



УСИЛИТЕЛИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

И. С. Богданов, ведущий инженер ФГУП «НИИ «Нептун»
С. Г. Тихомиров, к. т. н. старший научный сотрудник ФГУП «НИИ «Нептун»

В НАЧАЛЕ 70-х годов для отечественных разработчиков стало ощутимым отставание в области элементной и технологической баз отечественного радиостроения от мирового уровня. В 80-х годах это отставание приняло системный и неустраняемый характер.

Для компенсации отставаний в области элементов и технологий при разработке и производстве трактов усиления мощности радиосистем инженерам приходилось применять весьма сложные технические решения, а также недоиспользовать энергетический и частотный ресурс активных элементов. Это создавало определенный задел по тактико-техническим характеристикам изделий, позволявший добиться удовлетворительной качества и серийно-пригодности изделий. Но достигалась серийнопригодность за счет значительного повышения стоимости изделий, трудоемкости настройки и регулировки, увеличения массогабаритных характеристик и т. д.

Основным ресурсом повышения тактико-технических, эксплуатационных и экономических характеристик изделий в условиях ограниченного финансирования разработок в направлении развития элементной и технологической базы является максимально полное использование возможностей доступных элементов и максимальное упрощение схем и конструкций тракта усиления мощности, их адаптация к возможностям доступных технологий.

Руководствуясь этими вполне ясными соображениями, в конце 70-х годов была начата работа по созданию новой базы технических решений усилительных трактов, позволяющей максимально полно использовать доступные элементы и технологии. К концу 80-х годов эта работа была в основных чертах завершена и оформлена в виде монографии /1/ и нескольких патентов РФ и США /3-5/. В настоящей статье со-

общается о некоторых практических результатах проделанной работы.

Стойка усилителя мощности современной киловаттной радиостанции составляет примерно две трети объема и веса и не менее половины стоимости радиостанции. У более мощных радиостанций эти соотношения достигают 90%. ВЧ усилитель мощности является, вероятно, самым большим и тяжелым, самым дорогостоящим и трудоемким узлом мощной радиостанции. При производстве современных систем связи КВ и УКВ диапазона весьма острой и трудно разрешимой задачей является разработка и изготовления именно тракта усиления ВЧ-мощности.

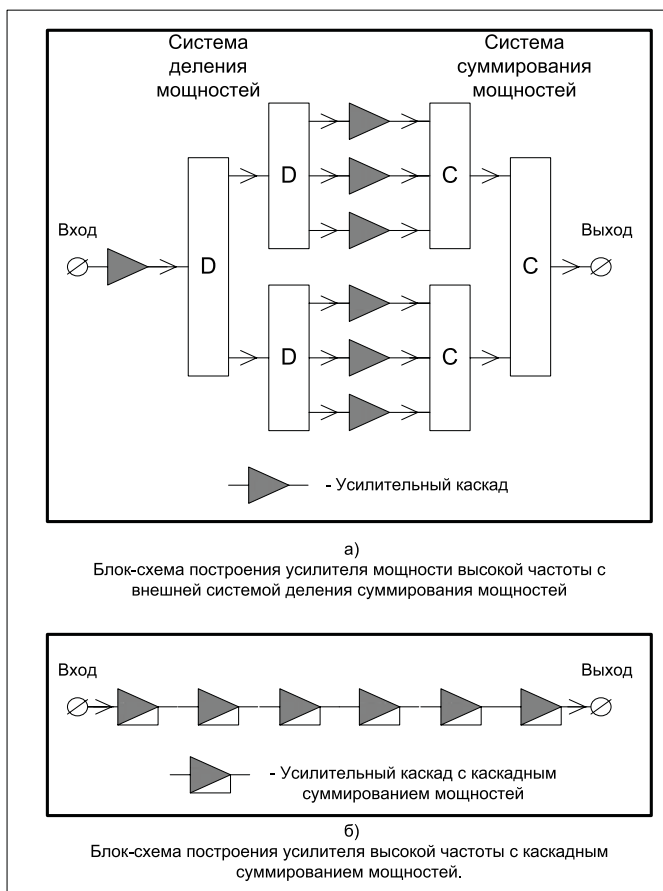
Основная практическая цель предлагаемой работы – **уменьшение в несколько раз** габаритов, веса, трудоемкости и стоимости изготовления усилителей мощности ВЧ при сохранении или улучшении тактико-технических характеристик.

Базовые конструкции ВЧ-усилителей мощности современных отечественных и зарубежных радиостанции за последние десятилетия мало изменились /2/. Как и тридцать лет назад они строятся по стандартной схеме, содержащей предварительный усилитель, устройство деления мощностей, собственно усилительные каскады, работающие на нагрузку, и систему сложения мощностей (рис. 1а).

Эта схема является по-своему полной и совершенной. В широком динамическом и частотном диапазоне эта схема обеспечивает не только эффективный отбор мощности в нагрузку от многих каскадов, но и их развязку в случае выхода из строя одного или нескольких каскадов. Рис. 1. Варианты построения усилителя мощности высокой частоты.

- а) классическая схема с системой деления и суммирование мощностей
- б) усилитель с каскадным суммированием мощностей

Весьма быстро схемотехнические возможности совершенствования усилителей с системой деления/суммирования мощностей были выявлены и реализованы. Дальнейшее улучшение характеристик усилителей в рамках данной архитектуры трак-



та происходило за счет совершенствования элементной и технологической базы производства.

Обращают на себя внимание два наиболее существенных дефекта такой схемы построения тракта.

Во-первых, схема, использующая внешние цепи деления/суммирования мощностей, конструктивно избыточна. Основные объемы, вес и затраты на производство приходятся на узлы, выполняющие по существу подсобные функции. На главные и неустраняемые узлы, ответственные за генерацию мощности – собственно усилительные каскады приходится не более 30% объема, веса и затрат на производство.

Во-вторых, эта схема объективно недоиспользует энергетический и частотный ресурс элементной базы. В частности, транзисторы используются менее чем на одну треть своих возможностей. Причиной этого является, в первую очередь, неидеальность устройств сложения мощностей и трансформаторов сопротивлений. То есть опять же избыточность принятой схемы построения тракта.

Основные предпосылки, положенные в основу работы по совершенствованию базы технических решений усилителей мощности ВЧ, сводились к следующему.

Общим требованием, предъявляемым к мощным усилительным каскадам, традиционно является требование максимально полной развязки входного и выходного контуров каскада с целью повышения коэффициента усиления и обеспечения энергетической устойчивости. Схемотехнически и конструктивно развязка входного и выходного контуров означает уменьшение и нейтрализацию обратных связей в каскаде, реализуемых через общий электрод или через внутренние цепи активного элемента. Чем шире диапазон рабочих частот, тем сложнее решать эту задачу.

Поскольку и общие электрод и внутренние ОС в активных приборах физически неустраняемы, представляется более естественным и выгодным не избавляться от обратных связей, а сознательно и последовательно использовать их при построении мощных усилительных каскадов.

Физически обратная связь между входным и выходным контурами каскада означает неполное включение активного элемента в высокочастотный

тракт по току или/и по напряжению. В /1/ описаны и исследованы обобщенные схемы каскадов с неполным включением активного элемента в высокочастотный тракт.

С использованием принципа неполного включения в /1/ был синтезирован, теоретически исследован и методически проработан целый ансамбль новых схемотехнических решений усилительных каскадов. Среди прочих были предложены три новых типа базовых усилительных каскадов, решающих три основных задачи, встающие при усилении ВЧ-сигнала:

- УКС (усилители с каскадным суммированием мощностей) решают задачу получения в нагрузке усилителя большой ВЧ-мощности путем суммирования мощностей отдельных транзисторов (ламп) без использования внешних систем деления и суммирования мощностей и трансформаторов сопротивления.
- УШУ (устойчивые широкополосные усилители) решают задачу получения максимально большого коэффициента усиления при гарантированной энергетической устойчивости путем широкополосной нейтрализации внутренних ОС транзистора.
- АБК (активные буферные каскады) решают задачу широкополосной развязки усилителя и нагрузки (аналогично циркуляторам) и позволяют тракту усиления ВЧ устойчиво и эффективно работать на любую меняющуюся нагрузку.

В данной статье (первой из цикла статей, посвященных усилителям высокой частоты нового поколения) описываются УКС-усилители с каскадным суммированием мощностей. УШУ и АБК будут описаны в последующих статьях.

Эффект каскадного суммирования мощностей означает по смыслу, что высокочастотная мощность, поступающая на вход каскада, в незначительной своей части тратится на возбуждение активного элемента и в основном передается в нагрузку каскада, где суммируется с мощностью, генерируемой активным эле-

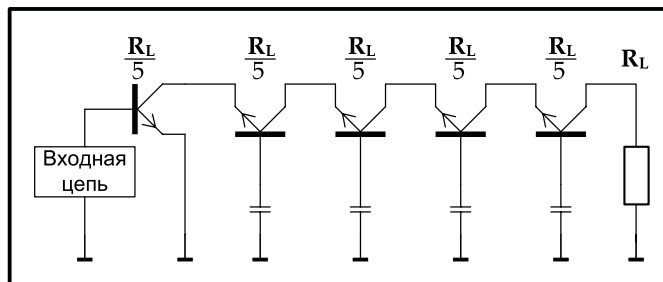


Рис. 2. Вариант схемы усилителя с каскадным суммированием мощностей при неполном включении транзисторов по напряжению

ментом каскада. То есть каскадное суммирование возможно только при неполном включении активного элемента в усилительный тракт.

При построении усилительных каскадов по схемам, реализующим эффект каскадного суммирования мощностей (рис. 1б), конструкция усилительного тракта резко упрощается. Из нее исключаются не только внешние системы деления и суммирования мощностей. Становятся ненужными также и такие технологически сложные узлы, как трансформаторы сопротивления, обеспечивающие согласование внутри тракта.

Возможны различные способы неполного включения. Соответственно, возможны и различные способы и схемы каскадного суммирования мощностей.

Каскадное суммирование мощностей, генерируемых транзисторами в общей нагрузке, удобно осуществлять при их неполном включении по напряжению. Транзисторные каскады с общей базой (затвором) позволяют реализовать концепцию каскадного суммирования в широкой полосе частот, если в цепь общего базового электрода в соответствии с /3/ включить конденсатор (рис. 2).

Эта схема по существу является высокочастотным токовым повторителем и усилителем напряжения. При правильном выборе номиналов конденсаторов для каждого из каскадов, сопротивление нагрузки равномерно делится между всеми транзисторами тракта. С помощью такой схемы на доступной элементной базе можно создавать широкополосные транзисторные усилители с выходной мощностью до нескольких киловатт в диапазоне частот от десятков килогерц до сотен мегагерц.

Следует отметить два преимущества построения транзисторного усилителя по приведенной схеме.

- Данная схема позволяет равномерно распределить рассогласование, возникающее на выходе усилителя, между всеми каскадами. Ситуации, когда один каскад недогружается, а другой при этом «захлабывается», в данной схеме при правильном расчете в принципе не возникает. Следовательно, допустимые уровни и условия рассогласования нагрузки всего усилителя те же, что и для одного транзистора.
- Данная схема позволяет использовать высоковольтный источник питания, что резко снижает токовые нагрузки на цепи питания и упрощает общую схему усилителя.

Каскадное суммирование мощностей, генерируемых вакуумными триодами в общей нагрузке удобно осуществлять при их неполном включении по току. Ламповые каскады с общим анодом (рис. 3) позволяют реализовать концепцию каскадного суммирования в широкой полосе частот, если в цепи, соединяющие катод и сетку с нагрузкой каскада, включить связанные индуктивности.

Эта схема по существу является высокочастотным повторителем напряжения и усилителем тока. При правильном выборе номиналов индуктивностей и их связей, проводимость нагрузки равномерно делится между всеми ламповыми каскадами тракта. С помощью такой схемы на доступной элементной базе можно создавать широкополосные усилители с выходной мощностью в сотни киловатт и более в КВ/УКВ диапазонах частот.

Разработанная в /1/ база технических решений позволяет синтезировать схемы усилителей с любыми типами активных элементов. Лаконичность найденных технических решений, большие возможности миниатюризации конструкций (отсутствие моточных и пространственно распределенных узлов), про-

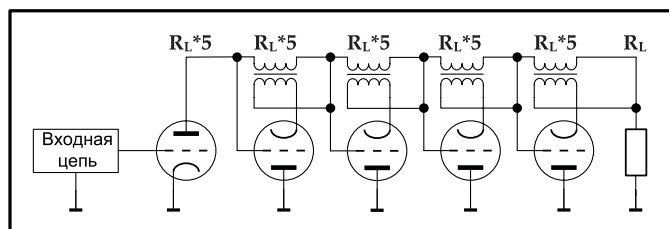


Рис. 3. Вариант схемы усилителя с каскадным суммированием мощностей при неполном включении триодов по току

ТАБЛИЦА 1. ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ УКС			
Оцениваемые характеристики	Motorola, Marconi Достигнутые характеристики	УКС. Требуемые характеристики.	Ожидаемый выигрыш
Диапазон рабочих частот	1.5 МГц – 30 МГц	0.5 МГц - 60 МГц	-
Максимальная выходная мощность на основной гармонике	1000 Вт ± 10 %	1000 Вт ± 10 %	-
Коэффициент усиления	20 дБ ± 2 дБ	20 дБ ± 2 дБ	-
Габариты и вес (с радиатором)	420x320x615 мм 88 КГ	160x220x350 мм 17 КГ	5 раз
Тип, количество и стоимость транзисторов	MRF 157, 10 шт., 6200\$	MRF 151, 10 шт., 590\$	10 раз
Моточных изделий	26 шт.	2 шт.	13 раз
Сборочных единиц (плат)	9 шт.	2 шт.	4 раза
Количество комплектующих изделий	1586 шт.	72 шт.	20 раз

стога расчета параметров усилителей и высокая повторяемость характеристик при серийном изготовлении – все это в совокупности дает возможность упростить и удешевить конструкцию усилителя высокой частоты и строить законченные усилители в виде твердотельных и вакуумных сборок, а не в виде модулей, контейнеров и шкафов.

В результате изменяется статус усилителей мощности ВЧ как технологической единицы. Из блока или устройства усилитель превращается в элемент проектирования. То есть становится частью элементной базы, такой же, как микросхема, транзистор или лампа.

В качестве примера рассмотрим результаты разработки и испытаний транзисторного усилителя высокой частоты с выходной мощностью 1 КВт, использующего упомянутые

выше технические решения УКС. Основные требования к разрабатываемому усилителю УКС и ожидаемый выигрыш в сравнении с имеющимися аналогами сгруппированы в таблице 1.

Как видно из таблицы 1, ожидалось многократное уменьшение массогабаритных и ценовых характеристик усилителя и улучшение технологичности изделия, оцениваемое по сложности структуры, числу сборочных единиц и установочных изделий. Отметим, что ожидаемые результаты разработки сопоставлялись с лучшими на данный момент мировыми прототипами.

Анализ характеристик современной элементной базы по доступным справочным материалам показал, что ширина полосы рабочих частот современных мощных биполярных транзисторов составляет порядка 4 октав, в то время как мощные полевые транзисторы позволяют перекрыть 7 и более октав. Для конкурентоспособности усилителя требовалась полоса от 1,5 МГц до 60 МГц и более, то есть не менее 6 октав. Поэтому выбор был сделан в пользу полевых транзисторов. Конкретно – в пользу подходящих по токовым характеристикам MOSFET транзисторов (MRF151 или BLF177).

По методикам, изложенным в /1/, был проведен синтез схемы усилителя и расчет его параметров (рис. 4) и изготовлен макет усилителя с системой охлаждения и защиты. Конструктивно усилитель представлял

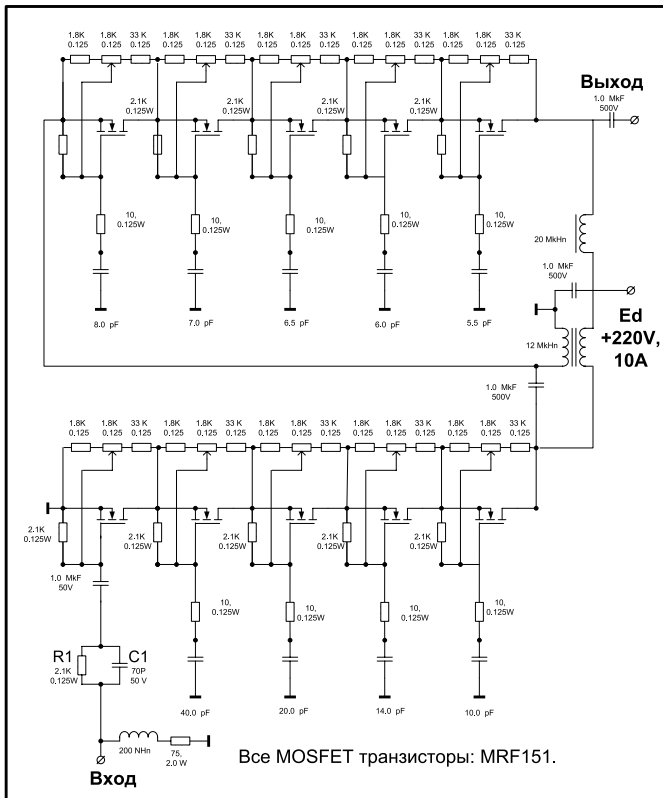


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная усилителя с каскадным суммированием мощностей. Р_{вых} = 1 кВт.

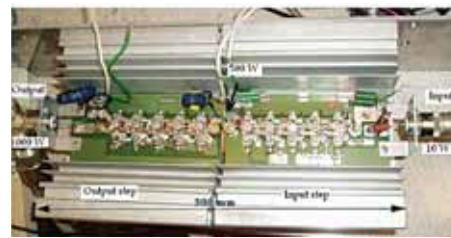


Рис. 5. Фотография макета усилителя по схеме рис. 4. Крышки макросборок сняты

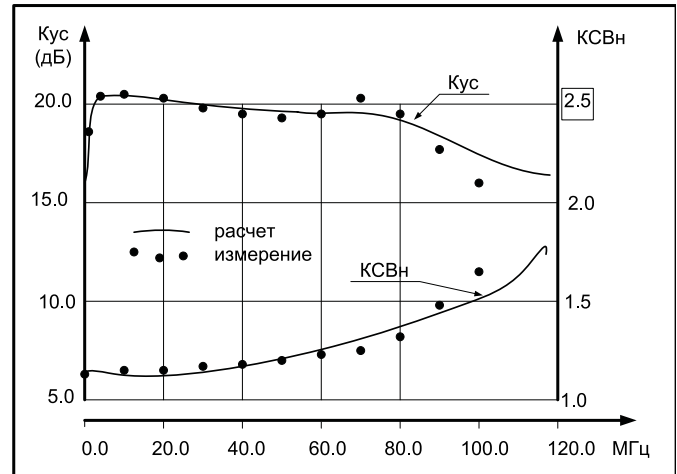


Рис. 6. Частотные характеристики усилителя по схеме рис. 4

собой две 500-ваттные макросборки размером 60x130x30 мм, установленные на радиатор системы охлаждения и соединенные каскадно (рис.5).

Экспериментальное исследование технических характеристик усилителя УКС показало вполне удовлетворительное совпадение расчетной и измеренной АЧХ усилителя в классе «А» при потреблении до двух ампер и номинальным напряжением питания 250 В (рис.6).

Результаты экспериментального исследования усилителя УКС в режиме большого сигнала представлены в таблице 2.

На каждой частоте УКС в непрерывном режиме генерировал в нагрузке мощность около 1 кВт при коэффициенте усиления не менее 19 дБ. Каждый замер проводился в течение 20 минут, температура радиатора стабилизировалась в течение нескольких минут. То есть тепловой режим был установившимся. Параметры усиления при этом сохранялись неизменными с момента начала прогона до выключения усилителя. Приведенные результаты можно рассматривать как вполне удовлетворительные.

По всем своим характеристикам макет усилителя ВЧ полностью вписался в массогабаритные, ценовые и технологические параметры, заданные в таблице 1.

В заключение описания макета отметим три существенных момента.

Постоянные и переменные напряжения на конденсаторах, через которые стоки транзисторов опираются на землю, при номинальных мощностях оказываются весьма значительными (в выходном каскаде постоянная составляющая напряжения около +200В, а высокочастотная составляющая около 400 В). Серийно выпускаемые конденсаторы далеко не всегда удовлетворяют столь

высоким требованиям по напряжению при приемлемых габаритах и цене. Однако достаточно малые номиналы емкостей этих конденсаторов позволяют реализовать их в виде конструктивных элементов платы. И проблема снимается.

Как уже указывалось выше, в случае отклонения величины нагрузки от номинальной, рассогласование распределяется равномерно по всем каскадам УКС. Следовательно, усилитель должен выдерживать те же уровни рассогласования, что и отдельно взятый транзистор. Для транзистора MRF151 изготовитель гарантирует работоспособность прибора при КСВн нагрузки

ТАБЛИЦА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УКС В РЕЖИМЕ БОЛЬШОГО СИГНАЛА					
Частота МГц	Еко (I _{ко}) V (A)	T °C радиатора	Р _{вых} Вт	Р _{ко} Вт	КПД %
1.5	+220 (9.0)	62	940	2000	47
3.0	+220 (8.3)	60	1010	1826	55
6.0	+220 (8.7)	56	1030	1914	54
10.0	+220 (8.7)	54	1080	1914	56
20	+220 (8.8)	56	1040	1936	54
30	+220 (9.0)	60	1000	1980	50
60	+220 (10.5)	72	980	2310	42

ТАБЛИЦА 3

Оцениваемые характеристики	Базовый усилитель КВ радиостанции	Усилитель на базе макросборки УКС
Рабочие частот	1.5 МГц - 30 МГц	1.5 МГц - 60 МГц
Выходная мощность	500 Вт	500 Вт (форсаж - 1 КВт)
КПД	Не хуже 30%	Не хуже 40 %
Габариты (вес) с радиатором	120x600x200 мм (16 КГ)	100x150x170 мм (3.2 КГ)
Количество сборочных единиц (плат)	21	1
Количество установочных изделий	891 шт.	58 шт.
Тип, количество (стоимость) транзисторов	MRF 151, 12 шт. (20 т. р.)	MRF 151, 6 шт., (10 т. р.)
Стоимость ПКИ (без транзисторов)	42 т. р.	7.2 т. р.
Трудоемкость изготовления	640 н/ч	40 н/ч
Трудоемкость регулировки	40 н/ч	6 н/ч
Общая стоимость изготовления	106.5 т. р.	19.01 т. р.

30:1 и любой фазе рассогласования. Испытания макета усилителя при работе на рассогласованную нагрузку показали, что усилитель полностью сохранял устойчивость и работоспособность в режиме малого сигнала при любых КСВн нагрузки. В режиме номинальных мощностей при ухудшении нагрузки до КСВн 4.0 у усилителя срабатывала защита от токовых перегрузок или от теплового перегрева – в зависимости от фазы рассогласования.

Для эффективного теплоотвода макросборки усилителей необходимо собирать на медном основании толщиной не менее 8 мм. И именно это основание должно устанавливаться на алюминиевый радиатор. Все плоскости теплового контакта необходимо шлифовать на плоскошлифовальном станке с частотой не менее 1,4. При сборке плоскости теплового контакта обязательно смазывать теплопроводящей пастой. Эти меры гарантируют эффективность теплоотвода, близкую к расчетной.

Для оценки эффективности технических решений и технологии УКС приведем некоторые сравнительные характеристики производства базового транзисторного усилителя мощности с выходной мощностью 500 Вт для современной радиостанции КВ-диапазона и усилителя УКС, выполненного на базе макросборки с аналогичными тактико-техническими характеристиками (Таблица 3).

Представленные результаты по-

высокочастотных полевых транзисторов. Следовательно, предлагаемые макросборки УКС могут быть использованы в качестве унифицированной элементной базы при разработке и изготовлении трактов усиления мощности радиосистем различного назначения.

Малая электрическая длина и высокая повторяемость характеристик макросборок УКС делает их весьма удобными элементами проектирования усилительного тракта как в рамках архитектуры каскадного суммирования, так и в рамках традиционной архитектуры (двухтактные схемы, системы деления/суммирования мощностей и т. д.). Макросборки УКС непротиворечиво ложатся в основные существующие конструктивы уже разработанных радиосистем.

ТАБЛИЦА 4

Выходная мощность, Вт	Габариты (мм·мм·мм)	Коэффициент усиления, (дБ)	КПД, %	Количество транзисторов	Стоимость изготовления, тыс. руб.
500	70x130x30	20	50	5	13.0
1000	70x260x30	23	45	10	26.0
2000	70x390x30	26	40	20	52.0
5000	140x390x30	30	35	50	110.0С

казывают, что использование технических решений и технологий УКС обеспечивает **многократный выигрыш** по ценовым, технологическим и массогабаритным характеристикам усилителя при сохранении или улучшении его тактико-технических характеристик.

Проведенные исследования позволяют предложить к дальнейшей проработке и производству линейку мощных макросборок УКС с диапазоном рабочих частот от 500 КГц до 100 МГц и мощностью до 5 КВт. Некоторые ожидаемые характеристики макросборок на транзисторах MOSFET, согласованных по входу и выходу, приведены в таблице 4. Макросборки согласованы по входу и выходу на сопротивление $W_0=75\pm 25$ Ом. Входной КСВн – 1,5.

Следует отметить, что все данные, приведенные в таблице 3 и таблице 4 по необходимости приблизительны и имеют оценочный характер.

Внешние электрические характеристики макросборок могут быть представлены в той же номенклатуре, что и характеристики мощных

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров С. Г. «Усиление высокочастотных сигналов». Монография. Рукопись. 1995 г. E-mail: tory133@mail. ru
2. «Широкополосные радиопередающие устройства» под редакцией О. В. Алексева. М., «Связь», 1976.
3. «Патент Российской Федерации № 1550597 «Высокочастотный усилитель», авт. С. Г. Тихомиров, В. Г. Спорий, 27 ноября 1987.
4. «Патент Российской Федерации № 2033686 «Широкополосный усилитель мощности», авт. Тихомиров С. Г., 21 ноября 1991.
5. «Wide-Band Power Amplifier» by S. G. Tikhomirov, USA Patent #5442323, Field Aug. 15, 1995.