьезокварца позволяет создавать ПАВ устройства с небольшими вносимыми потерями [10]. Поэтому, с точки зрения создания широкополосных ПАВ устройств с малыми потерями, наиболее предпочтительным материалом для звукопровода является ниобат лития. Важной особенностью ПАВ фильтра является то, что его амплитудно-частотные (АЧХ) и фазочастотные (ФЧХ) характеристики не связаны однозначно между собой, и крутизну фазовой характеристики можно изменять путем изменения расстояния между приемной и передающей структурой ВШП [10]. Это дает

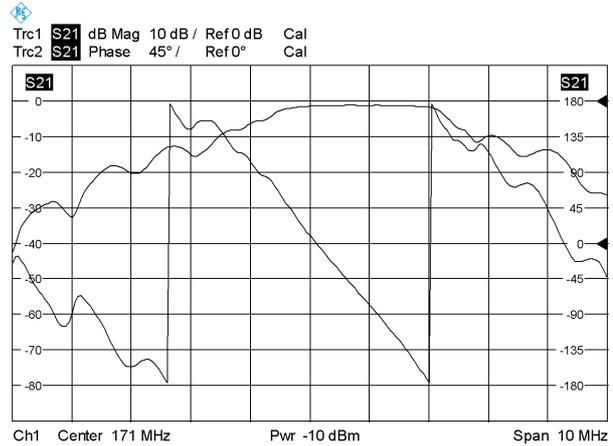
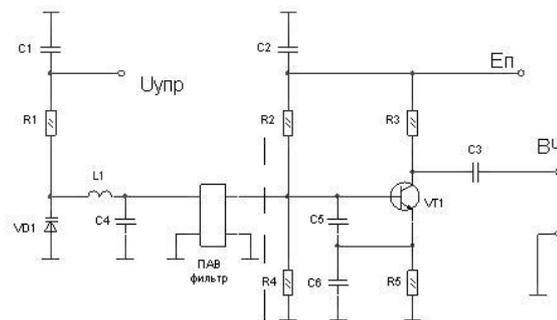


Рис. 1



пассивная часть | активная часть

Рис. 2

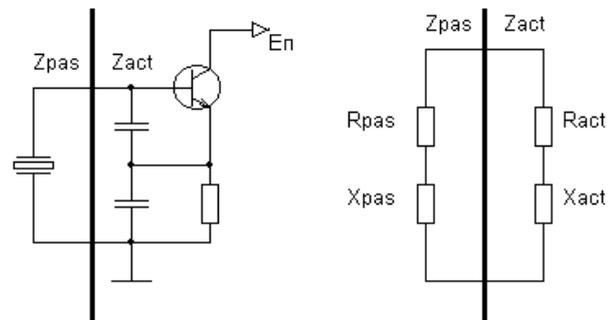


Рис. 3

возможность изменять ширину полосы перестройки частоты независимо от вида АЧХ фильтра. Поэтому задача синтеза необходимой ПАВ структуры для генератора с большой перестройкой сводится к проектированию фильтра на ПАВ с малыми вносимыми потерями (класс ПАВ фильтров для входных цепей радиоприемного тракта) и с линейной ФЧХ в полосе пропускания для обеспечения однододового режима генерации.

На рис. 1 приведены измеренные АЧХ и ФЧХ ПАВ устройства, удовлетворяющего сформулированным выше требованиям. Устройство представляет собой фильтр на ПАВ, выполненный на ниобате лития $LiNbO_3$, с малыми вносимыми потерями в полосе пропускания — примерно 1,8 дБ. Из рисунка видно, полоса пропускания фильтра по уровню минус 3 дБ составляет примерно 2,7 МГц, при этом ФЧХ имеет линейный характер с фазовым изменением в полосе пропускания примерно 2π .

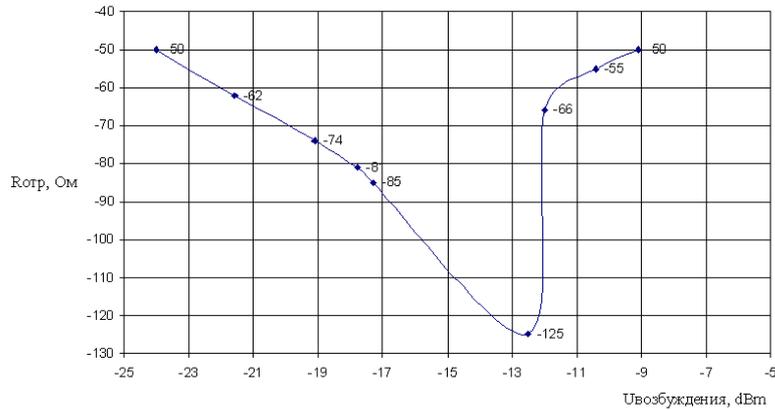


Рис. 4

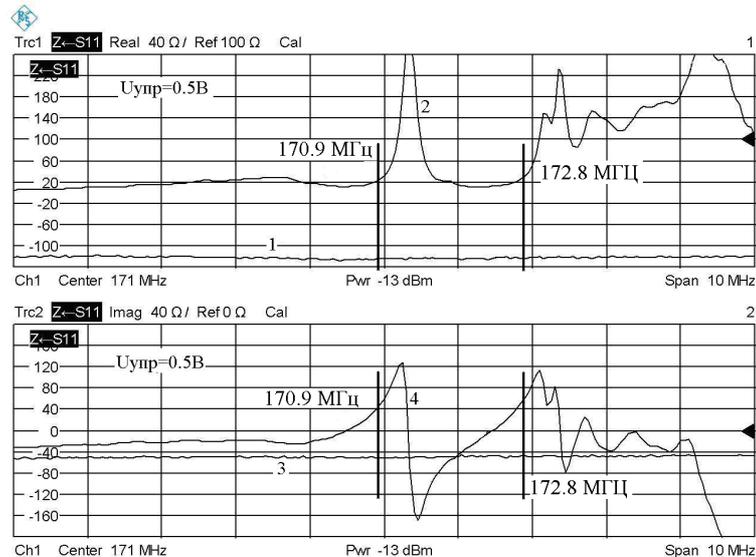


Рис. 5

На рис. 2 представлена схема генератора на ПАВ структуре со свойствами, изображенными на рис. 1 и выполненная по схеме емкостной трехточки (схема Колпитца). Для проведения исследования генератора выделим его основные узлы — это усилитель на транзисторе VT1, ПАВ фильтр и П-контур (VD1, L1, C4, R1, C1) [8].

Используемый метод анализа ПАВ ГУНа является логическим развитием метода анализа кварцевых генераторов [11, 12]. Абстрагируясь от конкретной структуры схемы автогенератора и от конкретного вида обратной связи, генератор может быть представлен в виде системы из двух элементов: пассивного, частотозадающего элемента — колебательного контура, и активного, восполняющего потери энергии, элемента — схемы возбуждения [13, 14] (рис. 3). Независимо от того, сколько компонентов имеет реальная схема автогенератора, пассивная и активная часть автогенератора рассматриваются как линейные двухполюсники и описываются определенными характеристическими параметрами. В этом представлении (рис. 3) свойства, как колебательной системы, так и схемы возбуждения можно описать, опираясь только на соотношения между сигналами на внешних выводах. На рис. 3 двухполюсник Z_{pas} описывает пассивную часть генератора, а Z_{act} — активную. Эквивалентная схема пассивной части, включает реактивность X_{pas} , представляющую реактивное сопротивление пассивной части (каскадное соединение ПАВ фильтра и П-контура), и R_{pas} представляющее

сопротивление потерь пассивной части. Активная часть представлена последовательным соединением реактивности X_{act} и сопротивления R_{act} . В данном случае двухполюсник пассивной части генератора имеет сопротивление с положительной реальной частью.

При соединении активной и пассивной частей схема будет работать как генератор, если сумма реальных частей входных сопротивлений отрицательна. В этом случае энергетические потери в пассивной части полностью компенсируются. Только в данном случае напряжения шумов могут быть усилены. Это выражается в следующих начальных условиях:

$$\begin{aligned} |R_{act}| &> |R_{pas}|, \\ \text{sgn}(R_{act}) &= -\text{sgn}(R_{pas}). \end{aligned}$$

С увеличением амплитуды сигнала коэффициент усиления транзистора уменьшается. В момент, когда сумма реальных частей входных сопротивлений становится равной нулю, происходит установление режима работы генератора со следующими условиями:

$$\begin{aligned} |R_{act}| &= |R_{pas}|, \\ X_{pas} &= -X_{act}. \end{aligned}$$

Наступает так называемый баланс энергий, соответствующий стационарному режиму генерации, при

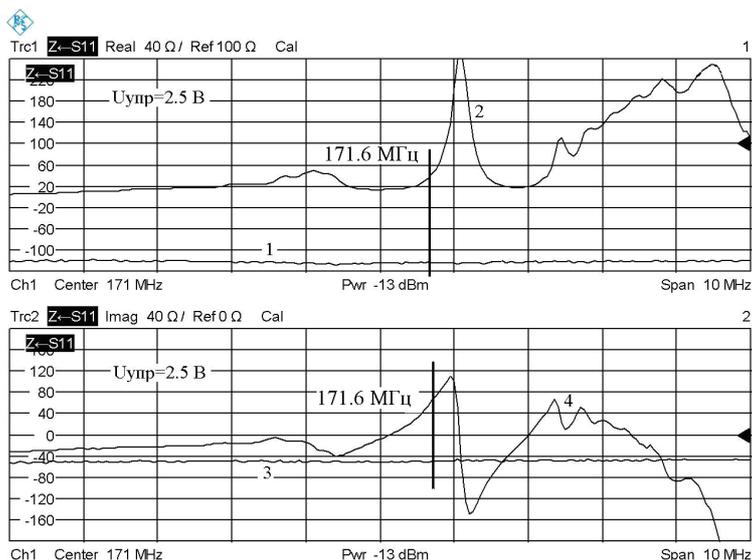


Рис. 6

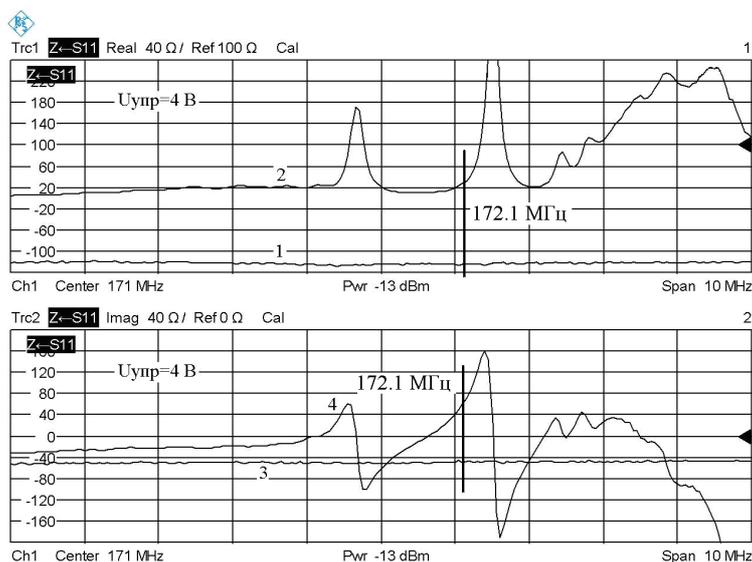


Рис. 7

котором энергия, выработанная за период колебания в активном двухполюснике, полностью компенсирует потери за тот же период колебания в пассивном двухполюснике, что эквивалентно классическим условиям генерирования колебаний на основе условий баланса фаз и амплитуд.

На рис. 4–7 ниже приведены следующие измеренные характеристики (измерения проводились с использованием анализатора цепей Rohde&Schwarz Network Analyzer ZVL):

1. Рис. 4 – зависимость входного отрицательного сопротивления активной части генератора при различных значениях амплитуды возбуждения.

2. Рис. 5–7 – реальная и мнимая части входного импеданса активной (кривые 1,3) и пассивной части генератора (кривые 2, 4) при управляющих напряжениях $U_{упр}$, равными 0,5 В, 2,5 В и 4 В соответственно.

Из рис. 5–7 из условий баланса фаз и амплитуд графически можно определить значения возможных частот генерации: при $U_{упр} = 0,5$ В значение частоты f составляет примерно 170,9 МГц; при $U_{упр} = 2,5$ В – 171,6 МГц; при $U_{упр} = 4$ В – 172,1 МГц. Также надо отметить, что возможны перескоки на паразитные частоты генерации, например, при $U_{упр} =$

$= 0,5$ возможна сбивка рабочей частоты на 172,8 МГц. Это говорит о необходимости дальнейшей оптимизации проектирования ПАВ структуры и номиналов схемы.

График измеренной зависимости частоты ВЧ сигнала на выходе генератора (рис. 2) от управляющего напряжения показан на рис. 8, из которого видно, что перестройка частоты при изменении управляющего напряжения в пределах (0,5...4) В составляет не менее 5800 ppm (не менее 1 МГц). Ранее графически были определены значения частот ВЧ сигнала при $U_{упр}$ равным 0,5, 2,5 и 4 В. Сравнение графически определенных значений частот генерации и значений соответствующих реальной характеристикой управления генератора дают расхождение около 1%. На рис. 9 представлена измеренная характеристика фазового шума при $U_{упр} = 2,5$; значение фазового шума при отстройке 10 кГц в рабочем диапазоне перестройки составляет менее минус 120 дБ/Гц. Следует отметить, что данные характеристики были получены без оптимизации конструктивного (корпусного) исполнения генератора. В качестве сравнения можно указать, что для генератора фирмы Vectron International VS-709 [15] типовые зна-

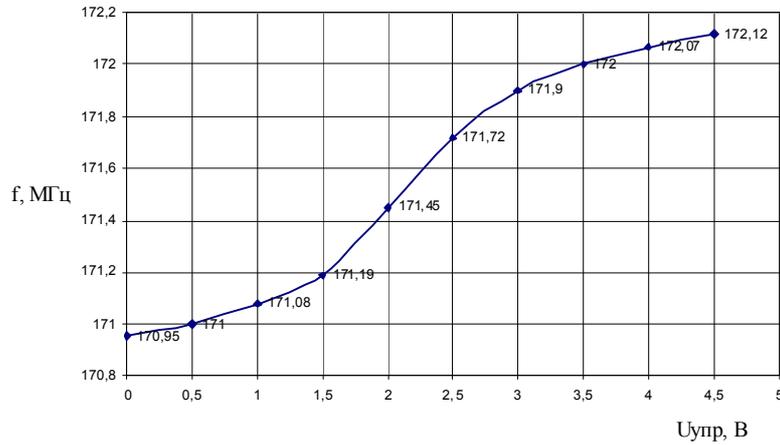


Рис. 8

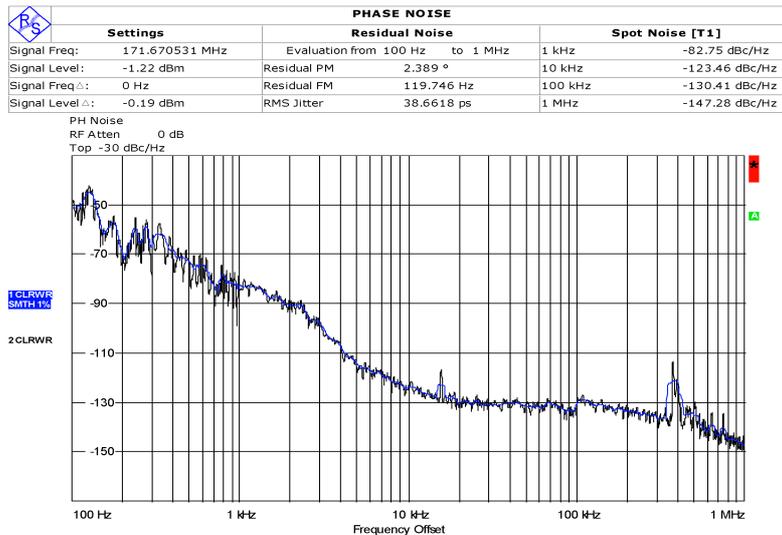


Рис. 9

чения перестройки по частоте составляет примерно 1200 ppm (порядка 200 кГц при частоте 170 МГц), мощность фазовых шумов минус 115 дБ/Гц при отстройке 10 кГц от несущей для значения на кривой фазового шума.

4. Выводы

Проведенный анализ вариантов построения генераторов и генераторов управляемых напряжением на ПАВ структурах, их технических характеристик, а также экспериментальное исследование разработанного генератора на ПАВ фильтре [8], показывает, что использование ПАВ фильтра с малыми вносимыми потерями (потерями, определяемыми при включении фильтра в его типовой схеме включения) и линейной фазовой характеристикой в полосе пропускания позволяет создавать генераторы управляемые напряжением с перестройкой по частоте, большей, чем у возможных аналогов. При этом полученное схемное решение отличается простой ввиду наличия одного активного элемента в схеме генератора. Рекомендуется использовать полученные результаты в производственной деятельности НИИ электронного приборостроения г. Омска.

Библиографический список

1. Сайт Ежедневного дайджеста новостей для разработчиков электронной техники. — URL: <http://www.seminews.ru/passive/371.html> (дата обращения: 24.10.2011).

2. Сайт Компании IP.com Products and Services. — URL: <http://ip.com/patent/US4799029> (дата обращения: 24.10.2011).

3. Сайт Компании IP.com Products and Services. — URL: <http://ip.com/patent/US4760352> (дата обращения: 24.10.2011).

4. Сайт Компании IP.com Products and Services. — URL: <http://ip.com/patent/US4011526> (дата обращения: 24.10.2011).

5. Пат. 1256654 А1, Российская Федерация, МПК Н 03 Н 9/00. Генератор на поверхностных акустических волнах [Текст] / Николаенко К.В. — № 3840314/23 ; заявл. 11.01.1985; опубл. 10.10.1996.

6. Пат. 2052888 С1, Российская Федерация, МПК Н 03 В 5/32. Низкочастотный генератор на поверхностных акустических волнах [Текст] / Мельцер Я.Е. ; заявитель и патентообладатель Товарищество с ограниченной ответственностью Опытное конструкторское бюро "Павика". — № 5058300/09; заявл. 10.08.1992; опубл. 20.01.1996.

7. Двуполосная ПАВ-микросборка ГУНа для мобильных радиостанций диапазона частот 146-174 МГц [Текст] / С. А. Доберштейн [и др.] // Техника радиосвязи : научно-технический сборник. — Омск : Омский НИИ приборостроения, 2000. — Вып. 5. — С. 52–60.

8. Пат. 98301 U1, Российская Федерация, МПК Н 03 Н 9/00. Генератор ПАВ [Текст] / Завьялов С. А., Ляшук А. Н ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Омский государственный технический университет». — № 2010114993/09 ; заявл. 14.04.2010 ; опубл. 10.10.2010.

9. Дворников, А. А. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах [Текст] / А. А. Дворни-

ков, В. И. Огурцов, Г. М. Уткин. — М. : Радио и связь, 1983. — 136 с.

10. Рыжков, А. В. Синтезаторы частот в технике радиосвязи [Текст] / А. В. Рыжков, В. Н. Попов. — М. : Радио и связь, 1991. — 264 с.

11. Lepetaev A.N., Zavjalov S.A., Kosykh A. V. The New Method of Computer Analysis of Dual-Mode Oscillators. International Forum on Wave Electronics and Its Applications, - St. Petersburg, Russia, 2000.

12. Lepetaev A.N., Kosykh A.V., Zavjalov S.A., Gubarev A.A. The method of computer simulation of crystal oscillators based on measuring of nonlinear input impedance of oscillator circuit and its experimental verification // Prog. of the 2002 IEEE International Frequency Control Symposium. — New Orleans, USA, 2002.

13. Бенинг, Ф. Отрицательные сопротивления в электронных схемах [Текст] / Ф. Бенинг. — М. : Советское радио, 1978. — 288 с.

14. Петров, Б. Е. Радиопередающие устройства на полупроводниковых приборах [Текст] / Б. Е. Петров, В. А. Романюк. — М. : Высшая школа, 1989. — 232 с.

15. Сайт Компании Vectron International. — URL: <http://www.vectron.com/products/vcso/vs709.pdf> (Дата обращения 24.10.2011).

ЛЯШУК Алексей Николаевич, инженер НИЧ, кафедре «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

Адрес для переписки: e-mail vostok3@front.ru

ЗАВЬЯЛОВ Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

Адрес для переписки: e-mail zavyalov62@mail.ru

ЛЕПЕТАЕВ Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

Адрес для переписки: LAN@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 25.10.2011 г.

© А. Н. Ляшук, С. А. Завьялов, А. Н. Лепетаев

Книжная полка

Основы электроники, радиотехники и связи : учебное пособие для вузов / А. Д. Гуменюк [и др.]. — М. : Горячая линия-Телеком, 2008. — 480 с. — ISBN 978-5-9912-0029-5.

Рассмотрены принципы работы наиболее широко применяемых электронных приборов. Дано краткое изложение теории детерминированных и случайных электрических процессов (сигналов). Приведены основные типы частотно-селектирующих цепей и линий задержки; изложена теория работы электронных усилителей, генераторов, модуляторов, преобразователей частоты, детекторов, логических схем, волноведущих устройств. Описаны принципы кодирования сигналов и их обработки в радиоприемных устройствах, методики формирования сигнальных потоков в современных линиях связи. Кратко изложены принципы построения вторичных источников питания и их отдельных функциональных узлов. Для студентов, обучающихся по специальностям 075600 — «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», 075500 — «Комплексное обеспечение безопасности автоматизированных систем», 075200 — «Компьютерная безопасность», будет полезна специалистам.

Интеллектуальные сенсорные системы / Под ред. К. М. Мейджера ; пер. с англ. — М. : Техносфера, 2011. — 464 с. — ISBN 978-5-94836-299-1.

Книга посвящена весьма актуальному новому направлению развития электроники — сенсорике, или, как принято в отечественной терминологии — микросистемотехнике. Авторы представляют Дельфтский технический университет, а также ряд ведущих западных фирм, разработки и продукция которых в достаточном объеме представлена на рынке электронных компонентов. Содержание книги отражает теоретические и практические достижения в области сенсорики и сенсорных систем, уровень которых позволяет квалифицировать их как интеллектуальные. Патентная защита предлагаемых технических решений свидетельствует о мировой новизне сенсорных устройств и способов высокоточных измерений. Предлагаемая научно-техническому сообществу книга будет способствовать интенсификации разработок сенсоров и сенсорных систем в силу достаточно доказательно сформулированных авторами перспективных направлений развития этой ветви электроники, учитывая пограничный характер используемых природных явлений. Изложенный теоретический и практический материал станет основой для разработчиков микроэлектронной аппаратуры, а также будет полезным преподавателям, аспирантам и студентам технических университетов.

Груба, И. И. Системы охранной сигнализации. Технические средства обнаружения / И. И. Груба. — М. : Солон-пресс, 2012. — 220 с. — ISBN 978-5-91359-103-6.

Данная книга адресована всем, кто интересуется проблемами разработки, изготовления, проектирования, монтажа и эксплуатации средств и систем охранной сигнализации. Дано систематизированное описание большинства известных на настоящее время типов средств обнаружения. Приведены оценки уровней физических воздействий от обнаруживаемых объектов и от основных помеховых факторов. Представлены типовые схемы построения средств обнаружения и основных элементов, используемых в их составе. Описано устройство и даны сравнительные характеристики средств обнаружения различных принципов действия. Изложенный материал упорядочен, что позволяет использовать его в качестве справочного пособия. Книга представляет интерес как для начинающих, так и для квалифицированных инженеров и радиолюбителей, специализирующихся в области охранной сигнализации.