

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Абрамовой Евгении Сергеевны на тему:**

**«Анализ и разработка методов повышения энергетической эффективности усилителей мощности радиопередающих устройств»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

### **Актуальность работы.**

Актуальность диссертационной работы Е.С.Абрамовой определяется необходимостью исследования современных технологий и методов повышения энергетической эффективности мощных усилителей, в условиях перехода на цифровые методы передачи информации. К настоящему времени разработано немало методов повышения энергетической эффективности усилителей мощности. Следует, однако, отметить, что далеко не все из ранее предложенных методов актуальны для внедрения в настоящее время. Интенсивное развитие элементной базы и вычислительной техники, происходившее в последние десятилетия, сделало перспективными те из методов, которые были нереализуемы, или реализуемы лишь частично, по ряду технических причин.

В современных системах телерадиовещания идёт интенсивный переход на цифровые методы передачи информации с использованием технологии OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). За последние годы в мире по этой технологии стандартизовано по крайней мере несколько систем цифрового телерадиовещания, а также современные системы мобильной радиосвязи. Наличие в сигнале OFDM составляющих с квадратурной амплитудной модуляцией (КАМ) требует от усилительного тракта передатчика высокой линейности амплитудных и фазовых характеристик. Для обеспечения этих требований, мощность усилителей модулированных колебаний в режиме OFDM приходится уменьшать в несколько раз по сравнению с номинальной, переводя ряд его ступеней в режим колебаний первого рода (класс А), что приводит к падению промышленного к.п.д. передатчика. Эта особенность современных передатчиков делает проблему энергетической эффективности **особенно актуальной**. В определённой степени задача повышения энергетической эффективности усилителей мощности решается при использовании ключевых режимов (классы D, E), поэтому исследование частотных и диапазонных свойств ключевых режимов, выполненное в данной работе, вполне актуально. При усилении сигнала с переменной амплитудой возможно использование отдельного метода усиления сигналов КАМ, при котором в одном тракте передатчика усиливается ФМ составляющая сигнала с постоянной амплитудой, а во



втором - его огибающая, с последующим восстановлением сигнала на выходе.

Для реализации эффективного усиления низкочастотных составляющих огибающей возможно использование ключевого режима в усилителях с промежуточной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Решения, связанные с обеспечением линейности и устойчивости таких усилителей, предложенные в работе соискателя, **также актуальны.**

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение и приложения. Объем работы вместе с приложением составляет 132 стр., включая 81 рисунок, 4 таблицы, библиографический список включает 109 наименований.

*Во введении* проведен обзор методов повышения энергетической эффективности усилителей мощности (УМ) и модуляционных устройств, показаны достоинства ключевых режимов усиления, перспективность использования УМ класса D с промежуточной широтно-импульсной модуляцией и необходимость исследования частотных свойств усилителей.

*В первом разделе* проведен ретроспективный обзор методов повышения энергетической эффективности усилителей ВЧ в моногармоническом, бигармоническом и полигармоническом режимах. Показано, что предельно высокая эффективность усилителей инверторного типа и усилителей класса E достигается только в ограниченном частотном диапазоне. Обоснована необходимость проведения исследований частотной зависимости энергетических показателей усилителей в ключевом режиме.

*Во втором разделе* определены границы частотного диапазона эффективной работы последовательного и параллельного резонансных усилителей и ключевого усилителя с формирующим контуром. Показано, что оптимальный выбор параметров нагрузочной цепи позволяет существенно расширить полосу рабочих частот без перестройки колебательной системы.

*В третьей разделе* исследована схема ключевого модулятора с передачей энергии в нагрузку через индуктивный накопитель (ПЭИН), найдена регулировочная характеристика преобразователя ПЭИН, которая носит существенно нелинейный характер. Получены выражения для расчёта статических модуляционных характеристик (СМХ) преобразователя с ПЭИН, обладающих существенной нелинейностью. Разработана структурная схема компенсатора нелинейных искажений, защищённая патентом РФ на полезную модель, в которой источником компенсирующих сигналов служит физическая модель усилителя. Проведен анализ устойчивости широтно-импульсной системы (ШИС), охваченной цепью обратной связи. Анализ устойчивости нелинейных (ШИС) проведен посредством искусственного понижения порядка их линейной части.



Получен ряд аналитических выражений, обладающих практической значимостью.

*Четвёртый раздел* содержит результаты исследования предложенных моделей УМ классов D и E и экспериментальных исследований усилителей в режиме класса E и двухтактных усилителей в ключевом режиме. Результаты эксперимента подтверждают теоретические выводы.

#### **Новизна работы.**

В диссертации представлены новые научные результаты, наиболее существенными из них представляются следующие:

- методика расчета частотных свойств усилителей класса D и E по допустимому уровню снижения к.п.д. Установлено, что, в пределах перестройки частоты возбуждения  $\pm 10\%$  от частоты оптимальной настройки, снижение электронного к.п.д. усилителей этого типа не превышает 1,5 дБ. Работа усилителя в пределах отведенного диапазона частот без перестройки колебательной системы позволяет повысить его надёжность и оперативность перехода с одной частоты на другую.

- разработанный автором вариант построения модуляционного устройства с промежуточной ШИМ, отличающийся улучшенными эксплуатационными параметрами по сравнению с известными устройствами за счет исключения громоздкого модуляционного дросселя и упрощения системы управления силовым ключом.

- метод повышения линейности усиления в модуляторе нового типа с помощью компенсатора, который позволяет уменьшить коэффициент нелинейных искажений в 2,5 раза при сохранении устойчивости усилителя к самовозбуждению, защищенный патентом на полезную модель.

- новый метод анализа устойчивости широтно-импульсных систем (ШИС), охваченных цепью обратной связи, основанный на понижении исходного высокого порядка ШИС до 1-2 порядка, что существенно упрощает анализ их устойчивости. Полученные результаты применимы при анализе устойчивости определённого класса систем автоматического регулирования с широтно-импульсной модуляцией.

**Достоверность** теоретических и экспериментальных научных результатов работы подтверждается корректными аналитическими выкладками и физическим моделированием, а также сравнительным анализом результатов моделирования в среде PSPICE-V, в которой учтены параметры характеристик реальных усилительных приборов.

Исходные данные для научных исследований были получены из ведущих российских и зарубежных научных изданий, в том числе входящих в перечень, рекомендованный ВАК РФ.

**Практическая значимость диссертации** определяется тем, что разработанные автором методы и результаты исследований используются в



производственной деятельности ОАО «Ростелеком» и в учебном процессе в ФГОБУ ВПО СибГУТИ на кафедре радиотехнических устройств, и подтверждена соответствующими актами и патентом на полезную модель.

Можно отметить обоснованность научных положений, выводов и рекомендации.

Уровень апробации результатов диссертационной работы достаточно высок: ее содержание изложено в 18 публикациях, 5 из которых в ведущих рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ. Результаты работы докладывались на российских и международных научно-технических конференциях.

#### **Замечания по работе**

Несмотря на отмеченные достоинства, диссертационная работа не свободна от недостатков.

1. Первая глава диссертации носит скорее характер реферата, а не аналитического обзора, и не заканчивается постановкой конкретных задач дальнейших исследований. Не достаточно внимания уделено изучению переключателя напряжения (ПН) с четвертьволновой линией.

2. Автором выполнен анализ обобщенной схемы ключевого генератора с формирующим контуром в широком диапазоне рабочих частот и параметров схемы. Однако исследования проведены лишь на примере одного частного случая. Следовало бы провести анализ обобщенной схемы в широком диапазоне параметров, тем более что современные средства ВТ это позволяют, даже при сложных математических выкладках.

3. На рис.3.16 приведена схема коррекции нелинейных искажений с двумя физическими моделями, но нет описания её работы и оценки эффективности использования.

4. В разделах работы, посвященных усилителям с промежуточной ШИМ, не уделено должного внимания выбору тактовой частоты и параметров выходного фильтра, которые также в значительной мере определяют качественные показатели усилителя.

5. В работе нет анализа режимов  $F$ ,  $F_{инв}$ ,  $FE$ , по поводу классификации которых высказаны критические, но не достаточно обоснованные, замечания.

6. В разделе 4.6 диссертации не описана элементная база и технические характеристики усилителя в режиме класса E и двухтактного усилителя класса D в ключевом режиме. Не описаны методики и метрологическое обеспечение проведенных экспериментальных исследований.

7. В тексте диссертации и автореферате встречаются погрешности при ссылках на использованные формулы, не расшифрованные сокращения и некоторые обозначения в формулах, так на пример, в формуле (3.14) отсутствует правая часть равенства; имеются опечатки в формулах (2.43) и (2.44) и т.п.



В целом, отмеченные недостатки не снижают ценности диссертационной работы, выполненной Е.С.Абрамовой.

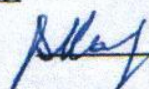
### **Заключение**

Диссертация Абрамовой Е.С. является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной самостоятельно на хорошем научно-техническом уровне, и отличающейся внутренним единством и последовательностью изложения. Полученные автором результаты достоверны, выводы и заключения обоснованы. Диссертация написана доходчиво, грамотно, очень аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом имеются выводы. Новые научные результаты, полученные автором, имеют важное прикладное значение, т.к. разработанные методы повышения энергетических и качественных показателей позволят эффективно использовать усилители мощности и найдут применение при разработке отечественных радиопередатчиков.

**Автореферат** написан ясным и грамотным языком, хорошо оформлен и полно отражает основное содержание диссертации.

Считаю, что представленная диссертация по своей теоретической и практической значимости соответствует требованиям п.3 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013г. №842) для ученой степени кандидата наук, а ее автор, Абрамова Евгения Сергеевна, заслуживает **присуждения ученой степени** кандидата технических наук по специальности 05.12.04 - «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения».

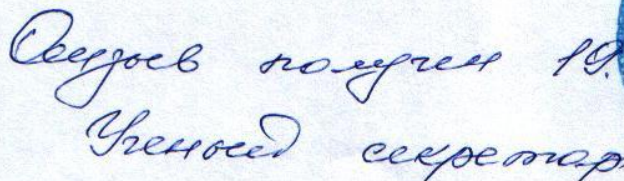
Официальный оппонент,  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Средства связи и информационная безопасность»  
ОмГТУ, действительный член МАИ и МАНВШ  
Майстренко Василий Андреевич

 /Майстренко В.А./

644050, г. Омск-50, пр. Мира, 11  
ФГБОУ ВПО «Омский государственный  
технический университет» (ОмГТУ),  
кафедра «Средства связи и информационная  
безопасность». Телефон: (3812) 65-85-60.  
E-mail: mva@omgtu.ru.

Подпись д.т.н., профессора Майстренко В.А. удостоверяю  
Учёный секретарь университета

 /Немцова А.Ф./

  
Ученый секретарь