УДК 621.373.14 (075.8)

ОЦЕНКА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ ТРАКТА УСИЛЕНИЯ МОЩНОСТИ ЦИФРОВОГО ТВ-ПЕРЕДАТЧИКА

В. В. Шахгильдян, президент МТУСИ, чл.-корр. РАН, д. т.н., профессор
В. Л. Карякин, профессор ПГУТИ, д. т.н.; karyakin@psati.ru
В. Б. Толмачев, зав. лабораторией ПГУТИ

Ключевые слова: *цифровой передатчик, интермодуляционные искажения, визуальное моделирование, усилитель мощности, DVB стандарт.*

Введение. Современные стандарты радиосвязи, радиовещания и телевидения (ТВ) предъявляют повышенные требования по нелинейным искажениям в трактах усиления мощности цифровых передатчиков [1—5]. Методы оценки нелинейных искажений в аналоговых и цифровых передатчиках различны.

Для оценки нелинейных искажений в цифровых ТВ-передатчиках используются:

- количественный метод оценки интермодуляционных искажений, заключающийся в измерении отношения мощности внеполосных излучений в соседнем канале к мощности сигнала в рабочем канале (в европейском стандарте [1] интермодуляционные искажения оцениваются параметром *ACPR — Adjacent Channel Power Ratio*);
- метод, основанный на сравнении спектра рабочего канала с маской, приведенной в техническом описании стандарта [1].

Эффективным инструментом для оценки нелинейных искажений в трактах усиления мощности цифровых передатчиков является среда визуального моделирования *AWR Design Environment* с интегрированным модулем *Visual System Simulator (VSS)*.

Цель настоящей работы — создание методики оценки интермодуляционных искажений усилителей мощности сигналов стандарта *DVB-T* и мобильного ТВ-стандарта *DVB-H* передатчиков эфирного (наземного) цифрового ТВ с использованием *визуальной среды моделирования* **VSS**.

Источником сигнала для исследования тракта усиления мощности служит возбудитель цифрового ТВ-передатчика. При моделировании в среде *VSS* источника сигнала необходима информация о структуре ТВ-передатчика и его параметрах [6].

Модель источника сигнала стандартов *DVB-T* и *DVB-H* в среде *VSS*. Рассмотрим функциональное назначение элементов модели источника сигнала (рис. 1). Здесь в полосе одного ТВ-канала формируются сигналы стандарта эфирного цифрового вещания *DVB-T* и мобильного ТВ-стандарта *DVB-H*.

Транспортные потоки двух независимых каналов, предназначенных для формирования ТВ-сигналов в соответствии со стандартами *DVB-T* и *DVB-H*, сначала поступают на рандомизаторы, которые формируют квазислучайные сигналы с равномерным спектром.

Модули внешнего и внутреннего кодирования, а также перемежения решают задачи компрессии сигналов и обеспечения их помехозащищенности. В стандартах *DVB-T* и *DVB-H* используются различные способы перемежения и кодирования для эффективной борьбы с помехами при различных условиях приема сигнала. Помехозащищенность канала передачи данных во многом зависит от кодовой скорости, определяемой отношением длины кодового блока на входе к длине преобразованного кодового блока на выходе кодера. Например, если кодовая скорость равна 1/2, то это означает, что к исходной информации добавлена избыточность в объеме, равном объему исходной информации.

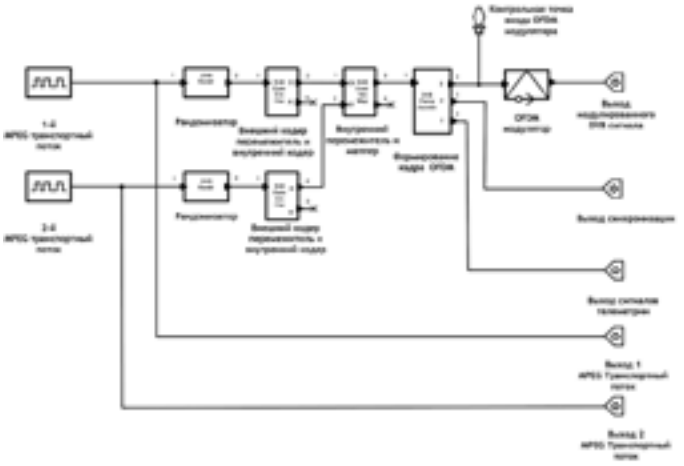


Рис. 1

В маппере модели источника сигнала (см. рис. 1) осуществляется раскладка символов. При формировании кадра к основному сигналу добавляются пилот-сигналы (маркеры синхронизации) и сигналы служебной информации. Режимы 2*k* и 8*k* различаются числом несущих многочастотной модуляции *COFDM* (1705 и 6817 соответственно). Каждая несущая в символе *COFDM* модулируется собственным цифровым потоком с использованием квадратурной фазовой (*QPSK*) или амплитудной модуляции (*QAM*). Ширина спектра группового сигнала для полосы канала 8 МГц составляет 7,61 МГц.

Для уменьшения взаимного влияния передатчиков в одночастотных сетях вводят защитный интервал. Стандартом предусмотрены четыре относительных значения защитных интервалов, равные 1/4, 1/8, 1/16 и 1/32 длительности активной части символа. Соответствующие абсолютные значения приведены в табл. 3.1 в [6] для режимов 2*k* и 8*k*. Выбор величины защитного интервала определяется территориальным разносом передатчиков в одночастотной сети. Следует отметить, что помехоустойчивое кодирование и защитные интервалы снижают информационную скорость передачи, и это надо учитывать при выборе параметров системы.

Модуляция *COFDM* несущих частот кодированными сигналами в модуляторе происходит в соответствии с выбранным видом модуляции и манипуляционным кодом. Роль многочастотного модулятора (см. рис. 1) выполняет интегральная схема обратного преобразования Фурье.

Кратко рассмотрев функциональное назначение элементов модели источника сигнала, перейдем к исследованию тракта усиления мощности. В качестве примера возьмем методику оценки нелинейных искажений широкополосного усилителя мощности (УМ), принципиальная схема которого приведена на рис. 2.32 в [2]. УМ предназначен для работы в предварительных каскадах тракта усиления мощности передатчиков в линейном режиме класса ***A***. Расширение диапазона рабочих частот УМ достигается исключением из схемы входных и выходных цепей согласования. Требуемое входное и выходное сопротивление усилителя обеспечивается за счет наличия в его схеме цепей отрицательной обратной связи по напряжению и току.

Результаты схемотехнической оптимизации УМ в среде *MWO*. Источником исходных данных для исследования усилителя мощности в среде системного моделирования *VSS* служит его схемотехническая модель [2], созданная в среде *MWO*. На входе и выходе усилителя мощности имеются порты. Входной порт является источником сигнала с сопротивлением 50 Ом, выходной порт — стандартный, с сопротивлением 50 Ом.

При исследовании усилителя мощности на 26-м ТВ-канале в диапазоне частот 510…518 МГц установлено, что неравномерность АЧХ не превышает 0,1 дБ.

Алгоритм исследования УМ в среде *VSS*. Алгоритм *UM—VSS* программы *TUVSS* исследования тракта усиления мощности состоит из четырех этапов: подготовка к исследованию; исследование спектральных и энергетических характеристик; количественная оценка интермодуляционных искажений; оценка интермодуляционных искажений методом сравнения спектра измеряемого канала с маской.

Рассмотрим последовательно этапы алгоритма *UM—VSS*.

1. Подготовка к исследованию УМ в среде *VSS*.

A1 Ввод исходных данных.

Введем компьютерную модель исследуемого усилителя мощности *Schematic 3*, созданную в среде *MWO* [2].

A2 Откроем окно для системного моделирования в среде *VSS*.

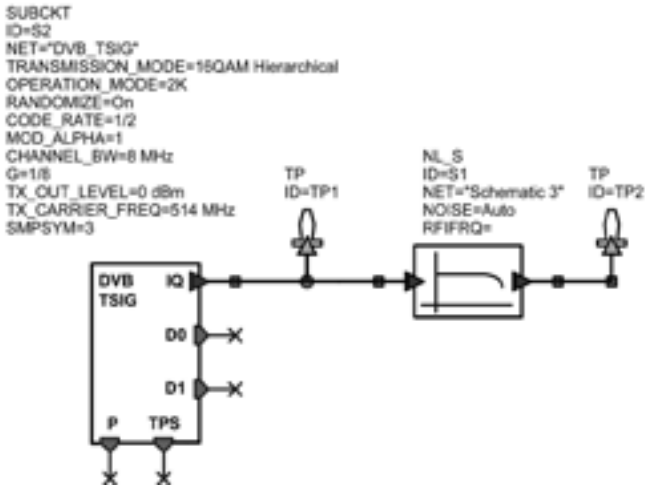


Рис. 2

A3 Перенесем в окно системного моделирования исследуемую схему *Schematic 3*.

A4 Раскроем раздел *Libraries* и выберем подраздел *DVB-H (DVB-T)* — наземные системы цифрового ТВ; выберем элемент *DVB_TSIG* (*DVB*-возбудитель передатчика), предназначенный для тестирования УМ, и перенесем его в окно системного моделирования.

A5 Откроем окно для выбора его параметров.

Выберем вид модуляции (*TRANSMISSION_MODE*) *16-QAM Hierarchical,* центральную частоту канала (*TX_CARRIER_FREQ*) 514 МГц, уровень мощности на выходе возбудителя передатчика (*TX_OUT_LEVEL*) 0 дБм.

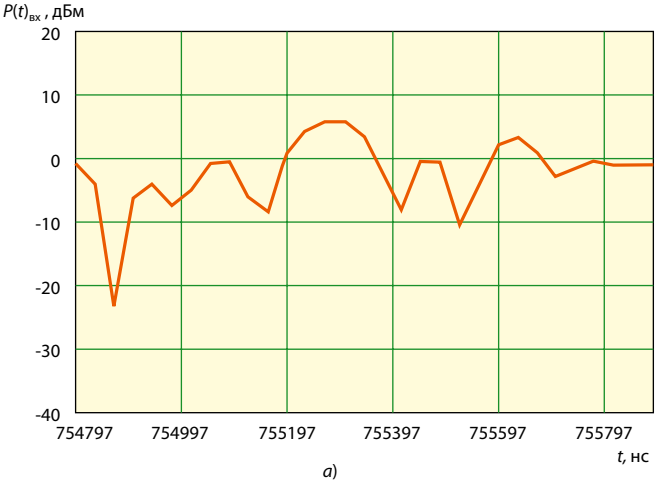
A6 Соединив выход возбудителя передатчика со входом усилителя мощности и включив измерительные элементы *TP1* и *TP2*, получим модель для исследования усилителя мощности в среде *VSS* (рис. 2).

2. Исследование спектральных и энергетических характеристик УМ в среде *VSS*.

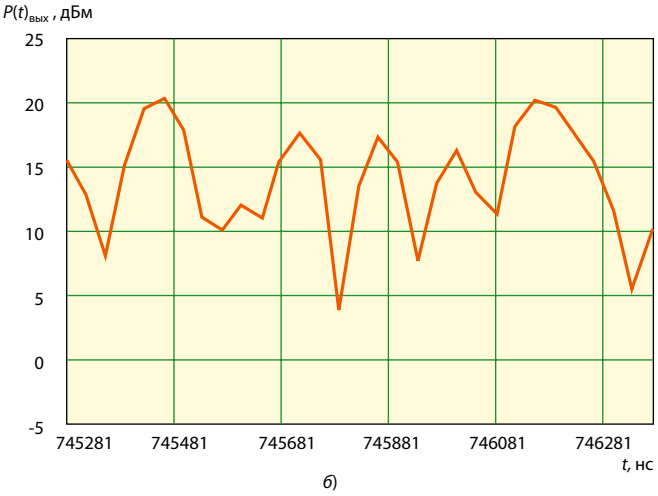
A7 Построим временны*е* зависимости мощности на входе (рис. 3, *а*) и выходе (рис. 3, *б*) исследуемого усилителя. Для этого введем дополнительно два прямоугольных графика и установим требуемые параметры для каждого из них.

A8 Построим спектр *DVB*-сигнала на входе и выходе усилителя мощности (рис. 4). Для этого введем дополнительно два прямоугольных графика и для каждого из них установим требуемые параметры.

На рис. 4 представлена спектральная плотность мощности *DVB*-сигнала *S(f)*, измеренная на входе (*а*) и выходе (*б*) усилителя мощности в полосе анализатора спектра



а)



б)

Рис. 3

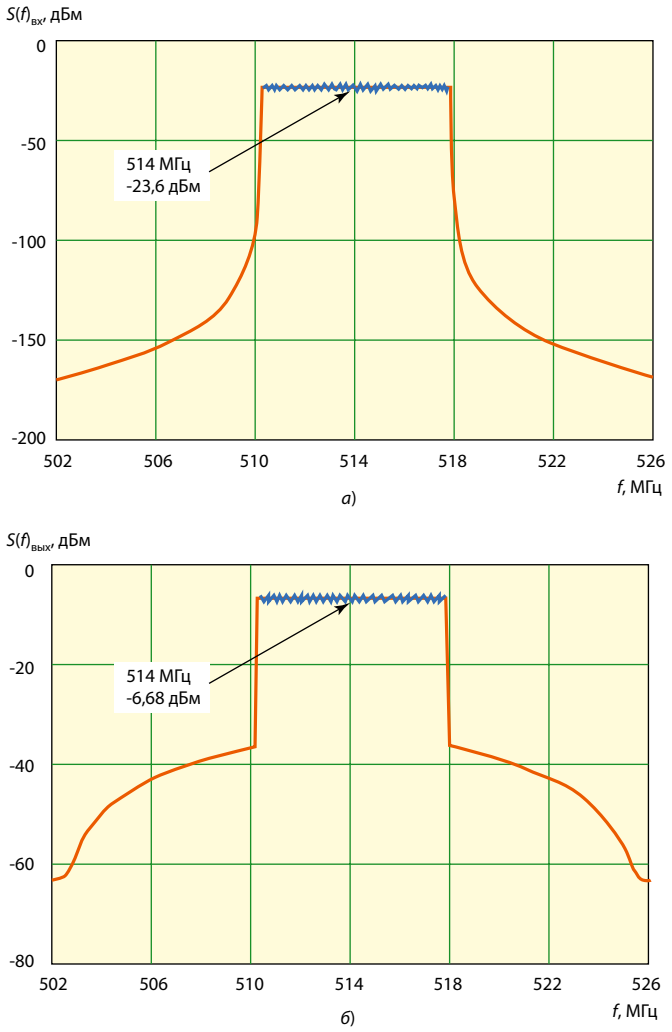


Рис. 4

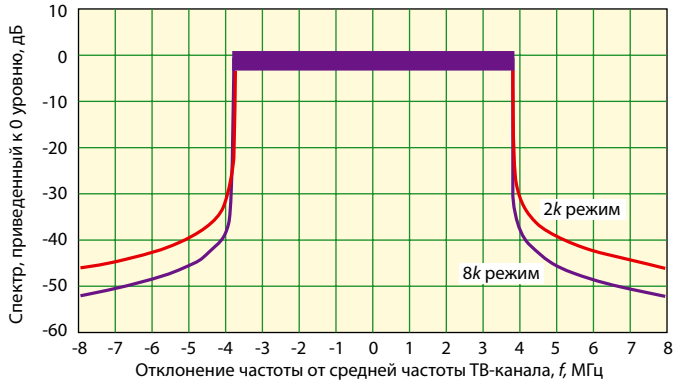


Рис. 5

4 кГц при отстройках от средней частоты канала в пределах 1,5 полосы канала.

A9 Измерим среднюю мощность P в полосе частот 7,61 МГц (режим 2k) на входе и выходе усилителя мощности:

$$P_{вх} = -0{,}566 \text{ дБм}; P_{вых} = 16 \text{ дБм}.$$

A10 Для сравнения полученных результатов исследований с теоретическими (рис. 5), приведенными в [1] (канал 8 МГц), спектр выходного *DVB-T*-сигнала *УМ* в режиме 2k (см. рис. 4, *б*) приведем к нулевому уровню (рис. 6).

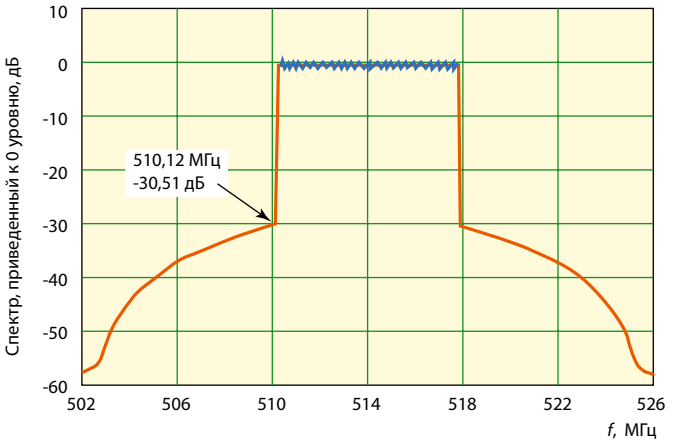


Рис. 6

Уровень спектра вне полосы пропускания близок к теоретическому [1]. Минимизация внеполосных излучений может быть достигнута выбором оптимальных параметров усилителя мощности (напряжения смещения, мощности возбуждения), а также параметров элементов цепей отрицательной обратной связи по току и напряжению.

При этом необходимо учитывать ограничения, связанные с обеспечением требуемой выходной мощности. В общем случае данная задача является многокритериальной.

3. Оценка интермодуляционных искажений УМ.

A11 Проведем измерения коэффициента интермодуляционных искажений K_{DVB} сигнала *DVB* (*ASPR* в [1]) на входе и выходе усилителя мощности:

$$K_{DVB\ вх} = -63{,}2 \text{ дБ}; K_{DVB\ вых} = -35{,}6 \text{ дБ}.$$

A12 Определим собственный уровень нелинейных искажений усилителя:

$$K_{DVB\ УМ} = -35{,}61 \text{ дБ}.$$

Интермодуляционные искажения в исследуемом усилителе мощности удовлетворяют требованиям, предъявляемым к усилителям цифровых ТВ-передатчиков.

4. Оценка интермодуляционных искажений УМ методом сравнения спектра измеряемого канала с маской.

При совместном использовании цифровых и аналоговых каналов требования к интермодуляционным характеристикам усилителя мощности значительно возрастают. В соответствии с [1] спектр выходного сигнала должен соответствовать спектральной маске, являющейся шаблоном для выходного сигнала ТВ-передатчика стандарта *DVB-T*.

Алгоритм построения спектральной маски:

A13 Исходными данными для построения спектральной маски выходного сигнала передатчика стандарта *DVB-T* в среде *MWO* (таблица) являются данные таблицы, приведенной на с. 39 в [1].

Данные для построения спектральной маски в среде *MWO* представим в текстовом формате, результаты которого сохраним в файле *Maska DVB.txt*.

A14 Выберем закладку *Project*, откроем раздел *Data Files*. В выплывающем окне выберем *Import Data File*. Импортируем текстовый файл *Maska DVB*, описывающий спектральную маску.

A15 Выберем раздел *Global Definitions* в структуре *Project*. Откроется окно *Global Definitions*, служащее для ввода переменных, постоянных величин и выражений, ко-

Относительная частота, МГц	Относительный уровень, дБ
–12	–120
–6	–95
–4,2	–83
–3,8	–32,8
3,8	–32,8
4,2	–83
6	–95
12	–120

торые могут использоваться в схемотехнических, системных проектах и для обработки данных.

A16 Для ввода выражений, обозначений выберем *Draw > Add Equation*.

A17 Введем значение центральной частоты цифрового ТВ-канала: F_c = 514e6 Гц.

Введем максимальное значение огибающей спектральной плотности мощности выходного сигнала *DVB* (см. рис. 4, *б*) усилителя мощности:

$$P_{DVB\,\max} = -6{,}68 \text{ дБ}.$$

Введем максимальное значение уровня спектральной маски (см. таблицу):

$$SM_{\max} = -32{,}8 \text{ дБ}.$$

Введем табличные данные, описывающие спектральную маску, в *DataFile* и преобразуем их в переменную *SM_data*:

$$SM_data = DataFile\ (Maska\ DVB).$$

где *SM_data* — наименование переменной; *DataFile* — функция, определяющая размещение переменной; *Maska DVB* — наименование исходных данных.

Преобразуем первый столбец введенных данных из относительных величин в абсолютные с учетом их размерности (в герцах):

$$SM_xData = SM_data\ [*,1]\times 1e6 + F_c,$$

где *SM_data* [*,1] — переменная, в которой используется первый столбец таблицы.

Преобразуем второй столбец введенных данных с учетом максимального значения огибающей спектральной плотности мощности $Pdvb_{\max}$ выходного сигнала *DVB*:

$$SM_yData = SM_data\ [*,2] + Pdvb_{\max} - SM_{\max}.$$

A18 Выберем раздел *Output Equations* и откроем соответствующее окно, в котором введем выражение

$$SM_plot = plot_vs\ (SM_yData,\ SM_xData),$$

где *plot_vs* — функция, подготавливающая данные для построения в прямоугольной системе координат.

A19 Создадим график в прямоугольной системе координат. Выберем параметры инструмента *Output Equations* → → *Eqn* → *SM_plot* → *OK*.

A20 Для оценки требований стандарта по внеполосным интермодуляционным искажениям при совместном использовании цифровых и аналоговых каналов построение маски *DVD-T* (рис. 7, пунктирная линия) необходимо совместить со спектром выходного сигнала усилителя мощности.

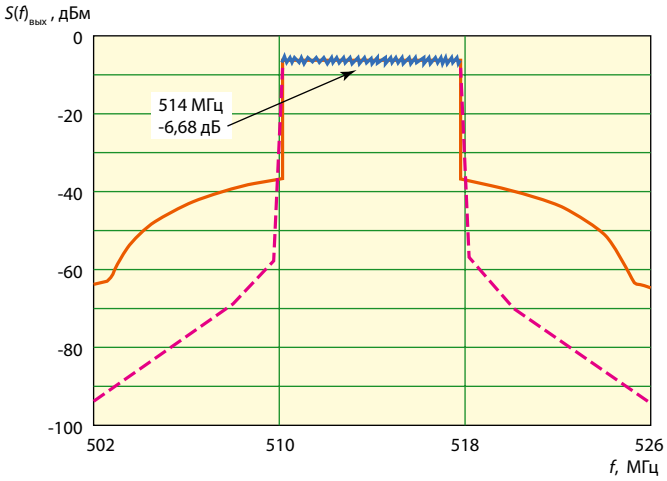


Рис. 7

A21 Анализ результатов исследования.

При наличии в соседних каналах аналогового сигнала стандартов *PAL*, *SECAM* в исследуемом усилителе целесообразно вначале минимизировать интермодуляционные искажения с использованием параметрической оптимизации элементов его схемы, а затем (если будет необходимо) ввести дополнительные фильтры, цепи коррекции с целью уменьшения внеполосных излучений и удовлетворения требований, заложенных в спектральной маске (см. рис. 7).

В результате в соответствии с рассмотренным алгоритмом *UM—VSS* создана программа *TUVSS* исследования тракта усиления мощности в среде *VSS*.

Заключение. В статье приведена методика исследования усилителя мощности сигналов *DVB-T*, *DVB-H* с использованием визуальной среды моделирования. Методика представлена в виде алгоритма *UM—VSS*, на основании которого создана программа *TUVSS* исследования тракта усиления мощности в среде *VSS*.

Интермодуляционные искажения в исследуемом усилителе мощности 35,61 дБ удовлетворяют требованиям, предъявляемым к усилителям цифровых передатчиков. Уровень спектра вне полосы пропускания близок к теоретическому [1] (см. рис. 5 и 6).

Из анализа полученных результатов (см. рис. 7) следует, что при совместном использовании цифровых и аналоговых каналов требования по минимизации интермодуляционных искажений значительно возрастают.

Техническая реализация усилителей мощности при совместном применении аналоговых и цифровых каналов усложнена по сравнению с реализацией усилителей мощности цифрового *DVB-T*-сигнала благодаря необходимости дополнительной фильтрации внеполосных излучений.

Минимизация внеполосных излучений может быть достигнута выбором активного элемента, параметров усилителя мощности: напряжения смещения, мощности возбуждения, элементов цепей отрицательной обратной связи по току и напряжению, а также использованием дополнительных фильтров и цепей коррекции.

Оптимизационная структурно-параметрическая задача минимизации внеполосных излучений является в общем случае многокритериальной, поскольку необходимо одновременно обеспечивать требуемую выходную мощность и ряд предельно допустимых параметров активного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Final draft ETSI EN 300744 V1.6.1 (2008—09). URL: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.06.01_40/en_300744 v010601 o.pdf (дата обращения 03.04.10).
2. **Карякин В.Л.** Устройства генерирования и формирования сигналов в системах подвижной радиосвязи: Учебник для вузов.— М.: Радио и связь, 2007.— 433 с.
3. **Артамонов А., Протопопов Л.** Передающее оборудование для цифрового телевещания//Электроника: Наука, Технология, Бизнес.— 2007.— № 8.— С. 44—47.
4. **Курушин А., Недера В.** Усилители мощности с высокой линейностью для базовых станций беспроводной связи//Новости микроэлектроники. URL: http://www.chipnews.ru/html.cgi/arhiv/02_07/2.htm (дата обращения 03.04.10).
5. Всё для телерадиовещания, HDTV, цифрового кино. URL: http://www.era-tv.ru/events/2009/ispitaniya.asp (дата обращения 03.04.10).
6. **Карякин В.Л.** Цифровое телевидение: Учебное пособие для вузов.— М.: СОЛОН-Пресс, 2008. — 272 с.

Получено 28.04.10