

На правах рукописи



Сивчек Игорь Владимирович

Повышение КПД и выходной мощности оконечных каскадов
связных радиопередающих устройств диапазонов ОНЧ – НЧ
на генераторных лампах

Специальность: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2017

Место выполнения диссертации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»).

Научный руководитель: Сороцкий Владимир Александрович, доктор технических наук, доцент.

Официальные оппоненты: Дмитриков Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», почетный профессор; Александров Владимир Александрович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Акционерное общество «Концерн «Океанприбор», начальник научно-исследовательской лаборатории.

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Российский институт мощного радиостроения» (ПАО «РИМР»).

Защита состоится 22 июня 2017 года в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.01 при ФГАОУ ВО «СПбПУ» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, учебный корпус 4, аудитория 305.

Места ознакомления с диссертацией до защиты:
Фундаментальная библиотека ФГАОУ ВО «СПбПУ»;
сайт ФГАОУ ВО «СПбПУ» www.spbstu.ru.

Дата рассылки автореферата: « » апреля 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д. т. н., профессор

Коротков Александр Станиславович



Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

На протяжении длительного времени электромагнитные волны диапазонов ОНЧ – НЧ находят применение в системах дальней радиосвязи, радионавигации («Loran», «Чайка») и службах точного времени («Бета»). Излучение радиопередающих устройств (РПДУ) данных диапазонов находит также применение при прогнозировании землетрясений и исследованиях магнитосферы.

Учитывая, что дальность действия систем радиосвязи и радионавигации может достигать нескольких тысяч километров, а также то, что в нижней части диапазона ОНЧ КПД антенн может составлять менее десяти процентов, выходная мощность соответствующих РПДУ, как правило, достигает сотен киловатт – единиц мегаватт. Несмотря на успехи, достигнутые в совершенствовании силовой полупроводниковой элементной базы, позволившие реализовать РПДУ с выходной мощностью до 2 МВт, по-прежнему актуальными остаются исследования, направленные на повышение энергетической эффективности РПДУ, в оконечных каскадах (ОК) которых используются электронно-вакуумные лампы (ЭВЛ). Это вызвано следующими причинами: 1) ламповые ОК позволяют получать более высокие выходные мощности; 2) переход на полупроводниковую элементную базу может потребовать дополнительные капиталовложения в модернизацию инфраструктуры существующих радиопередающих центров, которая в настоящее время адаптирована под использование ламповых ОК; 3) наличие конструкторских и технологических решений, отработанных в ходе многолетней практики, что имеет большое значение в случае РПДУ с выходной мощностью в сотни киловатт и более. Важно отметить, что промышленный КПД современных ламповых РПДУ может достигать 75 %, приближаясь к показателям, характерным для полупроводниковых аналогов.

При проектировании ламповых ОК по-прежнему превалирует использование графо-аналитических методов расчета. Внедрение компьютерных методов моделирования, которые уже не одно

десятилетие успешно применяются в смежных областях электроники и радиотехники, позволило бы повысить точность расчета стационарных и переходных режимов работы, а также снизить затраты времени и средств на разработку РПДУ.

Фактором, сдерживающим применение моделирования при разработке мощных РПДУ, является отсутствие компьютерных имитационных моделей мощных генераторных ламп, предназначенных для использования в программах схемотехнического моделирования. Успешное решение задачи разработки имитационных моделей мощных генераторных ламп позволило бы повысить эффективность исследования характеристик ОК класса E , которые привлекают в последние годы внимание специалистов благодаря своим высоким энергетическим показателям. В то же время хорошо известно, что по уровню своей сложности усилитель класса E и в теоретической части, и в вопросах практической реализации существенно превосходит усилители классов B , C и D , которые широко применяются при построении мощных ОК.

Не менее актуальным является развитие аналитических методов расчета, используемых для нахождения значений номиналов элементов и параметров управления активным элементом (АЭ) усилителя, что позволяет заметно снизить трудоемкость и ресурсоемкость последующего компьютерного моделирования. При этом существующие аналитические модели усилителей класса E основаны на ряде допущений, которые могут не выполняться в случае мощных ламповых ОК диапазонов ОНЧ – НЧ. Это обстоятельство заметно снижает точность и применимость данных аналитических моделей.

Указанная совокупность факторов делает актуальным проведение исследований, направленных на решение перечисленных выше проблем, сдерживающих дальнейшее повышение энергетической эффективности ламповых ОК РПДУ диапазонов ОНЧ – НЧ.

Степень разработанности темы исследования

Среди публикаций, в которых рассматриваются ламповые ОК РПДУ диапазонов ОНЧ – НЧ следует особо отметить монографию

Э. В. Сырникова¹. Помимо теоретических расчетов, относящихся к ламповому усилителю класса E , в ней приведены чрезвычайно ценные сведения о результатах практического внедрения. В частности, отмечено, что КПД анодной цепи ОК достигает значений 88...93 %, а также указан применяемый на практике способ управления АЭ, в качестве которого используется генераторный тетрод. Данный способ управления (фиксированное напряжение на экранной сетке; импульсы напряжения прямоугольной формы на управляющей сетке) не обеспечивает минимально возможные мощности, рассеиваемые на сетках тетрода. А поскольку эти мощности являются фактором, ограничивающим увеличение КПД анодной цепи усилителя при фиксированной выходной мощности, либо ограничивающим увеличение выходной мощности при фиксированном КПД анодной цепи, то следует исследовать альтернативные способы управления ЭВЛ. Один из возможных подходов к решению данной проблемы упомянут А. Д. Артымом^{2,3} (форма напряжения возбуждения в проводящем состоянии приближенно повторяет форму анодного тока), однако его практическая реализация затруднена ввиду высокой сложности при работе в полосе частот, характерной для связных РПДУ.

Математические модели лампового усилителя класса E рассмотрены в работах А. Д. Артыма (1980, 1987) и Э. В. Сырникова (2013). Однако эти модели имеют ряд допущений (бесконечно большие значения номиналов разделительных элементов усилителя; идеализация АЭ; условие моногармоничности напряжения на выходе усилителя), которые на практике могут выполняться далеко не всегда. Вследствие этого возможно отклонение характеристик усилителя, рассчитанного с использованием данных моделей, от требуемых величин на десятки процентов. Это обуславливает потребность в

¹ Сырников Э.В. Построение ключевых радиопередающих устройств большой мощности. СПб: Политехнический университет, 2013.

² Артым А.Д. Усилители класса D и ключевые генераторы в радиосвязи и радиовещании. Москва: Связь, 1980. 209 с.

³ Артыма А.Д., ред. Повышение эффективности мощных радиопередающих устройств. Москва: Радио и Связь, 1987. 174 с.

более точных математической модели и методике расчета усилителя класса E на ее основе.

Работа лампового усилителя класса E в полосе частот рассмотрена в монографии Э. В. Сырникова (2013). Номиналы элементов нагрузочной цепи считались перестраиваемыми, однако сделано предположение о возможности синтеза неперестраиваемой нагрузочной цепи. Ее реализация позволила бы упростить процедуру настройки РПДУ при эксплуатации, что имеет практическую ценность. Отметим близкие по тематике недавние публикации Ф. Х. Ортега-Гонсалеса (2010, 2013), К. Чена и Д. Пироюлиса (2011), Ш. Н. Али и Т. Джонсона (2012), в которых рассмотрена работа транзисторных усилителей класса E в полосе частот при фиксированных номиналах пассивных элементов усилителя и нагрузочной цепи.

Моделям ЭВЛ, созданным на основе данных для сравнительно маломощных ламп, для *SPICE*-подобных программ схемотехнического моделирования посвящены работы компании *Intusoft* (1989), В. М. Лича мл. (1995), Ч. Райдела (1995), Д. Мунро (1996 – 1998), Н. Корена (1997), Д. Рифмана (2013 – 2016). Общим недостатком данных моделей является низкая точность воспроизведения тока управляющей сетки. Модель мощной ЭВЛ представлена в работе С. Чжэна и Дж. Кина (2003). Ограничением этой модели является сравнительно низкая точность воспроизведения статических характеристик некоторых ламп, что, в частности, проявилось в случае тетродов *TH 576* и *ГУ-104АМ*, перспективных для построения ОК, которые рассматриваются в настоящей работе. Разработка методики создания моделей мощных ЭВЛ для *SPICE*-подобных симуляторов и создание моделей ламп, пригодных для построения ОК РПДУ диапазонов ОНЧ – НЧ, позволит повысить точность расчета электрических характеристик ОК и за счет этого сократить затраты времени и средств на этапе экспериментальной отработки.

Цель и задачи

Целью работы является повышение КПД и выходной мощности ламповых оконечных каскадов радиопередающих устройств диапазонов ОНЧ – НЧ путем определения рациональных режимов их

работы с учетом реальных свойств элементной базы и разработки новых способов управления генераторными лампами на основе использования компьютерных моделей.

Задачи:

1. Развитие математической модели усилителя класса E в части учета падения напряжения на выводах анод – катод активного элемента и конечных значений номиналов разделительных элементов.

2. Разработка методики расчета усилителей класса E на основе математической модели, указанной в пункте 1.

3. Определение входных характеристик нагрузочной цепи, обеспечивающей работу усилителя в классе E с заданным коэффициентом перекрытия поддиапазона частот без перестройки пассивных элементов усилителя и нагрузочной цепи, при постоянных выходной мощности и КПД анодной цепи.

4. Разработка и апробация методики создания имитационных моделей мощных генераторных тетродов и триодов для *SPICE*-подобных программ схемотехнического моделирования, учитывающих, в том числе зависимость тока управляющей сетки от напряжений на электродах лампы.

5. Разработка компьютерных моделей усилителей класса E с использованием предложенных моделей ламп различных типов и определение их характеристик.

6. Исследование способов управления генераторной лампой в усилителе класса E , обеспечивающих уменьшение мощностей, рассеиваемых на сетках лампы, при заданных выходной мощности и КПД анодной цепи.

Научная новизна

1. Усовершенствована математическая модель лампового усилителя класса E , разработанная на основе метода гармонического баланса, что позволило, в отличие от ранее использовавшихся моделей, осуществить расчет энергетических характеристик усилителя с учетом реальных свойств генераторных ламп и конечных значений номиналов разделительных элементов.

2. Определены входные характеристики нагрузочной цепи, позволяющие решить задачу синтеза нагрузочной цепи лампового усилителя класса E для работы в полосе частот при фиксированных

номиналах элементов усилителя и нагрузочной цепи, а также заданных допустимых изменениях выходной мощности и КПД анодной цепи.

3. Решена задача аппроксимации статических характеристик генераторных ламп (тетрода и триода), позволившая описать ток управляющей сетки с учетом влияния напряжений на аноде и экранной сетке. С учетом подхода, использованного при нахождении аппроксимирующих функций, предложена методика создания имитационных моделей генераторных ламп для *SPICE*-подобных программ схемотехнического моделирования.

4. Определены законы изменения управляющих напряжений на сетках генераторной лампы, обеспечивающие снижение рассеиваемой на них мощности на основе учета временной зависимости анодного тока ЭВЛ в усилителе класса *E*.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов усиления мощности колебаний диапазонов ОНЧ – НЧ в части разработки усовершенствованной математической модели лампового усилителя класса *E*. В сравнении с ранее существовавшими моделями, предложенная модель позволяет повысить точность расчета характеристик ОК за счет учета реальных свойств элементной базы. Модель может быть использована при исследовании усилителей различных диапазонов частот и выходных мощностей, а при соответствующей модификации она позволяет описывать усилители других классов.

Разработан алгоритм создания имитационных моделей мощных ЭВЛ. Предложены новые функции для аппроксимации статических характеристик генераторных ламп.

Определены законы изменения управляющих напряжений на сетках ламп, обеспечивающие улучшение энергетических характеристик ОК.

Практическая значимость работы заключается в повышении КПД анодной цепи, увеличении выходной мощности, снимаемой с генераторных ламп ОК РПДУ, а также уменьшении мощностей, рассеиваемых на сетках ЭВЛ.

Методология и методы исследования

В работе использованы следующие общенаучные методы исследования: сравнение, описание, измерение, формализация, анализ, синтез, абстрагирование, обобщение, идеализация, индукция, дедукция, аналогия.

К специальным методам исследования, использованным в работе можно отнести: метод гармонического баланса, методы вычислительной математики, компьютерное имитационное моделирование электронных схем.

Положения, выносимые на защиту

1. Учет падения напряжения на выводах анод – катод генераторной лампы, а также конечных значений номиналов разделительных элементов позволяет уменьшить максимальную погрешность расчета характеристик лампового усилителя класса E с 40 %, присущих применявшимся ранее моделям, до уровня 10 %.

2. Реализация полученного в работе закона изменения входного сопротивления нагрузочной цепи в полосе частот с коэффициентом перекрытия 1,4 обеспечивает относительные отклонения выходной мощности и КПД анодной цепи не более, соответственно, 10 % и 2 % без перестройки элементов нагрузочной цепи и усилителя.

3. Учет влияния напряжений на выводах анод – катод и экранная сетка – катод генераторного тетрода на ток управляющей сетки позволяет уменьшить погрешность аппроксимации данного тока с 9 % до 3 % и связанную с ней ошибку вычисления рассеиваемой на сетке мощности.

4. Формирование управляющих напряжений на сетках генераторной лампы в усилителе класса E с учетом закона изменения анодного тока позволяет повысить КПД анодной цепи на 5 % до величин около 95 % при заданной выходной мощности, либо увеличить выходную мощность на 10...20 % при КПД, равном 90 %.

Степень достоверности и апробации результатов

Результаты работы были представлены на II международной научно-технической конференции «Радиотехника, электроника и связь – 2013» (Омск, в рамках X Международной выставки высокотехнологичной техники и вооружения, 2013), XI международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов, СГТУ им.

Гагарина, 2014); XII международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Саратов, СГТУ им. Гагарина, 2016).

Представленные материалы внедрены при выполнении работ по модернизации связанных РПДУ с выходной мощностью до 2 МВт по заказу АО «ОНИИП».

Основное содержание работы

1. Особенности оконечных каскадов радиопередающих устройств систем связи диапазонов ОНЧ – НЧ. Глава посвящена развернутому обоснованию цели и задач работы.

В разделе 1.1 приводится анализ применимости современных силовых активных элементов (АЭ) для создания оконечных каскадов (ОК) радиопередающих устройств (РПДУ) диапазонов ОНЧ – НЧ. Отмечается, что несмотря на пригодность таких полупроводниковых приборов, как *IGBT* и *MOSFET*, сохраняют актуальность ОК на мощных генераторных лампах. В случае существующих РПДУ, при условии использования отечественных ОК, замена лампового ОК на полупроводниковый аналог требует времени на его разработку, а также капиталовложений для замены инфраструктуры РПДУ, рассчитанной на использование лампового ОК. Кроме того, мощные генераторные лампы остаются вне конкуренции со стороны полупроводниковых приборов по значению максимальной выходной мощности, приходящейся на один прибор. Так, например, тетрод *4СМ2500КГ (СР1)* способен отдавать в нагрузку мощность 3,5 МВт, тогда как выходная мощность известных полупроводниковых РПДУ диапазонов ОНЧ – НЧ ограничена величиной 2 МВт.

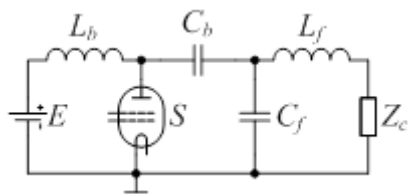


Рисунок 1

В разделе 1.2 анализируется схемотехника мощных ламповых ОК. Усилители класса *C*, которые долгое время применялись на практике, уступают усилителям классов *D* и *E* по показателю КПД. Промышленный КПД РПДУ в случае использования в ОК усилителя класса *C* составляет лишь 45 %.

Генератор с переключением напряжения (ГПН) имеет частотные ограничения, а кроме того требует применения высоковольтных диодов. И, наконец, усилитель класса E (см. рис. 1; форма напряжения на нагрузке Z_c приближенно моногармоническая), который нашел применение при модернизации РПдУ, ОК которых ранее работали в классе C , характеризуется КПД анодной цепи около 90 % и отсутствием недостатков, указанных для ГПН. Промышленный КПД РПдУ при этом достигает 75 %. Тем не менее здесь отмечаются существующие проблемы, связанные с ламповым усилителем класса E : 1) ограниченная применимость существующих математических моделей данного усилителя; 2) работа лампового усилителя класса E в полосе частот без перестройки пассивных элементов усилителя и нагрузочной цепи; 3) управление генераторной лампой, обеспечивающее минимизацию мощностей, рассеиваемых на ее сетках.

В разделе 1.3 рассмотрены существующие компьютерные имитационные модели электронно-вакуумных ламп (ЭВЛ). Проводится анализ возможности их применения для описания электрических характеристик мощных генераторных тетродов. Отмечается, что рассматриваемые модели не учитывают в полной мере зависимость тока управляющей сетки тетрода от напряжений на аноде и экранной сетке. В результате делается вывод о необходимости разработки методики создания моделей генераторных ламп, а также создании *PSPICE*-моделей конкретных ламп (*TH 576*, *ГУ-104АМ*, *ГУ-88А*) с целью их дальнейшего применения при исследовании электрических процессов в ОК.

Итогом главы 1 является формулирование цели и задач работы в разделе 1.4.

2. Математическое описание усилителя мощности класса E .

В данной главе описывается математическая модель лампового усилителя класса E , лишенная некоторых ограничений других моделей. Приводятся методика расчета усилителя класса E и пример неперестраиваемой нагрузочной цепи для работы в полосе частот. Решаются задачи 1, 2 и 3.

В разделе 2.1 описана математическая модель лампового усилителя класса E . Модель предназначена для расчета

стационарного режима работы усилителя. В ее основе лежит метод гармонического баланса⁴, используемый в некоторых современных программах схемотехнического моделирования. В данной модели отсутствуют следующие ограничения, характерные для других известных моделей: нет предположения о бесконечности номиналов разделительных элементов L_b и C_b усилителя; есть возможность описать случай непостоянного напряжения на АЭ в проводящем состоянии. С использованием данной модели рассчитаны номиналы элементов формирующего контура L_f и C_f для некоторых наборов параметров усилителя, которые могут иметь практическую значимость. Результаты приведены в приложении 1 диссертации.

В разделе 2.2 приводится методика расчета одноконтурного и двухконтурного усилителей класса E на основе результатов расчета по вышеуказанной математической модели. Исходными данными для расчета являются: напряжение анодного питания; требуемый КПД анодной цепи; рабочая частота; нормированная длительность проводящего состояния АЭ; требуемая выходная мощность; нормированные реактивные сопротивления элементов L_b и C_b ; выходная емкость АЭ; фазовый сдвиг между первыми гармониками напряжения и тока нагрузки.

В разделе 2.3 выведены требования к управляющему активным элементом воздействию и сопротивлению нагрузочной цепи, обеспечивающие работу в полосе частот с заданными КПД и выходной мощностью при фиксированных номиналах элементов усилителя и нагрузочной цепи. В режиме класса E должны выполняться два требования в момент перехода АЭ в проводящее состояние: 1) отсутствие скачкообразного изменения напряжения на АЭ; 2) равенство нулю тока АЭ. При работе в полосе частот к ним добавляется условие постоянства выходной мощности усилителя. В результате для их выполнения при фиксированных номиналах L_f и C_f используются 3 свободные переменные: длительность проводящего состояния АЭ, а также активная R_c и реактивная X_c части сопротивления нагрузки. Зная частотные зависимости R_c и X_c , можно перейти к синтезу нагрузочной цепи, воспроизводящей данные

⁴ Maas S.A. Nonlinear Microwave and RF Circuits. 2nd ed. Artech House, 2003. 608 pp.

зависимости в требуемой полосе частот. В качестве примера были синтезированы две цепи с коэффициентами перекрытия поддиапазона частот, равными 1,3 и 1,4.

3. Аппроксимация характеристик генераторных ламп и ее реализация в системах автоматизированного проектирования. Глава посвящена созданию *PSPICE*-моделей генераторных ламп. Решается задача 4.

В разделе 3.1 дается общее описание предлагаемых моделей. Динамические свойства лампы в диапазонах ОНЧ – НЧ могут быть описаны постоянными межэлектродными емкостями. Их учет в *PSPICE*-моделях ЭВЛ не представляет трудности. Для воспроизведения статических характеристик ламп используются аппроксимирующие функции, относящиеся к классу сложных функций.

В разделе 3.2 приводится разработанная методика создания моделей генераторных триодов и тетродов. В частности, она охватывает следующие стадии: 1) автоматизированный перевод графических данных о статических характеристиках лампы к табличному виду; 2) выбор существующей или нахождение новой аппроксимирующей функции; 3) создание модели для интересующей среды схемотехнического моделирования.

В разделе 3.3 содержится описание процесса создания и анализ модели генераторного тетрода *ТН 576*. Возможный подход к нахождению аппроксимирующих функций подробно показан на примере нахождения аппроксимирующей функции для тока анода. Проводится анализ критериев поиска коэффициентов аппроксимирующих функций.

В разделах 3.4 и 3.5 описывается создание и анализ моделей отечественных генераторных ламп – тетрода ГУ-104АМ и триода ГУ-88А.

Данные о точности аппроксимации статических характеристик ламп приведены в табл. 1.

Во всех трех моделях общей, но с различными коэффициентами, является функция, аппроксимирующая токи анодов. Токи экранных сеток *ТН 576* и ГУ-104АМ аппроксимируются различными функциями. Для аппроксимации токов управляющих сеток *ТН 576*,

ГУ-104АМ и ГУ-88А найдены различные функции, учитывающие зависимости от напряжений на электродах ламп. Коды (*netlists*) моделей приводятся в приложении 2 диссертации.

Таблица 1

ЭВЛ	Нормированная среднеквадратическая ошибка, %		
	для I_p	для I_s	для I_g
ТН 576	2,1	4,2	2,4
ГУ-104АМ	2,2	4,1	2,5
ГУ-88А	0,8	–	2,3

I_p – ток анода; I_s – ток экранной сетки; I_g – ток управляющей сетки.

4. Энергетические характеристики усилителей класса E на генераторных лампах. В данной главе проводится исследование стационарных режимов работы усилителей класса E с использованием компьютерного имитационного моделирования. Решаются задачи 5, 6 и достигается цель работы.

В разделе 4.1 проводится анализ точности математической модели и методики расчета, представленных в разделах 2.1 и 2.2. Отклонения основных характеристик усилителя (КПД; выходная мощность; максимальные напряжение и ток анода АЭ; максимальное напряжение на нагрузке; мощность, рассеиваемая анодом) от требуемых значений лежит в пределах 6 %. При этом обеспечивается требуемый режим работы. Для усилителей, рассчитанных по альтернативной методике, отклонение характеристик лежит в пределах 37 %, а режимы работ отличаются от требуемого.

В разделе 4.2 проводится сравнительный анализ усилителей класса E на основе различных генераторных ламп (ТН 576, ГУ-104АМ и ГУ-88А). Как и следовало ожидать, использование триода приводит к необходимости обеспечивать большую мощность управляющего воздействия, чем в случае тетродов.

В разделе 4.3 анализируется различные способы управления генераторной лампой в усилителе класса E на примере тетрода ТН 576. Применяемый в настоящее время на практике способ управления заключается в подаче на управляющую сетку последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы

при фиксированном напряжении на экранной сетке (см. рис. 2; способ управления 1), причем, поскольку напряжение на аноде в проводящем состоянии в течение некоторого интервала времени оказывается меньшим, чем напряжение на экранной сетке (см. рис. 3), на последней рассеивается бóльшая мощность, чем могла бы быть при ином управлении.

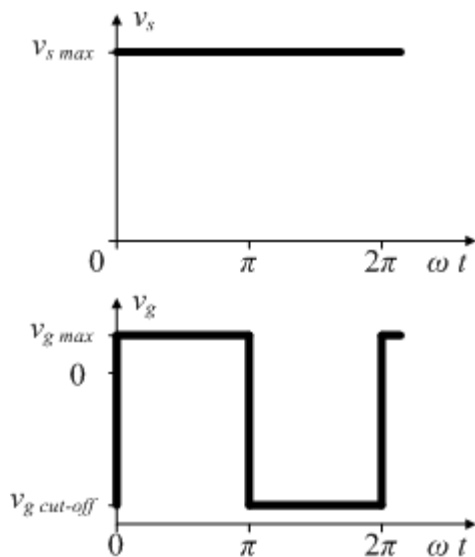


Рисунок 2

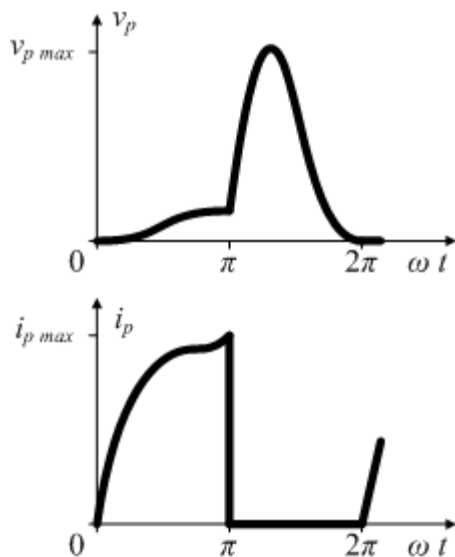


Рисунок 3

Как альтернатива данному методу возбуждения рассматривается способ, обеспечивающий постоянство падения напряжения на аноде в проводящем состоянии. При фиксированном напряжении на экранной сетке, на управляющую сетку подаются импульсы отпирающего напряжения, приближенно повторяющие форму импульса анодного тока (см. рис. 4; способ управления 2). За счет данного способа управления, мощности, потребляемые по сеточным цепям лампы, могут быть снижены приблизительно в 2 раза, при равных КПД анодной цепи и выходной мощности. Другой анализируемый способ управления заключается в подаче на экранную сетку импульсов напряжения четверть-синусоидальной формы (см. рис. 5; способ управления 3). При этом на управляющую сетку подаются импульсы

напряжения прямоугольной формы. Этот способ приводит к уменьшению мощности, потребляемой по цепи экранной сетки, приблизительно в 2 раза по сравнению со способом 1. Несмотря на уменьшение потребляемых мощностей, использование 2 и 3 способов управления на практике может быть сопряжено с трудностями реализации устройства управления.

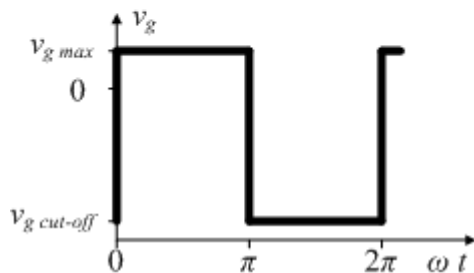
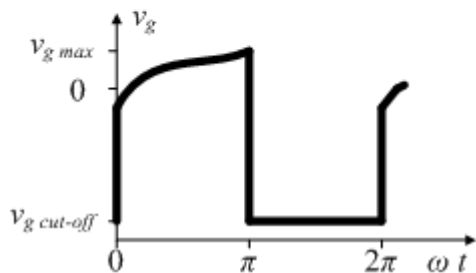
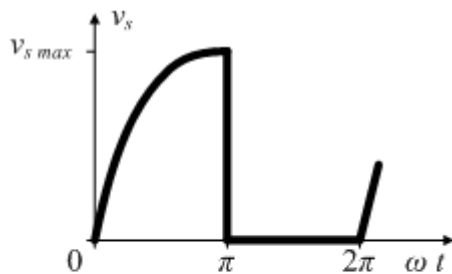
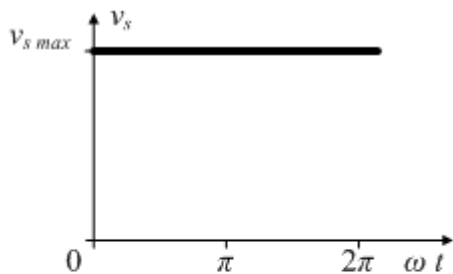


Рисунок 4

Рисунок 5

В разделе 4.4 предложены новые способы управления генераторными лампами. Их анализ также проводится на примере тетрода *ТН 576*. В первом случае на экранную сетку подается напряжение фиксированной величины, а на управляющую сетку подаются импульсы напряжения многоступенчатой формы (см. рис. 6; способ управления 4). Мощности, потребляемые по сеточным цепям, при этом могут быть уменьшены приблизительно на 30 % и более по сравнению с применяемым в настоящее время способом управления. Во втором случае импульсы напряжения подаются как на экранную, так и управляющую сетки (рис. 7; способ управления 5).

Практический интерес может представлять подача на экранную сетку импульсов одноступенчатой формы. За счет этого можно

достичь уменьшения мощности, потребляемой экранной сеткой, на 20 % и более.

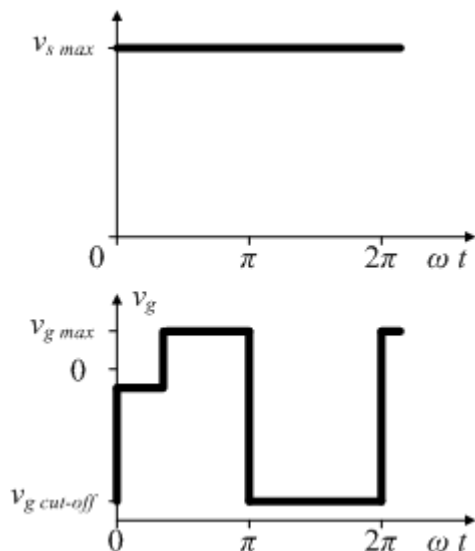


Рисунок 6

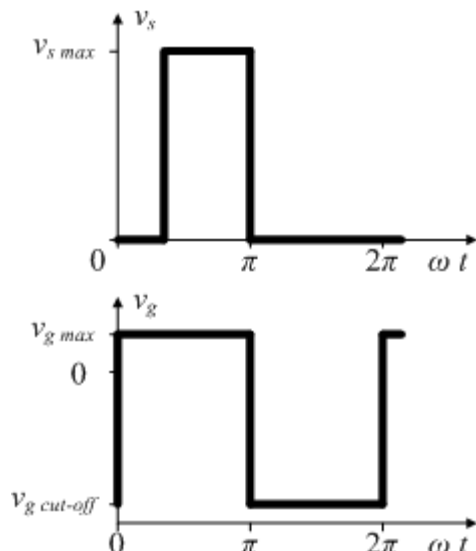
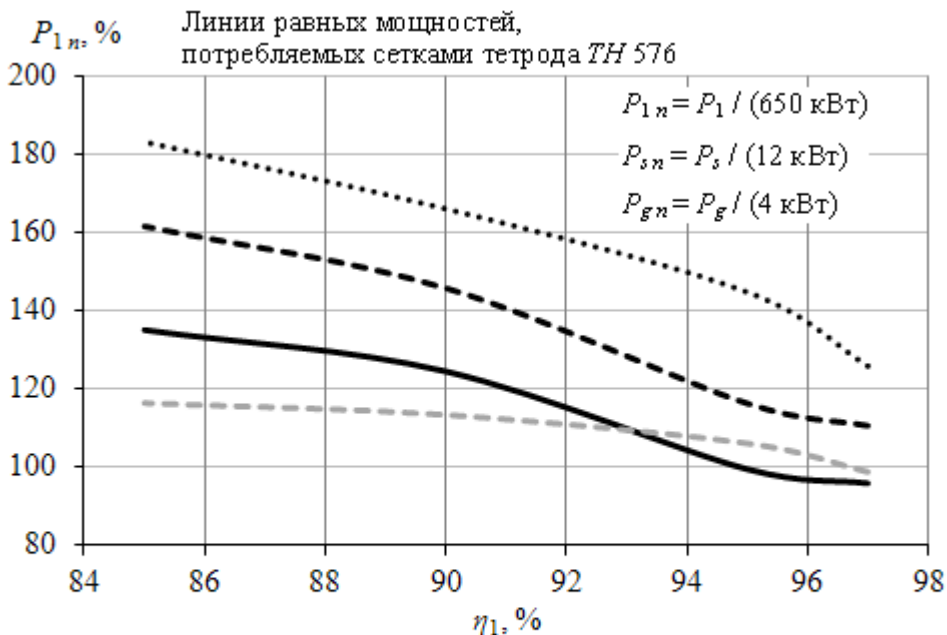


Рисунок 7

Здесь же показано, что за счет более эффективных способов управления генераторной лампой можно достичь более высоких значений КПД анодной цепи или увеличить выходную мощность, приходящуюся на АЭ (см. рис. 8).

В разделе 4.5 проведен анализ работы усилителя класса E в полосе частот с нагрузочными цепями, синтезированными на основе данных из раздела 2.3. Номиналы элементов усилителя и нагрузочной цепи при этом являются фиксированными. Отклонение КПД анодной цепи от заданной величины находится в пределах 2 % в полосе частот, а отклонение выходной мощности – в пределах 5 % при коэффициенте перекрытия поддиапазона частот 1,3 и 10 % при коэффициенте перекрытия 1,4.



Способы управления

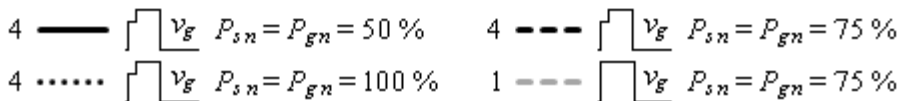


Рисунок 8

Заключение

1. Предложена усовершенствованная математическая модель лампового усилителя класса *E*, разработанная на основе метода гармонического баланса в матричной форме, которая за счет учета конечных величин разделительных элементов, а также падения напряжения на выводах анод – катод в проводящем состоянии позволила снизить максимальную погрешность расчета основных электрических характеристик с имевших место в применявшихся ранее моделях 40 % до уровня, не превышающего 10 %.

2. К числу достоинств указанной модели в сравнении с существующими аналогами следует отнести возможности:

○ расчета характеристик при полигармоническом характере тока и напряжения на выходе усилителя по вещественной и мнимой частям входного сопротивления нагрузки без точного знания ее структуры;

○ учета инерционных свойств активного элемента.

Последнее преимущество делает перспективным применение модели не только для расчета усилителей на генераторных лампах, но и в случае использования активных элементов других типов.

3. На основе предложенной модели создана инженерная методика расчета однотактного и двухтактного усилителей класса *E*.

4. Синтезированы нагрузочные цепи, обеспечивающие работу в полосе частот с коэффициентами перекрытия поддиапазона, равными 1,3 и 1,4, при фиксированных номиналах элементов усилителя и нагрузочной цепи. Для предложенных цепей отклонение выходной мощности в полосе частот лежит в пределах, соответственно, 5 % и 10 %, а снижение КПД анодной цепи не превышает 2 %.

5. Разработана методика создания моделей генераторных ламп для *SPICE*-подобных программ схемотехнического моделирования, предполагающая использование математического класса сложных функций для аппроксимации статических характеристик ламп.

6. С использованием предложенной методики разработаны *PSPICE*-модели ряда мощных генераторных ламп (*ТН 576*, *ГУ-88А*, *ГУ-94А*, *ГУ-104АМ*), представляющих практический интерес при построении оконечных каскадов радиопередающих устройств диапазонов ОНЧ – НЧ с выходными мощностями порядка сотен киловатт – единиц мегаватт.

7. С применением вышеуказанных моделей ламп разработаны компьютерные модели ламповых усилителей класса *E* и исследованы их характеристики. Показано, что применяемый на практике способ управления лампой в усилителе класса *E*, не обеспечивает минимально возможных мощностей, рассеиваемых на сетках, при заданных КПД анодной цепи и выходной мощности.

8. Предложены новые способы управления генераторными лампами, которые позволяют уменьшить мощности, рассеиваемые на сетках ламп приблизительно в 2 раза в сравнении с применяемым в настоящее время способом управления. Показано, что полученный

выигрыш может быть использован для увеличения выходной мощности на 10...20 % при фиксированном КПД анодной цепи, равном 90 %, либо для увеличения КПД анодной цепи до значения примерно 95 % при фиксированной выходной мощности.

Список работ, опубликованным автором по теме диссертации

1. Сивчек И.В., Сороцкий В.А. Имитационное моделирование ламповых оконечных каскадов мощных радиопередающих устройств диапазонов ОНЧ...НЧ // Радиотехника, электроника и связь. Сборник докладов II Международной научно-технической конференции. 1-4 октября 2013 г., Омск, 2013. С. 386-389.

2. Сивчек И.В., Сороцкий В.А. Имитационная модель мощного генераторного тетрода // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. № 6 (186), с. 53-58.

3. Сивчек И.В., Сороцкий В.А. Усилитель класса E на мощных генераторных лампах // Электромагнитные волны и электронные системы. Москва: Изд-во Радиотехника, 2014. № 7, с. 63-68.

4. Сивчек И.В. SPICE-модель генераторного тетрода // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Международной научно-технической конференции: в 2 т. 25-26 сентября 2014 г., Саратов: Буква, 2014. Т. 1, с. 96-100.

5. Сивчек И.В., Сороцкий В.А. Улучшение энергетических характеристик ламповых усилителей мощности класса E на основе новых подходов к формированию управляющих напряжений // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Международной научно-технической конференции: в 2 т. 22-23 сентября 2016 г., Саратов: Амирит, 2016. Т. 1, с. 130-134.

6. Сивчек И.В. Математическая модель усилителя класса E на основе метода гармонического баланса // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Международной научно-технической конференции: в 2 т. 22-23 сентября 2016 г., Саратов: Амирит, 2016. Т. 1, с. 135-139.