

УДК 621.375.018.756

**ТВЕРДОТЕЛЬНОЕ ПЕРЕДАЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО РЛС УНФ-ДИАПАЗОНА,
ПОСТРОЕННОЕ НА УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ СВЧ****Кириллов Иван Николаевич**

инженер-конструктор 1 категории АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов».

Фролов Виталий Викторович

начальник конструкторского отдела № 4 АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов».

Каряева Валентина Юрьевна

инженер конструктор 1 категории АО «Муромский завод радиоизмерительных приборов».

E-mail: global@mzrip.ru.

Адрес: 602264, г. Муром, Карачаровское ш., 2.

Аннотация: Новое поколение мощных полевых транзисторов, выполненных по LDMOS технологии, обладает улучшенными характеристиками по сравнению с предыдущим поколением полевых транзисторов и находит все более широкое применение в современных разработках. Это позволяет сделать вывод о том, что LDMOS сегодня – достаточно надежная и отработанная технология, по многим параметрам не уступающая, а порой и превосходящая биполярную, и что ее проникновение в сферу авиационных, военных и коммуникационных технологий – лишь вопрос времени. В статье приведена структура построения твердотельного передающего устройства РЛС, построенного на принципе суммирования мощностей, приведена модель n-канального сумматора. Рассмотрен усилительный модуль, построенный на биполярных транзисторах, приведены его основные характеристики. Также описывается усилительный модуль, построенный на современных полевых LDMOS транзисторах. Рассмотрены основные преимущества использования данного типа транзисторов.

Ключевые слова: радиолокация, СВЧ-техника, усилители ВУМ, полевые и биполярные транзисторы, многоканальное суммирование.

Введение

В современном мире радиолокация получила широчайшее применение как в системах управления воздушным движением, так и в системах противовоздушной (ПВО) и воздушно-космической обороны (ВКО), что напрямую характеризует уровень безопасности страны, а значит и способность отстаивать, защищать, продвигать свои национальные интересы на мировой арене. Сегодня основу войск ПВО и ВКО составляет вооружение, представленное сложнейшими системами и комплексами, работа которых во многом зависит от качества контроля воздушного пространства, что обеспечивается радиолокационными станциями (РЛС) обнаружения и сопровождения.

Современные РЛС, как и любую другую технику, оценивают критерием эффективности E , который характеризуется отношением совокупности тактико-технических характеристик

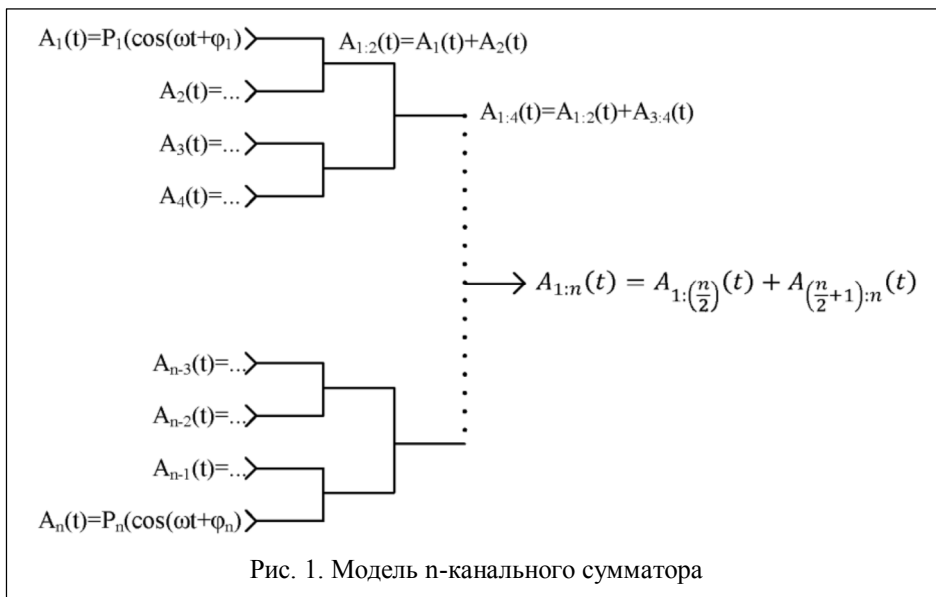
станции, выраженных через коэффициент полезности U , к ее стоимости Q [1]:

$$E = \frac{U}{Q} . \quad (1)$$

Понятие «современная РЛС» еще совсем необязательно означает, что она имеет по всем параметрам лучшие показатели, достигнутые радиолокационной техникой, так как оптимальное значение критерия эффективности определяется достижением баланса между совокупностью примененных при ее создании (модернизации) научно-технических достижений и материальными затратами при их реализации.

Твердотельное передающее устройство РЛС

Передающее устройство твердотельной РЛС представляет собой усилитель, где для получения мощного СВЧ-сигнала используется принцип суммирования, в основе которого лежит применение n-канальных сумматоров мощно-



сти. На рис.1 приведена модель n-канального сумматора гармонических сигналов $A_i(t)$.

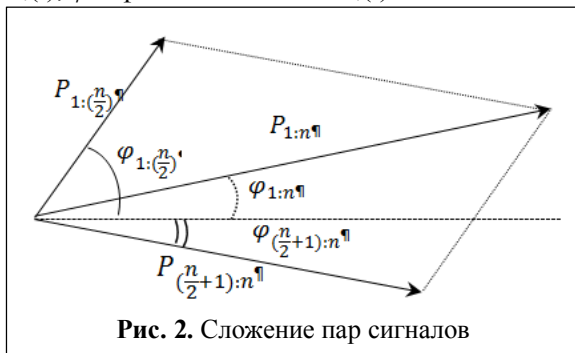
Суммарный гармонический сигнал $A_{1:n}(t) = \{P_{1:n}; \varphi_{1:n}\}$, выраженный через суммы пар сигналов $A_{1:(\frac{n}{2})}(t) = \{P_{1:(\frac{n}{2})}; \varphi_{1:(\frac{n}{2})}\}$ и $A_{(\frac{n}{2}+1):n}(t) = \{P_{(\frac{n}{2}+1):n}; \varphi_{(\frac{n}{2}+1):n}\}$, представленных в тригонометрической форме, имеет вид (рис.2) и, соответственно, амплитуду

$$P_{1:n} = \left(P_{1:(\frac{n}{2})}^2 + P_{(\frac{n}{2}+1):n}^2 - 2 \cdot P_{1:(\frac{n}{2})} \times \right. \\ \left. \times P_{(\frac{n}{2}+1):n} \cdot \cos \left(180 - \left| \varphi_{1:(\frac{n}{2})} - \varphi_{(\frac{n}{2}+1):n} \right| \right) \right), \quad (2)$$

и фазу

$$\varphi_{1:n} = \varphi_{1:(\frac{n}{2})} + \\ + \arcsin \frac{P_{1:(\frac{n}{2})} \cdot \sin \left(180 - \left| \varphi_{1:(\frac{n}{2})} - \varphi_{(\frac{n}{2}+1):n} \right| \right)}{P_{1:n}}, \quad (3)$$

где n – общее число суммируемых гармонических сигналов $A_i(t)$; P – амплитуда i -го сигнала $A_i(t)$; φ – фаза i -го сигнала $A_i(t)$.



Конструктивно передающее устройство представляет собой многокаскадный твердотельный усилитель блочно-модульного типа, состоящий из предварительного управляемого усилителя, усилительного модуля, вентиля, делителя и сумматора мощности, 9-ти усилительных блоков (рис.3). В свою очередь каждый усилительный блок

состоит из делителя и сумматора мощности, 8-ми усилительных модулей и вентиля [2]. Таким образом, основу передающего устройства составляют 73 идентичных усилительных модуля. Усилительный модуль представляет собой усилитель мощности СВЧ, построенный на биполярных или полевых СВЧ транзисторах.

Зондирующий сигнал в диапазоне частот 825-882 МГц с относительной полосой 7% и импульсной мощностью 100 мВт поступает на вход предварительного управляемого усилителя первого каскада и усиливается до 4,5 Вт, который затем усиливается модулем второго каскада до 55 Вт. После этого сигнал усиливается в третьем каскаде до 350 Вт, затем делится на 8 линеек, снова усиливается и суммируется. После суммирования выходная импульсная мощность передающего устройства составляет ≈ 7 кВт.

Исходя из формул (2) и (3) для передающего устройства, реализованного по приведенной схеме (рис.3), определено, что при разбросе фазы суммируемых сигналов $\varphi = \pm 30^\circ$, максимальные потери на суммирование достигают 0,6 дБ.

Усилитель мощности СВЧ на биполярных транзисторах

Изначально усилительный модуль представлял собой двухкаскадный усилитель с выходной импульсной мощностью 130-150 Вт, состоя-

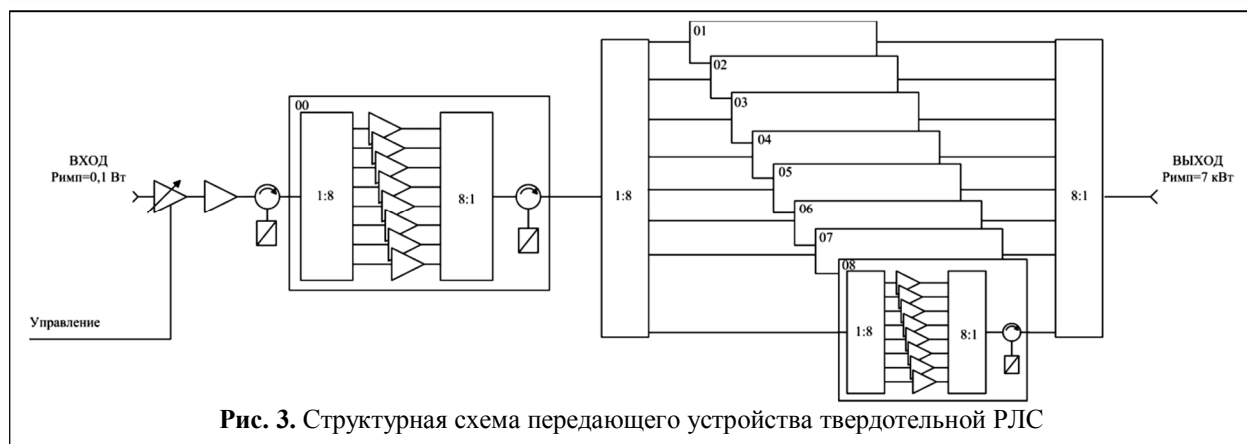


Рис. 3. Структурная схема передающего устройства твердотельной РЛС

щий из 5-ти биполярных транзисторов 2Т988А (рис.4).

Первый усилительный каскад (предварительный) состоит из одного биполярного транзистора 2Т988А, второй (выходной) – из четырех транзисторов той же марки. Для обеспечения синфазного суммирования на входе первого и во втором усилительных каскадах установлены микрополосковые фазовращатели, выполненные в виде отрезков переключаемых линий различной электрической длины.

Биполярный транзистор 2Т988А имеет следующие характеристики: коэффициент усиления – не менее 6 дБ; выходная импульсная мощность – не менее 15 Вт; $U_{num}=28$ В; $KПД$ – 45 % [3].

Для получения уровня выходной импульсной мощности усилительного модуля в 100 Вт, выходная мощность каждого транзистора во втором усилительном каскаде должна быть более 25 Вт. Обеспечение такого уровня выходной мощности транзистора 2Т988А требует

тонкой и сложной его настройки в усилительном модуле. К тому же целесообразно и необходимо использовать методику предварительного отбора транзисторов по коэффициенту усиления, выходной мощности и разбросу вносимого фазового сдвига. В результате это приводит к большому (более 25 %) отходу дорогостоящих СВЧ транзисторов, как в ходе предварительной отбраковки, так и регулировки усилительного модуля, что сказывается не только на конечной стоимости передающего устройства, но и на его надежности, так как транзисторы в выходном каскаде работают в критических режимах.

Также основными недостатками приведенного усилительного модуля, обусловленными характерными свойствами биполярных транзисторов, являются: низкая стойкость к рассогласованию нагрузки; относительно высокий уровень паразитных генераций; низкая фазовая стабильность, что особенно влияет на доплеровскую чувствительность РЛС и конечную

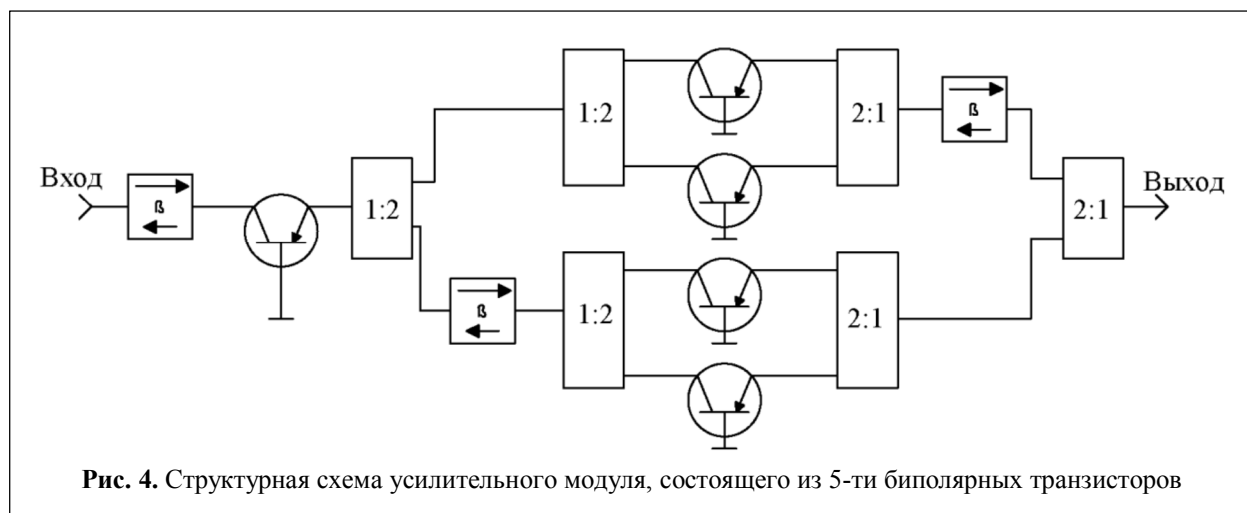


Рис. 4. Структурная схема усилительного модуля, состоящего из 5-ти биполярных транзисторов

выходную мощность передающего устройства при суммировании мощностей. К тому же экспериментально определено, что усилительные модули на биполярных транзисторах при изменении амплитуды входного сигнала на 3 дБ имеют дополнительную фазовую нестабильность $\varphi = \pm 8^\circ$. Это объясняется тем, что транзисторы в данном модуле работают в режиме «В», то есть входное сопротивление транзистора зависит от амплитуды сигнала на его входе, и что, соответственно, изменяет вносимый фазовый сдвиг на выходе. Исходя из этого, максимальные потери на суммирование из-за разности фаз $\varphi = \pm 38^\circ$ в передающем устройстве на биполярных транзисторах, согласно выражениям (2) и (3), составляют более 1 дБ.

Усилитель мощности СВЧ на полевых LDMOS транзисторах

При модернизации передающего устройства и разработке новых усилительных модулей на полевых транзисторах требования по разбросу вносимого фазового сдвига усилительных модулей целесообразно ужесточить до $\varphi = \pm 20^\circ$, что снижает максимальные потери на суммирование из-за разности фаз до 0,27 дБ и соответственно повышает на 15% КПД передающего устройства.

В отличие от биполярных транзисторов, которые уже широко применялись 30-40 лет назад, LDMOS (смещенно диффузная металл-оксид-полупроводниковая технология) – достаточно молодая технология. Благодаря лучшей эффективности, более высокому усилению и стабильности, 10-15 лет назад LDMOS стала одной из ведущих технологий на мировом рынке СВЧ устройств. В нашей же стране данная технология получила развитие пример-

но 5-7 лет назад и в настоящий момент активно совершенствуется [4]. Так в 2007 году АО «НИИЭТ» разработало кремниевые эпитаксиально-планарные полевые импульсные LDMOS транзисторы 2П998А и 2П980БС [5].

Полевой транзистор 2П998А имеет коэффициент усиления 15 дБ, выходную импульсную мощность не менее 35 Вт, $U_{num}=28$ В; КПД – 50 %. Полевой транзистор 2П980БС имеет коэффициент усиления 10 дБ, выходную импульсную мощность не менее 150 Вт, $U_{num}=32$ В; КПД – 45 % [6].

Усилительный модуль на полевых транзисторах, так же, как и на биполярных, состоит из двух усилительных каскадов: первого (предварительного) и второго (выходного). Предварительный усилительный каскад выполнен на полевом LDMOS транзисторе 2П998А, выходной усилительный каскад реализован на полевом балансном LDMOS транзисторе 2П980БС (рис.5).

На входе модуля имеется фазовращатель, выполненный из отрезков переключаемых линий. Так как выходной усилительный каскад состоит из балансного транзистора, то на его входе и выходе установлены симметрирующие трансформаторы.

Усилительный модуль, построенный на полевых LDMOS транзисторах, имеет следующие характеристики: коэффициент усиления не менее 17 дБ, выходную импульсную мощность не менее 110 Вт, $U_{num}=28$ В; КПД – 40 % [7]. Транзисторы в модуле работают в режиме АВ, который характеризуется меньшим значением нелинейных искажений при приемлемом КПД по сравнению с режимом В.

Поскольку на нашем предприятии не было опыта работы с данным типом транзисторов,

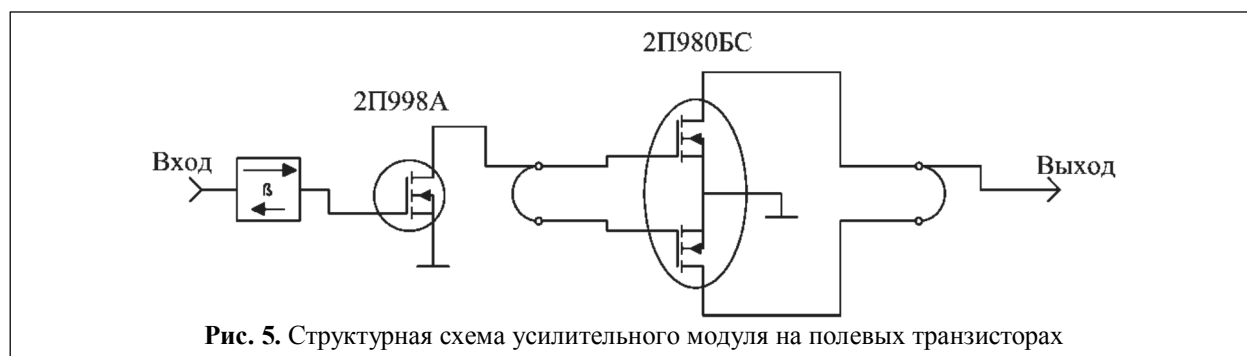


Рис. 5. Структурная схема усилительного модуля на полевых транзисторах

то на начальном этапе серийного изготовления передающего устройства на полевых транзисторах имело место большое количество отказов транзисторов в усилительных модулях, как 2П980БС, так и 2П998А (20% и более). В связи с этим был разработан и принят комплекс мер с целью выявления причин отказов полевых транзисторов, а именно: был проведен анализ конструкторской документации, качества стендового оборудования, соблюдения технологической дисциплины. В результате этой работы сделано следующее:

- построен новый участок пайки и монтажа СВЧ аппаратуры в соответствии с современными стандартами по защите электронных устройств от электростатических явлений ГОСТ Р53734.5.1(5.2)-2009;

- решены проблемы, связанные с деформацией фланца транзистора 2П998А при его установке в корпус;

- оптимизирована конструкция передающего устройства;

- обновлено стендовое и испытательное оборудование.

Все перечисленные меры в совокупности позволили добиться снижения количества отказов транзисторов в передающем устройстве, которое в настоящее время не превышает 5%, что соответствует естественному технологическому отходу при изготовлении данного типа аппаратуры.

Заключение

Передающее устройство на полевых LDMOS транзисторах имеет следующие преимущества по сравнению с передающим устройством на биполярных транзисторах:

- повышенную выходную мощность за счет уменьшения потерь на суммирование;

- повышенную помехоустойчивость за счет повышения фазовой стабильности;

- улучшенную электромагнитную совместимость, за счет снижения уровня паразитных генераций.

Одним из важнейших результатов внедрения передающего устройства на полевых LDMOS транзисторах является снижение на ~10% его стоимости. Если рассмотреть сто-

имость передающего устройства как составную часть конечной стоимости всей РЛС (~0,06Q), то, согласно выражению (1), можно сделать вывод о том, что даже при тех же самых тактико-технических характеристиках станции показатель критерия эффективности радиолокатора после модернизации выше на ~0,6%, чем до нее. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в экономическом плане проведение данной модернизации передающего устройства твердотельной РЛС было целесообразно.

В заключении рассмотрим планы развития отечественных мощных СВЧ LDMOS транзисторов, которые могут позволить существенно упростить как производственный процесс, так и конструкцию передающего устройства. Так, например, в ближайшее время планируется выпуск на рынок целой линейки новых транзисторов 2П9103 частотного диапазона 470-1000 МГц. По данным [8] 2П9103 – это полевой LDMOS 32-вольтовый транзистор с коэффициентом усиления 16 дБ и выходной мощностью 10 Вт (литера А), 45 Вт (литера Б), 75 Вт (литера В), 150 Вт (литера ГС), 300 Вт (литера ДС). Отсюда можно сделать вывод, что, используя транзистор 2П9103ГС, можно построить усилительный модуль на одном усилительном каскаде.

Подводя итоги, можно с уверенностью сказать, что отечественные транзисторы в настоящее время по своим характеристикам соответствуют высокому техническому уровню, что значительно расширяет возможности их применения в современной радиолокации.

Литература

1. Малышев Б.С. Теория полезности: Учебное пособие / Амурский гос.ун. – Благовещенск, 1999 г.

2. Усилитель СВЧ Высокого уровня мощности / Патент на полезную модель №132650, 2012 г.

3. Петухов В.М. Транзисторы и их зарубежные аналоги. Биполярные транзисторы средней и большой мощности сверхвысокочастотные / Справочник. Т.4. Издание второе. – М.: ИП РадиоСофт, 2004 г.

4. Фармикоун Г., Боуери Ф., Бёргер Д., Ченг У., Ким Я., Титизиан Д. Технология мощных СВЧ LDMOS-транзисторов для радарных передатчиков L-

диапазона и авиационных применений // Компоненты и технологии №10. – 2007 г.

5. Асessorов В., Кожевников В., Дикарев В., Цоцорин А. Мощные ВЧ и СВЧ полевые транзисторы для аппаратуры средств радиосвязи // Компоненты и технологии №5. – 2006 г.

6. Мощные ВЧ и СВЧ транзисторы. Модули усилителей мощности / Справочник. – НИИ Электронной техники, 2010 г.

7. Усилитель мощности СВЧ / Патент на изобретение №2487465, 2011 г.

8. www.niiet.ru/transistors/transistors-new.

Поступила 29 июня 2015 г.

English

Solid-state RS transmitting device of UHF range based on microwave power amplifiers

Ivan Nikolaevich Kirillov – 1st category Design Engineer JSC Murom Plant of Radio Measuring Instruments.

Vitaly Viktorovich Frolov – Head of Design Engineering Department No. 4 JSC Murom Plant of Radio Measuring Instruments.

Valentina Yurevna Karyeva – 1st category Design Engineer JSC Murom Plant of Radio Measuring Instruments.

E-mail: global@mzrip.ru.

Address: 602264, Murom, Karacharovskoye Highway, 2.

Abstract: New generation of powerful LDMOS technology based on field transistors has improved performance in comparison with the previous generation of field transistors and it has widespread application in current development. Thus we may conclude that LDMOS is rather reliable and proven technology for the time being, which is not only competitive but sometimes exceeding bipolar technology by many parameters, and that its introduction to area of aircraft, military and communication technologies is only a matter of time. The article describes the structure of building solid-state RS sending device based on adding capacities principle and it describes n-channel adder as well. Bipolar transistors based amplifier module is examined and its key properties are given here. And the amplifier module based on current field LDMOS transistors is also described in the paper. Primary benefits of using these transistors type are examined.

Key words: radar-location, microwave equipment, HP amplifiers, field and bipolar transistors, multichannel adding.

References

1. Malyshev B.S. Value theory: Manual.- Amursky gosudarstvenny universitet, 1999.
2. Microwave high power amplifier. - Patent na poleznuyu model No. 132650, 2012.
3. Petukhov V.M. Transistors and their domestic counterparts. Superhigh-frequency bipolar transistors of medium and high power. - Spravochnik. T.4. Izdaniye vtoroye. – M.: IP RadioSoft, 2004.
4. Formicone G. High power microwave LDMOS transistors technology for radar L-range transmitters and aircraft applications. - G. Formicone, F. Boueri, D. Burger, U. Cheng, Y. Kim, D. Titizian. - Komponenty i tekhnologii No. 10. - 2007.
5. Asessorov V. Powerful HF and the microwave field transistors for radio communication equipment - V. Asessorov, V. Kozhevnikov, V. Dikarev, A. Tsotsorin. - Komponenty i tekhnologii No. 5. - 2006.
6. Powerful HF and microwave transistors. Power amplifier modules. - Spravochnik. – NII Elektronnoy tekhniki, 2010.
7. Microwave power amplifier. - Invention Patent No. 2487465, 2011 of.
8. www.niiet.ru/transistors/transistors-new.