

УДК 621.375.4

СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЧ УСИЛИТЕЛЕЙ С СУММИРОВАНИЕМ МОЩНОСТИ НА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ С БАРЬЕРОМ ШОТКИ

А.С.Прилипская, Д.Г.Макаров, В.Г.Крыжановский

Введение. Развитие информационных технологий и систем связи в настоящее время обуславливает интерес разработчиков электронных устройств к изучению и внедрению новых конструкций одних из основных узлов практически любой системы связи – усилителей мощности (УМ). Разрабатываются транзисторы, позволяющие работать с высокими уровнями мощности при больших напряжениях, но для достижения высокого КПД необходимо иметь малые емкости переходов для работы в диапазоне СВЧ. Используя схемы суммирования мощностей от нескольких активных приборов, можно получить большую выходную мощность УМ, применяя маломощные транзисторы. Некоторые из этих способов суммирования мощности в усилителях, которые объединяются понятием «пространственно развитые усилители», описаны в данной статье. Первым рассмотрен усилитель класса E/F, использующий соответствующие значение нагрузочного импеданса на нескольких гармониках выходного сигнала и схему суммирования на входе и выходе усилителя. Вторым описан усилитель с взаимодействием на гармониках, в котором необходимое значение импеданса на частоте второй гармоники реализуется благодаря выделению второй гармоники стокового напряжения транзисторов и передаче ее с требуемым фазовым сдвигом на сток соседнего транзистора. Третьим – усилитель, построенный по расширенной резонансной методике, где входная мощность делится поровну между входами транзисторов, а потом суммируется когерентно с каждого стока, что реализуется благодаря преобразованию полной проводимости на выводе одного транзистора к ее комплексно сопряженному значению на следующем транзисторе.

Цель работы – теоретическим расчетом и экспериментальным исследованием определить основные характеристики усилителей с суммированием мощности и наиболее выгодный подход построения таких усилителей.

Усилитель мощности класса E/F. Одним из классов УМ, который может быть отнесен к концепции пространственно развитых усилителей, является класс E/F. Данный класс усилителей обладает достоинствами класса E – простота реализации выходной цепи и включение в ее состав выходной емкости транзистора и класса F – уменьшенное значение среднеквадратичного тока через транзистор и пикового напряжения на стоке. Данное семейство усилителей характеризуется числом настраиваемых гармоник и обозначается индексами E/F_{мн}. Выходная согласующая цепь должна реализовывать короткое замыкание на некотором числе нечетных гармоник и холостой ход (бесконечность) на некотором числе четных гармоник. На основной частоте должна присутствовать индуктивная составляющая нагрузочного импеданса для реализации условий переключения при нулевом напряжении. Все более высокие гармоники оказываются нагруженными на емкость.

Наиболее простым способом построения УМ класса E/F является использование двухтактной симметричной ключевой схемы, в которой транзисторы управляются со сдвигом фазы на 180 градусов (один ВКЛ – другой ВЫКЛ). Благодаря симметрии схемы формы сигналов на них идентичные, только со сдвигом фазы на 180. Между ключами расположена нагрузка, как показано на рис. 1.

В качестве полосно-заграждающего фильтра используется параллельный колебательный LC контур, обеспечивающий короткое замыкание (нулевой импеданс) на всех нечетных гармониках, кроме первой, на которой нагрузка равна $2R + j2X$. Таким образом, получен режим E/F_{odd}. Далее можно реализовывать бесконечный импеданс на четных гармониках, подключая контуры, параллельные каждому ключу и настроенные на соответствующие гармоники [1].

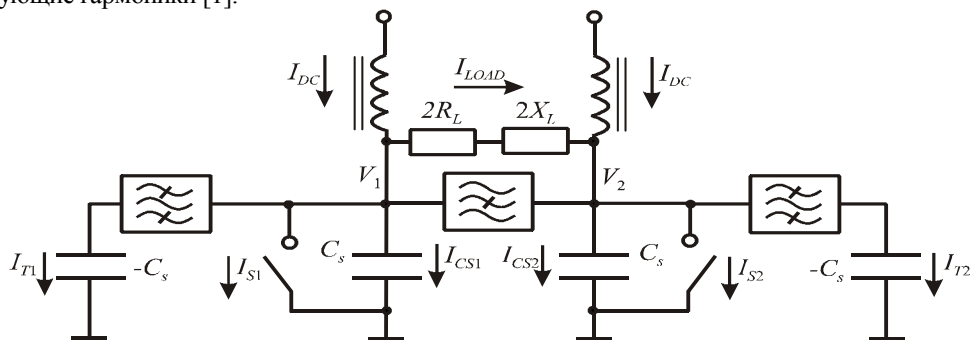


Рис. 1. Схема двухтактного УМ класса E/F

На основе работы [2] был проведен расчет и исследование СВЧ УМ класса E/F_{2,3} с использованием полевых транзисторов с барьером Шотки (ПТШ) CLY5. При настройке второй и третьей гармоник пиковые значения тока и напряжения на транзисторе уменьшаются, что помогает предотвратить пробой транзисторов. Расчет выполняется исходя из разложения в ряд Фурье синусоидального напряжения и прямоугольного тока ключей при определенном наборе настраиваемых гармоник (в нашем случае, второй и третьей). В форму тока добавляется составляющая второй гармоники. Далее находят напряжение и ток через нагрузку, и, соответственно, ее сопротивление. В данном классе нагрузка является резистивной с параллельной индуктивной проводимостью, зависящей от емкости ключа и настройки на гармониках; активная проводимость не зависит от емкости транзистора, а реактивная ее часть зависит только от выходной емкости транзистора и настройки на гармониках.

Для моделирования усилителя были выбраны следующие параметры: частота 1 ГГц, напряжение питания 5В, выходная мощность – 4 Вт. Использовались GaAs транзисторы CLY5, подходящие для работы при низких напряжениях питания на СВЧ. Согласующая цепь представляет комбинацию линий и шлейфов, настраивающих необходимый импеданс на основной частоте и гармониках на стоке транзистора. Фотография макета усилителя показана ниже на рис. 2.

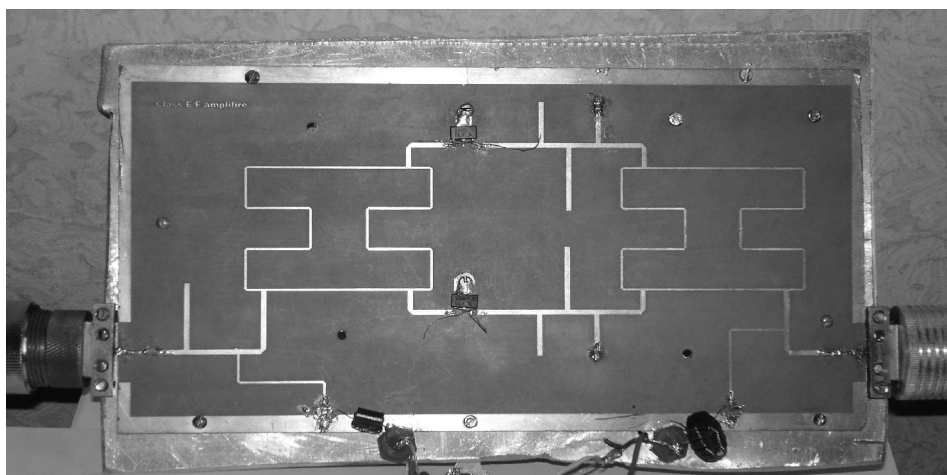


Рис. 2. Макет усилителя класса E/F

Для согласования несимметричного входа и выхода усилителя применялись кольцевые мосты на микрополосковых линиях.

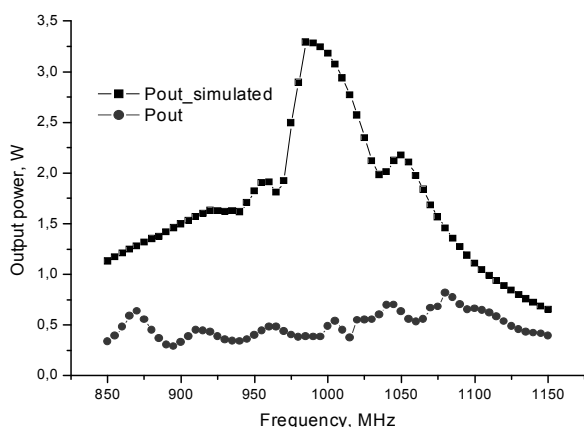


Рис. 3. Зависимость выходной мощности от частоты

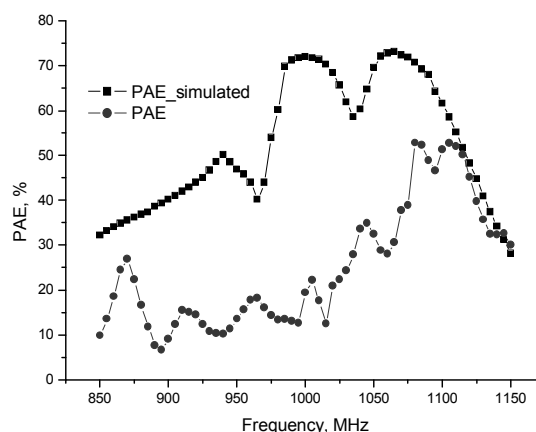


Рис. 4. Зависимость КПД по добавленной мощности от частоты

Результаты эксперимента показаны на рис. 3, 4. Видно, что выходная мощность ниже расчетной, а максимум КПД находится на 80 МГц выше по частоте и имеет значение, сходное с моделированным, что вызвано общей сложностью конструкции и возможными неточностями при изготовлении макета, поэтому согласующие цепи работают правильно на одной частоте, а кольцевые мосты на другой.

Экспериментальные результаты исследования УМ класса E/F_{2,3} на ПТШ отличаются из-за неточности параметров модели и конструктивных особенностей устройства. Также при разработке простран-

венно развитих усилителей особое внимание необходимо уделять цепям разделения и суммирования мощностей, так как они являются источниками дополнительных потерь.

Усилитель с взаимодействием на гармониках. При разработке усилителей мощности немаловажными условиями являются линейность, высокий КПД, простота реализации. Для линейного режима работы обычно используются усилители класса А, класса В, а для нелинейного – высокоэффективные усилители класса Е, класса F.

Наличие связей в выходной цепи, создающих нулевой импеданс на четных гармониках и бесконечный на нечетных в точках подключения стоков транзисторов, присуще полигармоническому режиму работы усилителей. Эти усилители характеризуются существенно нелинейным режимом работы транзисторов. Преимущество использования таких нелинейных усилителей (класс F) – теоретически достижимый КПД 100 %. Реальные воплощения класса F наиболее подвержены отклонениям от теории вследствие влияния неидеальности активного элемента и согласующих цепей.

В усилителях с взаимодействием на гармониках нуль импеданса на частоте второй гармоники достигается выделением второй гармоники стокового напряжения транзисторов и передачей ее с требуемым фазовым сдвигом на сток соседнего транзистора [3].

Идея усилителя с взаимодействием на гармониках заключается в том, что используются два транзистора, соединенные параллельно; угол отсечки транзисторов соответствует работе усилителя в классе В или АВ, а на гармониках реализуются условия режима класса F, т.е. обеспечивается КЗ на четных гармониках и холостой ход на нечетных. При реализации такого усилителя можно получить более высокий КПД, чем у обычного усилителя класса F.

Блок-схема усилителя с взаимодействием на гармониках изображена на рис. 3.

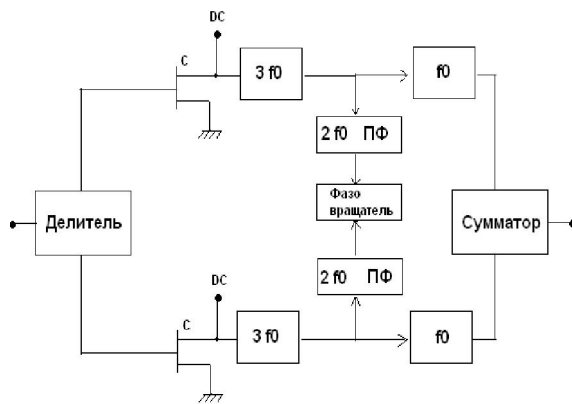


Рис. 3. Блок-схема усилителя с взаимодействием на гармониках

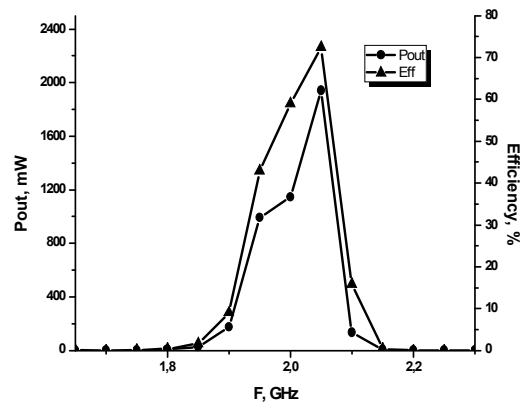


Рис. 4. Выходная мощность и КПД усилителя с взаимодействием на гармониках в диапазоне частот (моделирование)

Его конфигурация аналогична балансному усилителю, критическое отличие заключается в том, что между двумя транзисторами добавлен тракт передачи второй гармоники основного сигнала [3]. Кроме того, контур на вторую гармонику должен обеспечивать сдвиг 180° между вторыми гармониками на выходе транзисторов. Таким образом, нагрузка на выходе каждого транзистора на второй гармонике представляет собой короткое замыкание, что соответствует условиям для выходной цепи усилителя класса F [1]. А на третьей гармонике, согласно условиям режима класса F, надо обеспечить бесконечный импеданс, что реализуют согласующие цепи перед контуром на вторую гармонику. Необходимое нагрузочное сопротивление транзисторов на основной частоте реализуют согласующие цепи перед сумматором. Сигналы подаются на транзисторы синфазно благодаря синфазному делителю.

На основной частоте 2 ГГц необходимо было получить сопротивление нагрузки на стоке транзистора $R_{opt} = 2V / I_{max}$. Моделирование проводилось методом гармонического баланса, использовалась нелинейная модель ТОМ-2 для псевдоаморфного ПТ с высокой подвижностью электронов ТС 2591. При напряжении питания $V = 5$ В и максимальном токе транзистора $I_{max} = 600$ мА получаем $R_{opt} = 16,6$ Ом. В результате моделирования получены 1,9 Вт выходной мощности и 72 % стокового КПД на основной частоте (рис. 4).

Для проектирования схем транзисторных УМ, работающих параллельно, можно использовать вертикальный переход микрополосковая-щелевая линии передачи. Анализ такого соединения был детально проделан в работе [4]. Для реализации усилителя с взаимодействием на гармониках также возможно использовать такой переход. На рис. 5 представлена схема сумматора и цепи подачи второй гармоники для

такого усилителя. Здесь две полосковые линии, связанные через щелевой резонатор в заземляющей подложке, обеспечивают заданный импеданс на гармониках основного сигнала. На основе расчетов матрицы рассеяния данной фильтрующей цепи [4], путем добавления ее в схему моделирования усилителя, получены следующие значения выходной мощности и КПД (рис. 6): соответственно 2 Вт и 60 %.

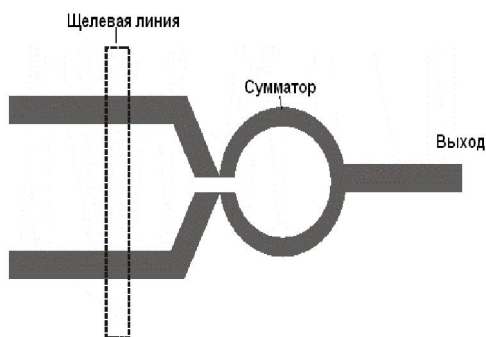


Рис.5. Схема сумматора и цепи подачи второй гармоники

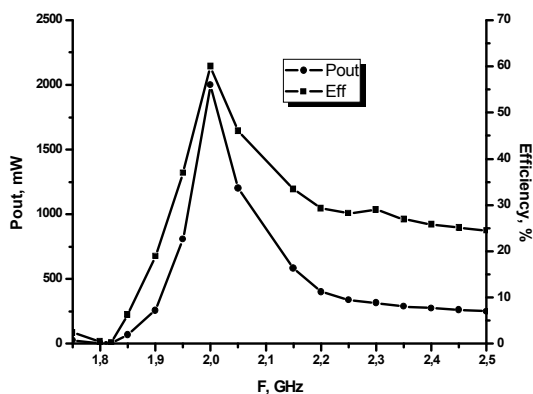


Рис.6. Частотная зависимость выходной мощности и КПД усилителя с взаимодействием на гармониках с использованием щелевого резонатора в выходной цепи

Таким образом, усилитель с взаимодействием на гармониках можно использовать для усиления в микроволновом диапазоне, при этом получаем высокий КПД и высокую мощность. Также подтверждена возможность использования схемы с вертикальным переходом микрополосковая – щелевая линия передачи для реализации такого усилителя.

Усилитель по расширенной резонансной методике. Еще одним способом построения усилителя с суммированием мощности является расширенная резонансная методика (PRM). Достоинство такого метода состоит в том, что входная мощность делится поровну между каждым затвором транзистора, и затем суммируется когерентно от каждого стока. Он не требует использования четвертьволновых передающих линий и предварительно согласованных приборов, поэтому PRM удобна и для проектирования усилителей в интегральном исполнении.

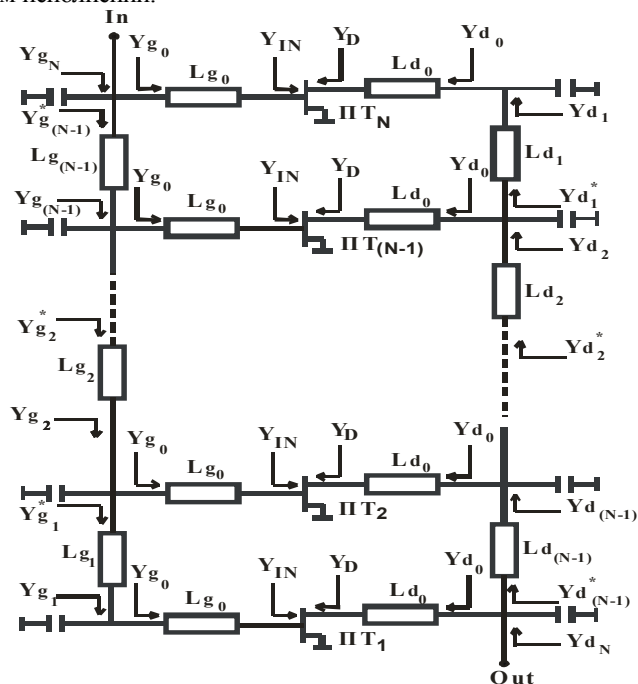


Рис.7. Общая схема усилителя по PRM на N транзисторах

Блок-схема усилителя с использованием N транзисторов изображена на рис. 7.

Основная идея заключается в преобразовании полной (входной/выходной) проводимости на одном транзисторе к ее комплексно сопряженному значению на входе/выходе следующего транзистора. Таким образом, уничтожаются мнимые части проводимости и суммируются действительные. Это условие гарантирует равное разделение мощности между активными приборами с целью ее деления/суммирования [5].

Моделирование работы усилителя класса E, выполненного по PPM, проводилось методом гармонического баланса, при этом использовалась нелинейная модель транзистора CLY5 Materka-Kasprzak [6]. Для реализации режима класса E необходимо было обеспечить на основной частоте нагрузочное сопротивление транзистора [1] $Z_D = \frac{0,28015}{\omega C_{ds}} e^{j49,0524^\circ}$. Таким образом, при выходной емкости транзистора

$C_{ds} = 2,4$ пФ, на частоте 900 МГц реализуется значение $Z_D = 13,52 + j15,58$, а на частотах второй и третьей гармоник обеспечивается импеданс, близкий к бесконечности.

В работе [7] описаны результаты моделирования и экспериментального исследования усилителя, построенного по расширенной резонансной методике на двух ПТШ CLY5. В эксперименте были получены выходная мощность 845 мВт, 74 % стоковый КПД и 60 % КПД по добавленной мощности.

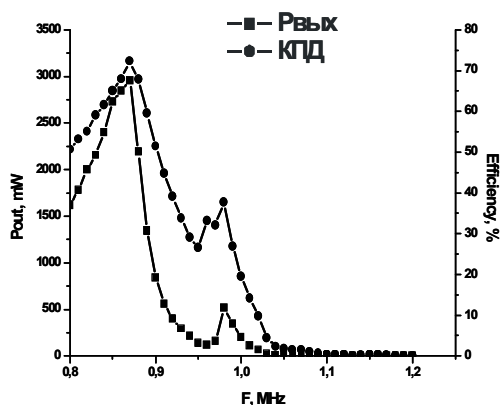


Рис. 8. Результаты моделирования для усилителя на четырех транзисторах: зависимость выходной мощности и КПД от частоты

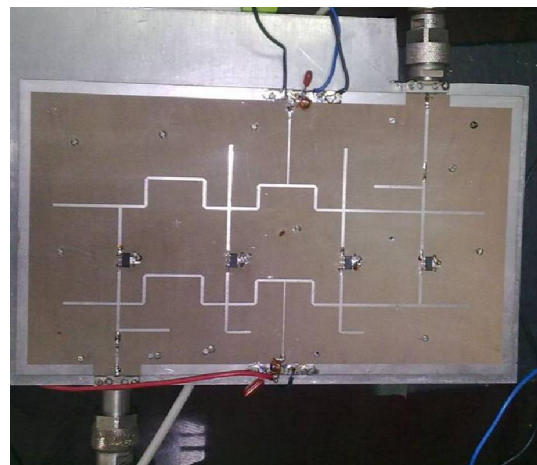


Рис. 9. Макет усилителя на четырех ПТШ

Промоделирована работа усилителя по PPM на четырех ПТШ CLY5 в диапазоне частот, получены выходная мощность 2.9 Вт и стоковый КПД 72 % на основной частоте (рис. 8). При этом смещение на затворах всех транзисторах равно -3,2 В, напряжение питания 5 В. На рис. 9 показан экспериментальный макет усилителя на четырех транзисторах.

В результате моделирования работы усилителя на четырех транзисторах получены выходная мощность 2,9 Вт, КПД 72 %. Экспериментально были получены КПД, близкий к расчетному, а выходная мощность гораздо меньше. Следовательно, при увеличении числа транзисторов в схеме, необходима очень точная настройка, большое внимание необходимо уделять фазовым соотношениям.

Таким образом, экспериментально подтвержден высокий КПД в усилителе класса E с суммированием мощности по расширенной резонансной методике [7], соответствующий КПД одиночного каскада.

Заключение. В данной работе рассмотрены некоторые из возможных реализаций пространственно развитых СВЧ усилителей мощности на ПТШ транзисторах, показаны их основные достоинства и недостатки. Усилитель мощности класса E/F использует ограниченное число гармоник сигнала и комплексный импеданс нагрузки на стоке транзистора на основной частоте, за счет чего формы волн тока и напряжения на транзисторе не перекрываются и теоретически достижимый КПД равен 100%, однако большое внимание необходимо уделить разработке входного и выходного сумматоров мощности. Усилитель с взаимодействием на гармониках сочетает в себе достоинства схемы со сложением мощностей и усилителя с высоким КПД. Используя расширенную резонансную методику построения усилителей с суммированием мощности, вполне возможно реализовать СВЧ усилители с высоким КПД и высокой мощностью. Для увеличения выходной мощности в усилителе по PPM целесообразно применять большее число транзисторов.

В результате сравнения этих трех методов построения усилителей с суммированием мощности на двух транзисторах, наиболее эффективным является усилитель, построенный по расширенной резонансной методике, так как при экспериментальном исследовании такого УМ на двух ПТШ получен КПД по добавленной мощности 60 % по сравнению с 50 % усилителя класса E/F.

РЕЗЮМЕ

Розглянуто три концепції підсилювачів НВЧ із додаванням потужності: підсилювач класу E/F, підсилювач із взаємодією на гармоніках та підсилювач за розширеною резонансною методикою. Наведені результати моделювання та експериментального дослідження таких підсилювачів, на основі яких можна зробити висновок, що найбільш ефективним і простим у реалізації є підсилювач за розширеною резонансною методикою.

SUMMARY

Three approaches of building of the microwave power amplifiers: class - E/F amplifier, harmonic reaction amplifier and extended-resonance power amplifier were considered in this paper. Results of simulation and experimental investigation of such amplifiers are given. It is shown that the class-E power amplifier, based on extended resonance technique, is the most efficient and easy for implementation.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крыжановский В.Г. Транзисторные усилители с высоким КПД / В.Г.Крыжановский. – Донецк: Апекс, 2004. – 448 с.
2. Kee S.D. The Class-E/F Family of ZVS Switching Amplifiers / S.D.Kee, I.Aoki, A.Hajimiri, D.Rutledge // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.– V. 51.– № 6, 2003. – P.1677-1690.
3. Nishiki S. Harmonic Reaction Amplifier – A Novel High-Efficiency And High-Power Microwave Amplifier/ S. Nishiki, T. Nojima // IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig. – Las Vegas, NV, 1987.– V. 2. – P.963-966.
4. Крыжановский В.Г. Рассеяние на четырехпортовом вертикальном переходе микрополосковая-щелевая линия передачи / В.Г.Крыжановский, Ю.В.Рассохина // Изв. ВУЗов «Радиоэлектроника».– 2008.– Т. 51, №5. – С.54-65.
5. Martin A.L. A class-E power amplifier based on an extended resonance technique / A.L.Martin, A.Mortazawi // IEEE Microwave Theory Tech.– 2000. – V. 48, No. 1. – P.93-97.
6. Marcovic M. Nonlinear modeling of Class-E microwave power amplifiers / M.Marcovic, A.Kain, Z.Popovic // Int. Journal RF and Microwave CAE. –1999. –V. 9. – P.93-103.
7. Крыжановский В.Г. Усилитель класса E по расширенной резонансной методике на ПТШ CLY5 / В.Г.Крыжановский, А. С. Прилипская // Радиотехника, Всеукраинский межв. Н.-т. сб. – Харьков, Вып. 160, 2010. – С. 333-338.

Поступила в редакцию 28.04.2010 г.