

УДК 621.382.3

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОЩНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ ДИАПАЗОНА 2 – 4 ГГц

А.Л. Хвалин, Л.С. Сотов

*Изложены результаты моделирования мощного усилительного модуля с рабочим диапазоном частот в одну октаву и коэффициентом передачи по мощности более 24 дБ. Сложности в создании конструкций подобных модулей связаны не только с необходимостью согласования их элементов в широком диапазоне частот, но также, в значительной степени, с используемой полупроводниковой элементной базой. Так, например, определённое влияние на характеристики всего усилительного модуля могут вносить технологические элементы используемых готовых монолитных усилителей, либо корпуса дискретных транзисторов. Поэтому создание конструкции мощного усилительного модуля с конкретными рабочими характеристиками приводит к необходимости решения ряда сложных технических задач. Представлен принципиальный вид конструкции усилительного модуля с выходной мощностью до 50 Вт в диапазоне 2 – 4 ГГц, построенного по схеме суммирования мощностей ряда идентичных каналов усиления. В качестве элементной базы использованы серийно выпускаемые отечественные биполярные транзисторы КТ937А-2.*

**Ключевые слова:** усилитель мощности, биполярный транзистор, амплитудно-частотная характеристика, коэффициент стоячей волны (КСВ), S-параметры, коэффициент передачи.

Получение высоких выходных мощностей транзисторных усилителей является весьма сложной и актуальной задачей. Этот класс устройств во многих радиотехнических системах определяет важнейшие тактико-технические параметры системы, такие, как излучаемую и потребляемую мощность, ширину полосы рабочих частот, габариты и массу, надёжность и стоимость.

Узкополосное согласование мощных транзисторных усилителей (МТУ) как правило, не представляет технической сложности. Существует значительное число отечественных и зарубежных патентов, использующих для достижения высоких выходных мощностей параллельное включение отдельных транзисторных кристаллов, либо создание специальных монолитных полупроводниковых модулей [1]. Такие конструкции позволяют получить десятки и сотни Ватт выходной мощности. Однако они имеют серьёзное ограничение – усиление на одной фиксированной частоте.

Совершенно другая ситуация складывается при проектировании широкополосных МТУ. Необходимость использования широких частотных диапазонов (1/2 октавы и выше) часто является «критическим звеном», ограничивающим основные характеристики всей радиотехнической системы. При создании конструкции широкополосного МТУ необходимо учитывать ряд особенностей.

Основной конструктивной особенностью подобных МТУ является сложная схема построения выходного каскада. Известно, что возможности широ-

кополосного согласования транзистора существенно ухудшаются с ростом его выходной мощности (и, как следствие, с увеличением ширины затвора, ёмкостей активной структуры), что приводит к необходимости использования ряда дополнительных согласующих элементов: ёмкостей, индуктивностей, отрезков микрополосковых проводников.

Кроме того, необходимо исключить влияние корпуса транзистора, которое проявляется в виде дополнительных ёмкостей и индуктивностей [1 – 3] и в значительной степени определяет массогабаритные характеристики МТУ. Для исключения влияния корпуса транзистора возможно использование кристаллов дискретных транзисторов, что подразумевает разработку специальной технологии монтажа МТУ.

Поскольку отдельный транзисторный кристалл позволяет получить выходную мощность усилителя не более 1–2 Вт, в МТУ необходимо применять многоканальное суммирование мощности, что неизбежно усложняет конструкцию и вносит дополнительные потери.

Также требуются дополнительные меры (и схемы) подавления отражённых волн. При согласовании в широкой полосе частот функциональных блоков МТУ и получения низкого уровня отражённых волн от входов и выходов отдельных каскадов усиления приходится применять реактивные элементы и схемные «излишества» в виде реактивно-диссипативных согласующих цепей [1]. Согласующие цепи оказывают влияние на усиление каска-

дов, обратные связи, выходную мощность и КПД всего МТУ, увеличивают габариты и усложняют конструкцию МТУ.

Перечисленные особенности МТУ приводят к тому, что электрические параметры широкополосных приборов оказываются заметно хуже таковых у узкополосных усилителей, а габариты и стоимость – заметно (иногда в разы) выше. Тем не менее, имеется целый ряд систем, в которых применение широкополосных усилителей необходимо.

В настоящее время отечественный рынок мощных усилительных модулей в значительной степени заполнен продукцией зарубежных производителей. Однако для ряда применений МТУ предпочтительно использование отечественной элементной базы [1].

В связи с вышеизложенным, актуально проведение исследований по разработке мощных широкополосных усилителей на отечественной элементной базе в диапазоне рабочих частот 2 – 4 ГГц с выходной мощностью до 50 Вт. Обеспечение широкой полосы рабочих частот МТУ на основе отечественных биполярных транзисторов является важной задачей для создания конкурентоспособной отечественной аппаратуры [1 – 5]. МТУ определяют важнейшие тактико-технические параметры радиотехнических систем, такие, как излучаемую и потребляемую мощность, ширину полосы рабочих частот, габариты и массу, надёжность и стоимость.

Российской электронной промышленностью, в частности ОАО «НПП «Пульсар», г. Москва; ОАО «НИИЭТ», г. Воронеж, выпускается широкий ряд мощных транзисторов и монолитных усилительных модулей. Как отмечалось выше, для достижения высокой выходной мощности необходимо выполнять каскадное суммирование мощности, что требует создания специальной конструкции МТУ.

МТУ с диапазоном рабочих частот 2 – 4 ГГц и выходной мощностью до 50 Вт включает ряд основных блоков: блоки усиления, деления мощности для включения нескольких каналов усиления, блоки суммирования мощности.

Сложность построения МТУ в едином корпусе обусловлена большим числом каналов суммирования, тепловыми проблемами и трудностями настройки. Один из способов решения проблемы состоит в использовании идентичных усилителей с последующим суммированием мощности при помощи суммирующих схем с малыми потерями.

**Блок-схема МТУ**

На рис. 1 и 2 представлены функциональная блок-схема МТУ в микрополосковом исполнении

на подложке из поликора толщиной 1 мм и блок-схема канала усиления (КУ).

Мощный усилитель имеет в своём составе: блоки деления мощности (D1 – D4, DS), блоки суммирования мощности (S1 – S4, DS), унифицированные базовые усилительные модули (VIP1, VIP2), параллельные каналы усиления КУ1 – КУ8).

Мощные биполярные транзисторы имеют относительно небольшой коэффициент усиления. Поэтому для достижения значений усиления МТУ не менее 20 дБ возникает необходимость последовательного включения нескольких каскадов усиления. Первый каскад усиления МТУ содержит базовые усилители мощности VIP1 и VIP2, второй каскад усиления имеет 8 каналов КУ1 – КУ8 с параллельно-последовательным включением усилителей VIP1 и VIP2.

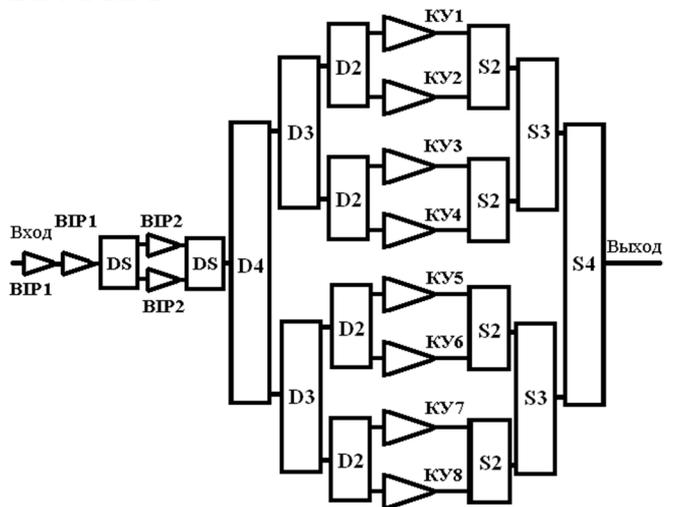


Рис. 1. Блок-схема МТУ

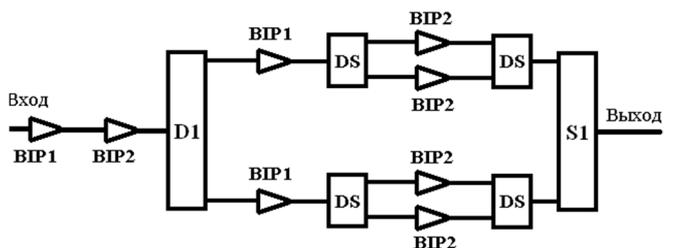


Рис. 2. Блок-схема канала усиления

Для получения выходной мощности 50 Вт, при небольшой выходной мощности используемых транзисторов, использовано многоканальное суммирование выходных сигналов усилительных модулей КУ1 – КУ8, включённых параллельно. В базовых усилительных модулях (VIP1 и VIP2) биполярные транзисторы включены по схеме с общей базой и содержат цепи согласования.

В связи со сложностью схемы МТУ и большим объёмом вычислений, при проектировании возникает необходимость использования чрезмерно больших вычислительных ресурсов, что не позволяет проведение расчётов в реальном времени. Только решение задачи анализа МТУ, в зависимости от стартовых условий, может занимать несколько часов даже на современных компьютерах [1]. Поэтому структурная и параметрическая оптимизация характеристик МТУ проводилась путём оптимизации параметров отдельных блоков [3 – 5] по рис. 1 и 2, согласованных на входе и выходе с сопротивлением 50 Ом, и последующим сведением моделей блоков в единый расчётный проект всего МТУ.

**Базовый усилительный модуль**

С целью уменьшения габаритных размеров базового усилительного модуля и нерегулярностей, неизбежно вносимых корпусом и выводами транзистора, при проектировании использованы кристаллы транзисторов в бескорпусном исполнении.

В качестве элемента усиления для базового модуля выбран биполярный транзистор КТ937А-2 производства ОАО «НПП «Пульсар» (г. Москва). Транзистор КТ937А-2 имеет достаточно широкую полосу рабочих частот от 0,9 до 5 ГГц при выходной мощности 1,6 Вт и коэффициенте усиления 3 дБ [3].

В качестве модели транзистора использовалась модель Гуммеля – Пуна [4, 5]. Параметры модели определялись по статическим и частотным характеристикам по методикам, описанным в [6 – 9].

Усилитель разработан на базе унифицированных базовых усилительных модулей с входным и выходным сопротивлением 50 Ом. Каждый модуль состоит из трёх усилительных каскадов, делителя и сумматора мощности.

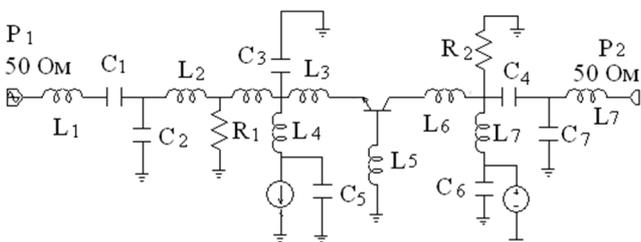


Рис. 3. Схема усилительного каскада

Усилительные каскады имеют идентичные схемотехнические решения и представляют собой транзисторный усилитель с общей базой (рис. 3) с цепями питания на элементах C5, C6, L4, L7, цепями согласования на входе (C1 – C3, L1 –

L2, R1 – R2, C4, C7, L7), индуктивностями выводов транзистора L3, L5, L6. Делитель и сумматор мощности выполнены по схеме, приведённой ниже.

Для обеспечения требуемой выходной мощности усилительного модуля используется схема с суммированием сигналов двух усилительных каскадов (см. рис. 2). При этом базовый усилительный модуль имеет предельную выходную мощность  $2 \cdot 1,6 = 3,2$  Вт. Тогда шестнадцатиканальная схема суммирования усилительных модулей позволит получить на выходе мощность  $16 \cdot 3,2 = 51,2$  Вт.

На рис. 4 представлены результаты расчёта коэффициента передачи базового усилительного модуля после оптимизации цепей согласования. Как видно из рисунка, коэффициент передачи находится в пределах от 8,5 до 9 дБ в рабочем диапазоне частот. При этом оптимальные значения коэффициентов стоячей волны напряжения (КСВН) от входа усилительного модуля в рабочем диапазоне частот (2 – 4 ГГц), представленные на рис. 5, не более 1,35, а значения КСВН от выхода усилительного модуля, представленные на рис. 6, не более 1,45.

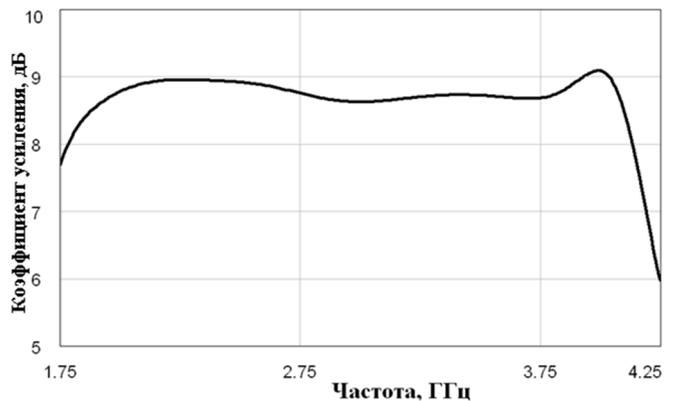


Рис. 4. Коэффициент усиления базового усилительного модуля

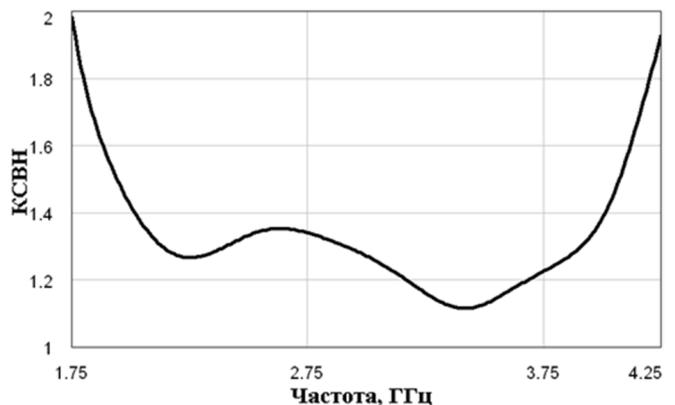


Рис. 5. КСВН входа усилительного модуля

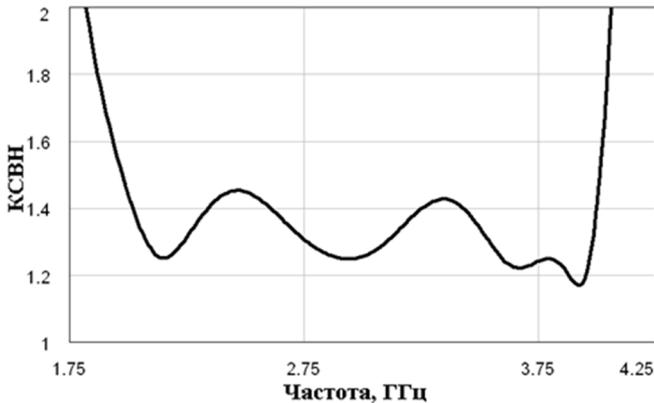


Рис. 6. КСВН выхода усилительного модуля

Таким образом, последовательное соединение трёх усилительных модулей позволяет получить коэффициент усиления МТУ в пределах от 24,5 до 25,5 дБ с коэффициентами стоячей волны на входе и выходе не более 1,5 в рабочей полосе частот.

Размеры базового усилительного модуля составили 7×30 мм, что позволяет оценить минимальные размеры всего усилителя в пределах 112×90 мм. Все усилительные модули располагались на едином поликоровом основании. Для отвода тепла плата размещается на общем радиаторе, на котором установлен датчик температуры, обеспечивающий температурную стабилизацию параметров усилителя за счёт изменения напряжения смещения транзисторов.

### Базовая конструкция делителя/сумматора мощности

Делители/сумматоры мощности D1 – D4, S1 – S4 выполнены на основе конструкции двухканального делителя мощности в микрополосковом исполнении. Принципиальная конструкция блока деления мощности D2 аналогична конструкции блока суммирования мощности S2 и показана на рис. 7.

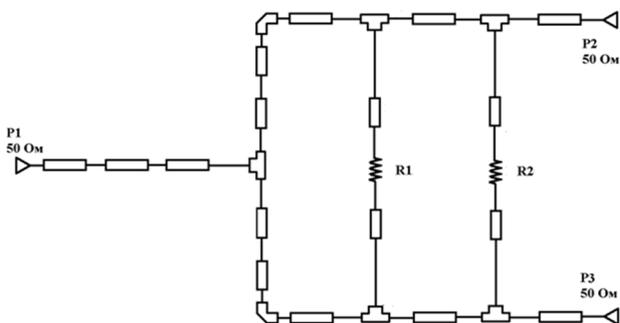


Рис. 7. Эквивалентная схема двухканального делителя/сумматора мощности

На рис. 7 показаны элементы микрополоскового тракта (отрезки линии передачи, уголкового

повороты, тройники) и согласующие сопротивления R1 и R2. Порты входа (P1) и выходы (P2 и P3) согласованы на 50 Ом. Такие конструкции делителей/сумматоров мощности известны [1 – 3], описаны подходы к их проектированию [1]. Конструкция симметрична, что облегчает её оптимизацию. Параметрическая оптимизация блока деления мощности (см. рис.6) проведена с целью достижения наилучших рабочих характеристик в диапазоне частот 2 – 4 ГГц: минимальных потерь с входа на выходы делителя, минимального уровня КСВН, максимального значения развязки между выходами 2 и 3 делителя. На рис. 8 – 11 представлены основные характеристики: КСВН входа и выхода не более 1,13, относительная мощность на выходах делителя от 0,485 до 0,49, уровень развязки между выходами не менее 25 дБ.

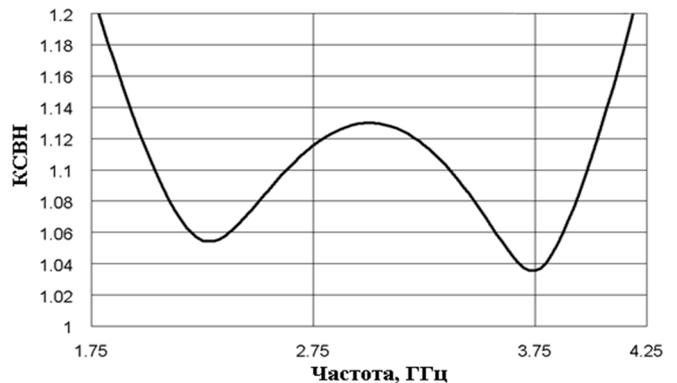


Рис. 8. КСВН входа двухканального делителя мощности

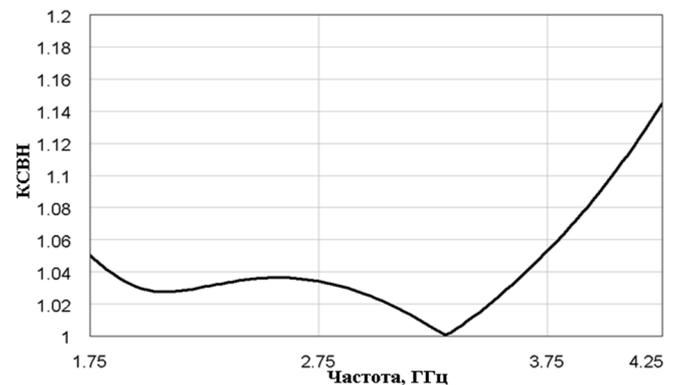


Рис. 9. КСВН выхода двухканального делителя мощности

Проведены структурная и параметрическая оптимизация [2, 3] конструкций всех блоков деления/суммирования мощности D2 – D4, S2 – S4 (см. рис. 1). Получены их оптимальные параметры и соответствующие им основные характеристики: КСВН входа и выходов, развязка между выходами, относительная мощность на выходах.

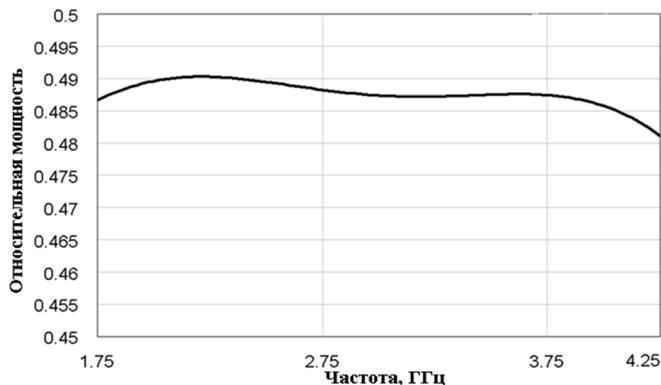


Рис. 10. Относительная мощность на выходах делителя

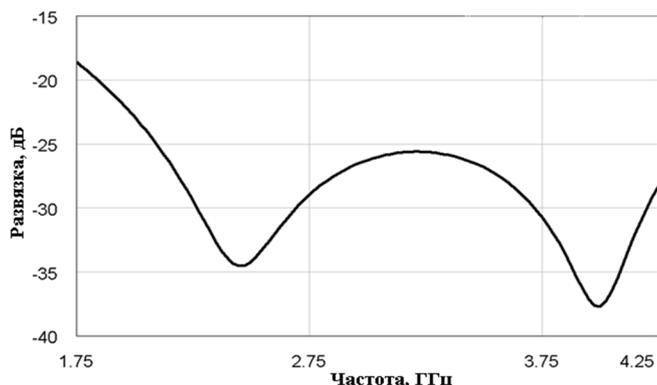


Рис. 11. Развязка выходов делителя

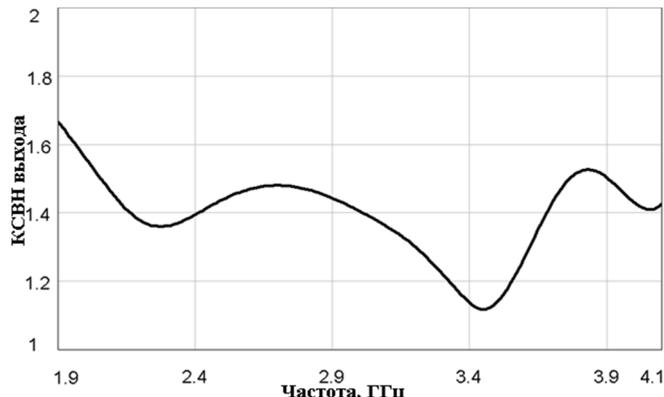


Рис. 13. КСВН выхода МТУ

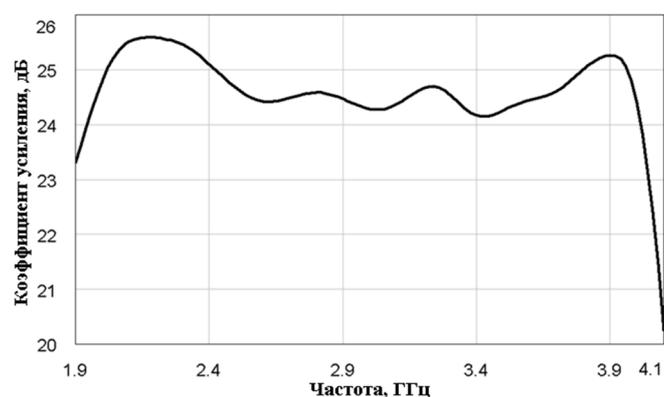


Рис. 14. Коэффициент усиления МТУ

### Расчётные характеристики мощного усилителя

Блоки МТУ в соответствии с рис. 1, после решения задач оптимизации [6 – 9] их основных характеристик, сведены в единый расчётный проект всего устройства. В результате решения задачи анализа МТУ получены его основные характеристики в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц. На рис. 12 – 14 показаны соответственно: КСВН входа, выхода и коэффициент усиления МТУ.

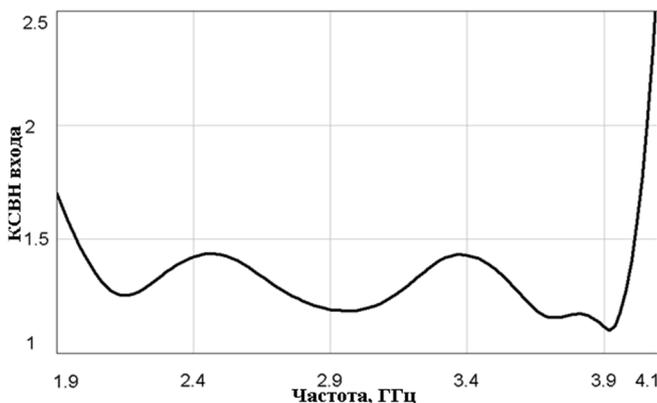


Рис. 12. КСВН входа МТУ

### Заключение

Методики проектирования, использованные при создании конструкции МТУ, могут применяться при постановке и решении задач структурной и параметрической оптимизации устройств самого разного назначения [10 – 17].

В результате проведённой работы создана конструкция МТУ и его основных блоков: делителей/сумматоров мощности на 2, 4, 8, 16 каналов в микрополосковом исполнении, базового двухкаскадного усилительного модуля. Представлен компьютерный проект МТУ, получены его оптимальные характеристики в рабочем диапазоне частот от 2 до 4 ГГц.

### Литература

1. Хвалин А. Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах: автореф. дисс. на соиск. уч. степени д.т.н.: 05.12.04 / Поволжская гос. Академия телекоммуникаций информатики. – Самара, 2014. – 32 с.
2. Kats B. M., Meschanov V. P., Khvalin A. L. Synthesis of superwide-band matching adapters in round coaxial lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2001. – V. 49. – No 3. – P. 575 – 579.

3. Сотов Л. С., Хвалин А. Л. Средства разработки и исследования архитектурных моделей в САПР System Studio. Ч. 1. Использование инструментов System Studio при моделировании матричного генератора перестановок // Гетеромагнитная микроэлектроника / Л. С. Сотов, А. Л. Хвалин. – Саратов : Изд-во Саратовского университета, 2008. – № 5. – С. 121 – 145.
4. Хвалин А. Л., Воробьёв А. В. Оптимизация характеристик телевизионного усилителя диапазона дециметровых волн // Радиотехника. – 2015. – № 10. – С. 146 – 150.
5. Хвалин А. Л., Страхова Л. Л., Воробьёв А. В. Оптимизация параметров модели биполярного транзистора по его экспериментальным характеристикам // Радиотехника. – 2015. – № 7. – С. 35 – 40.
6. Хвалин А. Л., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Васильев А. В., Самолданов В. Н. Электродинамическое моделирование СВЧ-усилителей с гетеромагнитным управлением // Гетеромагнитная микроэлектроника / А. Л. Хвалин и др. – Саратов: Изд-во СГУ, 2004. – С. 99 – 105. – Вып. 1. Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ- и КВЧ-диапазонов.
7. Самолданов В. Н., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. А., Хвалин А. Л., Маринин А. В., Коваленко М. Л. Компьютерное моделирование ферритовых резонаторов во внутренних цепях биполярного транзистора в усилительном режиме работы // Гетеромагнитная микроэлектроника / В. Н. Самолданов и др. – Саратов: Изд-во СГУ, 2004. – С. 110–118. – Вып. 1. Многофункциональные комплексированные устройства и системы СВЧ и КВЧ-диапазонов.
8. Хвалин А. Л., Васильев А. В. Оптимальный синтез характеристик транзисторного усилителя УВЧ-диапазона в интегральном исполнении // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 10. – С. 29 – 33.
9. Мещанов В. П., Хвалин А. Л. Методика уточнения характеристик модели Матерка полевого транзистора // Радиотехника. – 2010. – № 5. – С. 111 – 115.
10. Хвалин А. Л. Векторный магнитометр слабых магнитных полей // Измерительная техника. – 2014. – № 10. – С. 45 – 48.
11. Хвалин А. Л., Солопов А. А., Ляшенко А. В. Исследование СВЧ-резонаторов на эпитаксиальных структурах ЖИГ с учётом доменной структуры // Гетеромагнитная микроэлектроника. – 2012. – № 12. – С. 4 – 11.
12. Хвалин А. Л. Моделирование магнитной микроструктуры полосовых доменов в плёнках ЖИГ // Гетеромагнитная микроэлектроника. – 2011. – № 11. – С. 4 – 14.
13. Хвалин А. Л., Овчинников С. В., Сотов Л. С., Самолданов В. Н. Первичный преобразователь на основе ЖИГ генератора для измерения сильных магнитных полей // Датчики и системы. – 2009. – № 10. – С. 57 – 58.
14. Хвалин А. Л. Метод поверхностной магнитной проницаемости в решении задачи анализа слоистых ферритосодержащих структур // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2009. – № 4. – С. 25 – 30.
15. Хвалин А. Л. Дисперсионные соотношения для слоистых ферритосодержащих структур в прямоугольном волноводе // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2010. – № 1. – С. 73 – 80.
16. Khvalin A. L. A vector magnetometer for measuring weak fields // Measurement Techniques. – 2015. – Т. 57. – № 10. – С. 1184 – 1188.
17. Ассессоров В. В., Кожевников В. А., Асеев Ю. Н., Гаганов В. В. Модули ВЧ-усилителей мощности для портативных средств связи // Электросвязь. – 1997. – № 7. – С. 21 – 22.

Поступила в редакцию 11.05.2016

*Александр Львович Хвалин, д-р техн. наук, профессор,  
Леонид Сергеевич Сотов, д-р техн. наук, профессор.  
Т. (964) 848-37-20, e-mail: Khvalin63@mail.ru.  
Саратовский государственный университет.*

## DESIGN of 2–4 GHz HIGH-POWER AMPLIFIER MODULES

**A.L. Khvalin, L.S. Sotov**

*In the article, results of modeling of a high-power amplifier module with one-octave operating bandwidth and power transmittance efficiency of more than 24 dB have been presented. Developing of such modules may be rather difficult not only because their components shall be matched in a wide frequency band, but also because they are built with the use of semiconductor component base. For example, technological components of the fabricated monolithic amplifiers or of discrete transistors case can have certain effect on characteristics of the entire amplifier module. Therefore developing of a high-power amplifier module structure with specific operational characteristics makes it necessary to solve many engineering problems. In the article, schematic structure view of amplifier module with 50 W output power in 2–4 GHz frequency bandwidth, built by using of a circuit for adding power from identical amplifier channels, is presented. Mass-produced domestic bipolar transistors KT937A-2 have been used as component base.*

**Key words:** high-power amplifier, bipolar transistor, amplitude-frequency characteristic, standing-wave ratio (SWR), S-parameters, transfer factor.

### List of References

1. Khvalin A. L. Analysis and synthesis of integral magnetic ferrite resonator wireless devices: Author's abstract of the Ph.d. thesis in Engineering Sciences: 05.12.04 / Povolzhskiy State Academy for Telecommunication and Informatics. – Samara, 2014. – 32 p.
2. Kats B. M., Meschanov V. P., Khvalin A. L. Synthesis of superwide-band matching adapters in round coaxial lines // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2001. – V. 49. – No. 3. – P. 575 – 579.
3. Sotov L. S., Khvalin A. L. Instruments for developing and research of architectural models in CAD System Studio. Part 1. Using instruments of System Studio for simulation of matrix type permutation generator // Heteromagnetic microelectronics / L. S. Sotov, A.L. Khvalin. – Saratov : Publishing house of Saratov State University, 2008. – No. 5. – P. 121 – 145.
4. Khvalin A. L., Vorobev A. V. Optimization of UHF TV amplifier characteristics // Radiotechnica. – 2015.– No. 10. – P. 146 – 150.
5. Khvalin A. L., Strakhova L. L., Vorobev A. V. Optimization of the bipolar transistor model parameters by using of experimental characteristics // Radiotechnica. – 2015.– No. 7. – P. 35 – 40.
6. Khvalin A. L., Ignatev A. A., Liashenko A. V., Vasilev A. V., Samoldanov V. N. Electrodynamic modeling of UHF-amplifiers with heteromagnetic control // Heteromagnetic microelectronics / A.L. Khvalin et al. – Saratov : [Publishing house of Saratov State University, 2004. – P. 99 – 105. – Issue 1. Multifunctional interconnected UHF and EHF devices and systems.
7. Samoldanov V. N., Ignatev A. A., Liashenko A. V., Solopov A. A., Khvalin A. L., Marinin A. V., Kovalenko M. L. Computerized simulation of ferrite resonators in bipolar transistor inner circuits by operation in amplifier mode // Heteromagnetic microelectronics / V. N. Samoldanov et al. – Saratov : Publishing house of Saratov State University, 2004. – P. 110 – 118. – Issue 1. Multifunctional interconnected UHF and EHF devices and systems.
8. Khvalin A. L., Vasilev A. V. Optimal synthesis of UHF transistor amplifier in integral version // Devices and Systems. Control, monitoring, diagnostics. – 2010. – No. 10. – P. 29 – 33.
9. Meshchanov V. P., Khvalin A. L. Method for correction of Materka model field-effect transistor characteristics // Radiotechnica. – 2010. – No. 5. – P. 111 – 115.
10. Khvalin A. L. Three-axis weak magnetic field magnetometer // Measuring equipment. – 2014. – No. 10. – P. 45 – 48.
11. Khvalin A. L., Solopov A. A., Liashenko A. V. Research of UHF-cavities using YIG epitaxial structures with regard to domain configuration // Heteromagnetic microelectronics. – 2012. – No. 12. – P. 4 – 11.
12. Khvalin A. L. Simulation of magnetic microstructure of strip domains in JIG films // Heteromagnetic microelectronics. – 2011. – No. 11. – P. 4 – 14.
13. Khvalin A. L., Ovchinnikov S. V., Sotov L. S., Samoldanov V. N. Primary transducer based on JIG generator for measuring of strong magnetic field // Sensors and systems. – 2009. – No. 10. – P. 57 – 58.
14. Khvalin A. L. Method of surface magnetic conductivity for analysis of layer-like ferrite-containing structures // Bulletin of the Pacific National University. – 2009. – No. 4. – P. 25 – 30.
15. Khvalin A. L. Dispersion relations for ferrite-containing layer-like structures in rectangular waveguides // Bulletin of the Pacific National University. – 2010.– No. 1. – P. 73 – 80.
16. Khvalin A. L. A Vector magnetometer for measuring weak fields // Measurement Techniques. – 2015. – T. 57. – No. 10. – P. 1184 – 1188.
17. Asectorov V. V., Kozhevnikov V. A., Aseev I. N., Gaganov V. V. HF power amplifier modules for use in portable communication facilities // Telecommunications. – 1997. – No. 7. – P. 21 – 22.

*Alexandr Lvovich Khvalin, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor.  
Leonid Sergeevich Sotov, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor.  
T.: (964) 848-37-20, e-mail: Khvalin63@mail.ru.  
Saratov State University.*