



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 3. С. 275–284

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2021, vol. 21, iss. 3, pp. 275–284

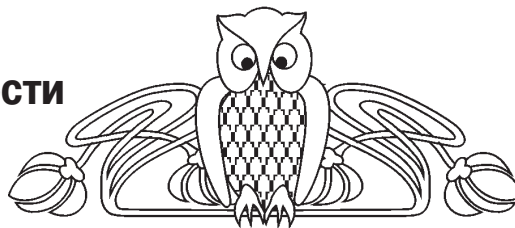
<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-3-275-284>

Научная статья

УДК 621.37

Моделирование усилителей мощности в среде Microwave Office



А. Л. Хвалин , А. В. Калинин

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Хвалин Александр Львович, доктор технических наук, профессор кафедры общей физики, Khvalin63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4746-469X>

Калинин Артем Викторович, магистрант кафедры общей физики, artemvkalinin98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5854-1876>

Аннотация. Представлены основные этапы разработки транзисторного усилителя УВЧ и КВЧ диапазонов в октавном диапазоне рабочих частот на основе отечественного биполярного транзистора 2Т937А в микрополосковом исполнении в среде САПР Microwave Office. Широкополосное согласование стало возможным за счет использования дискретных транзисторных кристаллов, допускающих включение отрезков микрополосковых линий передачи и сосредоточенных элементов (резисторов, индуктивностей и емкостей) на входах и выходах внутренних усилительных каскадов. Номинальные значения сосредоточенных элементов и геометрические размеры отрезков микрополосковых линий передачи использовались в качестве варьируемых параметров в соответствующих задачах оптимизации. В результате решения задач структурной и параметрической оптимизации созданы принципиальные электрические схемы усилителя и его составных блоков (делителей/сумматоров мощности на два канала, базового двухкаскадного усилительного модуля), получены их оптимальные частотные характеристики. Моделирование транзистора проведено по эквивалентной схеме Гуммеля – Пуна в САПР Microwave Office. Конструкция усилителя мощности выполнена в микрополосковом исполнении на подложке из поликора толщиной 1 мм. В диапазоне частот от 2 до 4 ГГц перепад коэффициента усиления находится в пределах от 14 до 15 дБ. Выходная мощность усилителя составляет 22.5 Вт, КСВН входа и выхода не более 1.5. Конструкция допускает возможность интегрального исполнения.

Ключевые слова: усилитель мощности, эквивалентная схема Гуммеля – Пуна, делитель/сумматор мощности, компьютерная модель транзистора, параметрическая и структурная оптимизация, система автоматизированного проектирования

Для цитирования: Хвалин А. Л., Калинин А. В. Моделирование усилителей мощности в среде Microwave Office // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2021. Т. 21, вып. 3. С. 275–284. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-3-275-284>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Modeling power amplifiers in the Microwave Office environment

А. Л. Khvalin , А. V. Kalinin

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Alexander L. Khvalin, Khvalin63@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4746-469X>

Artem V. Kalinin, artemvkalinin98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5854-1876>

Abstract. Background and Objectives: A very difficult and urgent task is to obtain high output powers of transistor amplifiers. This class of devices in many radio engineering systems determines the most important technical parameters of the system, such as radiated and consumed power, bandwidth, dimensions and weight, reliability and cost. Known monolithic amplifier designs make it possible to obtain tens and hundreds of watts of output power. However, monolithic structures have limited operating frequency ranges, usually no more than a few hundred megahertz. Expansion of the operating frequency range of the power amplifier is possible by using discrete transistor crystals as active elements. The use of discrete crystals of transistors allows you to include elements of matching between amplification stages and significantly improve the main characteristics of the amplifier: VSWR of the input / output, gain, efficiency, operating frequency range (up to one octave or more). According to a number of criteria, a bipolar transistor of Russian production 2Т937А was selected as active elements.

Materials and Methods: When designing the amplifier, discrete crystals of a bipolar transistor 2Т937А were used. However, in computer modeling of radio engineering devices, it is necessary to take into account the absence of models of many Russian and foreign transistors in CAD libraries (in particular, Microwave Office), which significantly limits the possibilities of designing devices based on them. The article uses a computer model of the 2Т937А transistor, obtained as a result of solving the problems of multicriteria optimization of the equivalent circuit of the transistor. Experimental characteristics of the bipolar transistor 2Т937А (static and frequency parameters) were used as optimization goals.



The simulation of the transistor was carried out according to the equivalent Gummel – Poon circuit in the CAD Microwave Office. The article presents the design of a power amplifier based on 2T937A and its main units: power dividers / adders for two channels, a basic two-stage amplifier module. The corresponding problems of parametric and structural optimization are formulated and solved. **Results:** As a result of the research carried out, a microstrip power amplifier design was obtained on a 1 mm thick polycor substrate with a gain of 14–15 dB in the frequency range from 2 to 4 GHz. The output power is 22.5 W, the VSWR of the input and output is no more than 1.5. **Conclusion:** The device can be used as a pre-amplifier in the tasks of obtaining high values of the output power of the UHF and VHF ranges.

Keywords: power amplifier, Gummel – Poon equivalent circuit, power divider / adder, transistor computer model, parametric and structural optimization, computer-aided design system

For citation: Khvalin A. L., Kalinin A. V. Modeling power amplifiers in the Microwave Office environment. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2021, vol. 21, iss. 3, pp. 275–284 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2021-21-3-275-284>

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Актуальность работы связана с отсутствием отечественной элементной базы в библиотеках современных компьютерных САПР [1–5]. Это обстоятельство существенно ограничивает возможности успешного проектирования отечественных радиоэлектронных устройств при использовании компьютерных САПР [2–4].

Также весьма сложной и актуальной задачей является получение высоких выходных мощностей транзисторных усилителей. Конструкции отечественных и зарубежных УМ монолитного типа [1, 6–12], позволяющие получить десятки и сотни Ватт выходной мощности, имеют существенный недостаток – узкие рабочие диапазоны частот, не превышающие нескольких сотен мегагерц. Однако многие применения УМ требуют использования широких частотных диапазонов (1/2 октавы и выше) [1–4, 13–16]. В таких случаях монолитное исполнение конструкции усилителя является «критическим звеном», ограничивающим его основные характеристики, поскольку не позволяет в полной мере использовать согласующие цепи.

Известно, что увеличение мощности транзистора приводит к уменьшению рабочего диапазона частот. Физически это объясняется тем, что для увеличения мощности конструкция транзистора требует увеличения ширины затвора и соответствующих межэлектродных ёмкостей активной структуры. Кроме того, негативное влияние на широкополосность оказывает корпус транзистора, который также вносит дополнительные реактивности и в значительной степени определяет массогабаритные характеристики усилителя мощности (УМ). Для исключения влияния корпусов транзисторов при проектировании УМ используются бескорпусные кристаллы транзисторов, которые могут устанавливаться непосредственно на плату УМ. Такое исполнение конструкции позволяет получить октавный диапазон рабочих частот УМ за счет использования согласующих

подсхем, включающих отрезки микрополосковых линий передачи и дискретные активные элементы.

С учетом перечисленных требований при компьютерном моделировании УМ необходимо решить следующие задачи: создание модели транзистора, разработка схемы базового усилительного блока, разработка схем суммирования/деления мощности, решение задач параметрической и структурной оптимизации отдельных блоков и УМ в целом. Формулировка и решение соответствующих задач представлены далее.

При моделировании отдельных блоков устройства были сформулированы и решены задачи параметрической и структурной оптимизации. Были использованы известные методы параметрической оптимизации: симплекс-метод и метод случайного поиска. По результатам параметрической оптимизации вносились изменения в принципиальные схемы блоков усилителя.

В результате проведенной работы в среде Microwave Office разработан УМ с выходной мощностью более 20 Вт в октавном диапазоне рабочих частот с характеристиками, не уступающими известным отечественным и зарубежным аналогам.

1. Блок-схема УМ

Поскольку отдельный транзисторный кристалл 2Т937А позволяет получить выходную мощность усилителя не более 1.6 Вт, в УМ необходимо применять многоканальное суммирование мощности, которое допускает включение согласующих элементов во входные и выходные цепи усилительных каскадов

УМ с диапазоном рабочих частот 2–4 ГГц и выходной мощностью более 20 Вт включает ряд основных блоков: блоки усиления, блоки деления мощности для включения нескольких каналов усиления, блоки суммирования мощности [1, 4].

На рис. 1 представлена функциональная блок-схема УМ в микрополосковом исполнении на подложке из поликорика толщиной 1 мм.

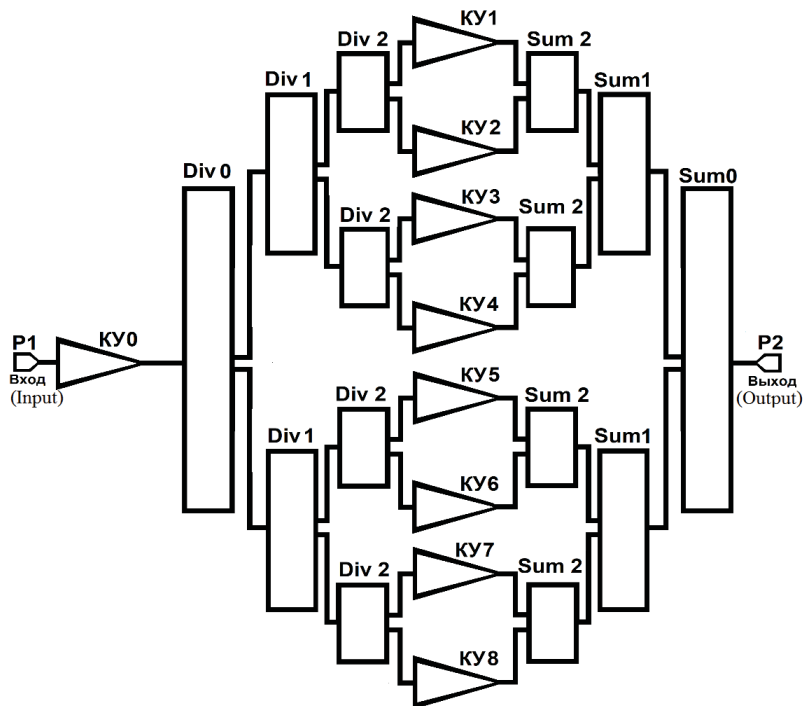


Рис. 1. Блок-схема усилителя мощности
Fig. 1. Power amplifier block diagram

Усилитель мощности имеет в своем составе блоки деления мощности (Div0–Div3), блоки суммирования мощности (Sum0–Sum3), унифицированные базовые усилительные модули VIP1, VIP2, канал усиления на входе KY0 и параллельные каналы усиления KY1–KY8 (рис. 2).

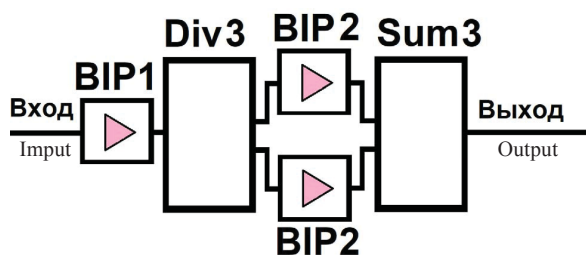


Рис. 2. Блок-схема канала усиления
Fig. 2. Amplification channel block diagram

Мощные биполярные транзисторы имеют относительно небольшой коэффициент усиления [2–4, 17–20]. Поэтому для достижения значений усиления УМ не менее 14 дБ возникает необходимость последовательного включения нескольких каскадов усиления. Первый каскад усиления УМ содержит базовые усилители мощности VIP1 и VIP2, второй каскад усиления имеет 8 каналов KY1–KY8 с параллельно-последовательным включением усилителей VIP1 и VIP2. Для получения выходной мощности 20 Вт при

небольшой выходной мощности используемых транзисторов, применялось многоканальное суммирование выходных сигналов усилительных модулей KY1 – KY8, 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 УМ и большим объёмом вычислений при проектировании возникает необходимость использования чрезмерно больших вычислительных ресурсов, что не позволяет проводить расчётов в реальном времени. Только решение задачи анализа УМ в зависимости от стартовых условий может занимать несколько часов даже на современных компьютерах [1], поэтому структурная и параметрическая оптимизация характеристик УМ проводилась путём оптимизации параметров отдельных блоков, изображённых на рис. 1, 2, согласованных на входе и выходе с сопротивлением 50 Ом, и последующим сведением моделей блоков в единый расчётный проект всего УМ.

2. Моделирование кристалла транзистора 2T937A

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



В качестве элемента усиления для базового модуля выбран биполярный транзистор 2Т937А производства ОАО «Пульсар» (г. Москва). Транзистор имеет достаточно широкую полосу рабочих частот от 0.9 до 5 ГГц при выходной мощности 1.6 Вт и коэффициенте усиления 3 дБ [2, 3].

В качестве модели транзистора использовалась модель Гуммеля – Пуна [1]. Параметры модели определялись по статическим и частотным характеристикам по методике, описанной в [1]. Базовая модель транзистора имеет 60 параметров, что существенно осложняет решение задачи оптимизации по определению эквивалентных параметров транзистора 2Т937А. На основе решения задач оптимизации при использовании экспериментальных статических и частотных характеристик в качестве целевых функций получены численные значения оптимальных параметров модели Гуммеля – Пуна транзистора 2Т937А [2].

Поскольку каждый транзистор имеет ограничение по уровню входной мощности, в уси-

лительном каскаде возникает необходимость использования делителя мощности для обеспечения допустимого уровня входной мощности транзистора с последующим суммированием выходной мощности от усилительных каскадов.

3. Базовый усилительный модуль

Унифицированные усилительные модули ВІР1 и ВІР2 (см. рис. 2) согласованы по входу и выходу на сопротивление 50 Ом. Каждый модуль содержит один транзисторный кристалл.

Усилительные каскады (ВІР1 и ВІР2) имеют идентичные схемотехнические решения и представляют собой транзисторный усилитель с общей базой (рис. 3) с цепями питания на элементах С5, С6, L5, L8, цепями согласования на входе и выходе (С1 – С3, L1 – L3, R1 – R2, С4, С7 – С8, L9), индуктивностями выводов транзистора L4, L6, L7, конденсатор С4, а также микрополосковые элементы (TL1–TL19).

На рис. 4 представлены результаты расчета коэффициента передачи по мощности

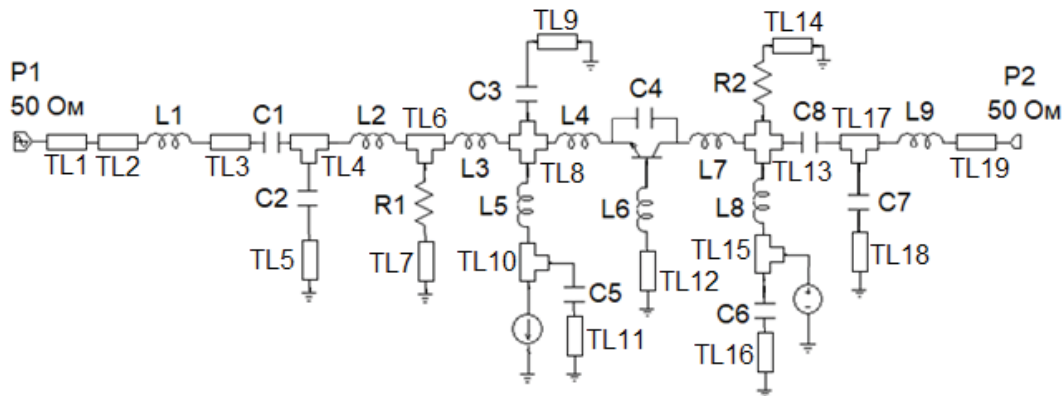


Рис. 3. Принципиальная схема усилительных каскадов ВІР1 и ВІР2
Fig. 3. Schematic diagram of the amplifier stages ВІР1 and ВІР2

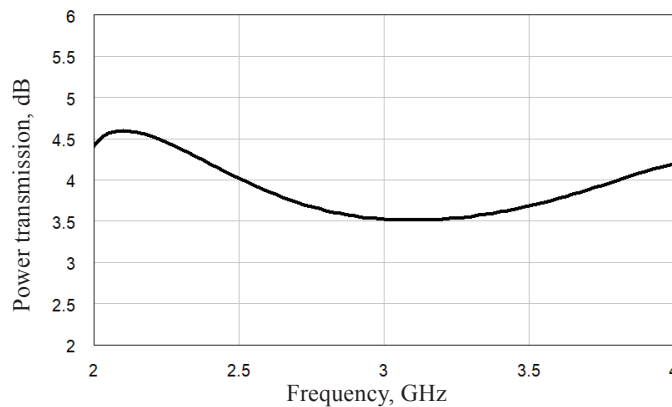


Рис. 4. Коэффициент передачи по мощности усилительного модуля ВІР1
Fig. 4. Power transmission ratio of the amplifier module ВІР1



усилительного модуля после оптимизации цепей согласования [1]. Видно, что коэффициент передачи находится в пределах от 3.5 до 4.6 дБ в рабочем диапазоне частот. При этом оптимальные значения коэффициента стоячей

волны по напряжению (КСВН) от входа усилительного модуля, представленные на рис. 5, не более 1.6, значения КСВН от выхода усилительного модуля, представленные на рис. 6, не более 1.55.

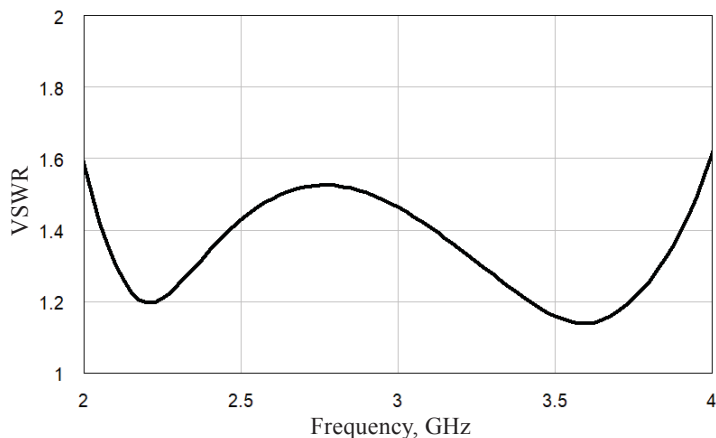


Рис. 5. КСВН входа усилительного модуля VIP1
Fig. 5. VSWR of the input of the amplifier module VIP1

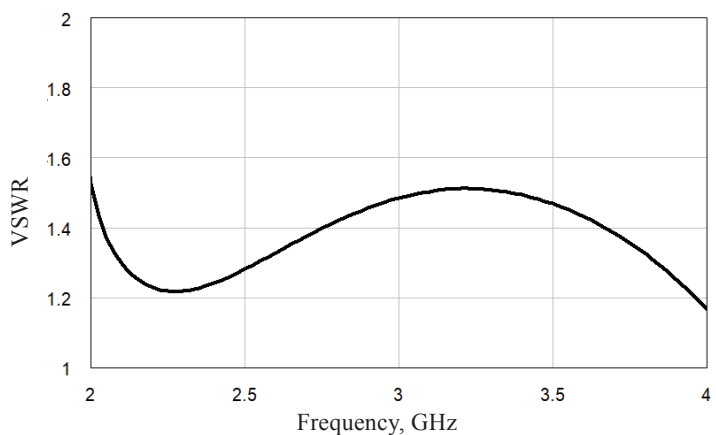


Рис. 6. КСВН выхода усилительного модуля VIP1
Fig. 6. VSWR of the output of the amplifier module VIP1

4. Базовые конструкции делителя и сумматора мощности

Делители Div0 – Div3 и сумматоры Sum0 – Sum3 мощности выполнены на основе базовой конструкции двухканального делителя мощности в микрополосковом исполнении. Принципиальная конструкция блоков деления и суммирования мощности показана на рис. 7.

На рис. 7 показаны элементы микрополоскового тракта (отрезки линии передачи, уголки поворота, тройники (TL1–TL28)), согласующие сопротивления R1 и R2. Порты входа (P1) и выходов (P2 и P3) согласованы на

50 Ом. Размеры отрезков микрополосковых линий передачи (ширина W , длина L), а также номинальные значения сосредоточенных элементов сопротивлений R1 и R2 являлись варьируемыми параметрами при решении соответствующей задачи оптимизации.

Параметрическая оптимизация блоков деления и суммирования мощности (см. рис. 7) проведена с целью достижения наилучших рабочих характеристик в диапазоне частот 2–4 ГГц: минимальных потерь с входа на выходы, минимального уровня КСВН, минимального ослабления сигнала между выходами 2 и 3 [1].

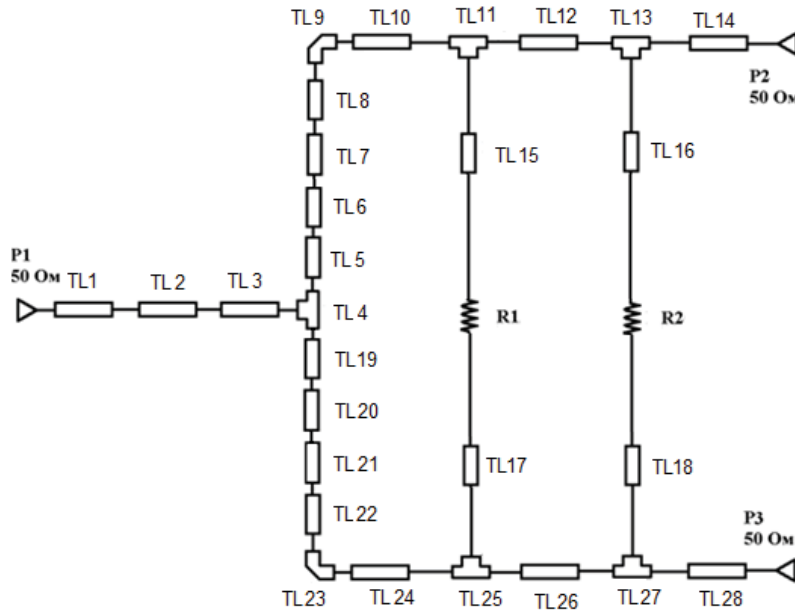


Рис. 7. Эквивалентная схема двухканального делителя/сумматора мощности
Fig. 7. Equivalent circuit of a two-channel power divider / combiner

5. Моделирование усилителя мощности

Перед делителем мощности Div0 имеется усилительный каскад на основе базовых усилительных модулей VIP1 и VIP2, который требуется для обеспечения достаточного уровня сигнала на входе второго каскада усиления (см. рис. 1). Последующие делители мощности Div0, Div1, Div2 разделяют выходной сигнал первого каскада усиления на восемь параллельных выходов, необходимых для включения каналов КУ1 – КУ8 второго каскада усиления. Для обеспечения требуемой выходной мощности УМ используется схема суммирования выходных сигналов усилительных каскадов КУ1 – КУ8 (см. рис. 1), включающая двухканальные сумматоры мощности Sum2, Sum1, Sum0. При этом восемь усилительных модулей (КУ1 – КУ8) второго каскада усиления имеют предельную выходную мощность $2 \times 1.6 = 3.2$ Вт. Тогда восьмиканальная схема суммирования (Sum2, Sum1, Sum0) выходной мощности усилительных модулей (КУ1 – КУ8) позволит получить на выходе УМ мощность $8 \times 3.2 = 25.6$ Вт.

Конструкции делителей и сумматоров мощности, представленные в предыдущих пунктах, известны, а подходы к их проектированию описаны в [1, 4].

Оптимальные значения параметров элементов отдельных блоков, входящих в состав всего устройства (см. рис. 1, 2), использованы в качестве начальных значений при оптимизации всего проекта в целом [1].

6. Оптимизация основных частотных характеристик усилителя мощности в диапазоне 2–4 ГГц

Поскольку усилитель мощности представляет собой комплексированное устройство, содержащее ряд взаимосвязанных блоков со своими наборами варьируемых параметров, непосредственное решение задачи оптимизации характеристик всего усилителя становится практически невозможным вследствие значительных вычислительных затрат [1]. С учетом изложенного задача получения оптимальных характеристик усилителя мощности включает в себя ряд частных задач по оптимизации параметров отдельных блоков усилителя (см. рис. 1, 2). Однако, как было отмечено выше, оказывается, что вследствие взаимного влияния элементов усилителя включение блоков с оптимальными характеристиками в общую схему (см. рис. 1) не позволяет получить оптимальные характеристики устройства в целом. Необходимая корректировка параметров достигается путём решения задачи оптимизации всего устройства. При этом найденные на предыдущих этапах оптимизации оптимальные параметры отдельных блоков выступают в качестве первого приближения при оптимизации усилителя мощности. Предложенная методика моделирования также использована при проектировании ряда устройств СВЧ диапазона [1, 5].

При оптимизации основных частотных характеристик устройства использованы симплекс-метод и метод случайного поиска [1].



В диапазоне частот от 2 до 4 ГГц получены частотные характеристики (рис. 8–10): КСВН входа и выхода, а также коэффициент усиления.

В рабочем диапазоне частот от 2 до 4 ГГц КСВН входа и выхода представленного усилителя составляет не более 1.5; коэффициент

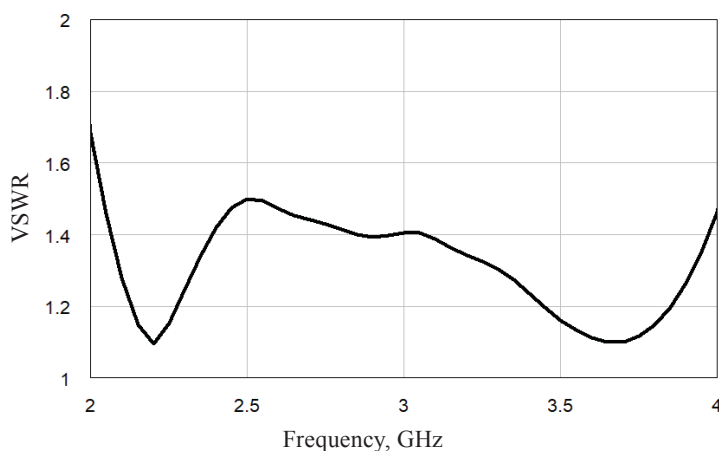


Рис. 8. КСВН входа усилителя мощности
Fig. 8. VSWR of the power amplifier input

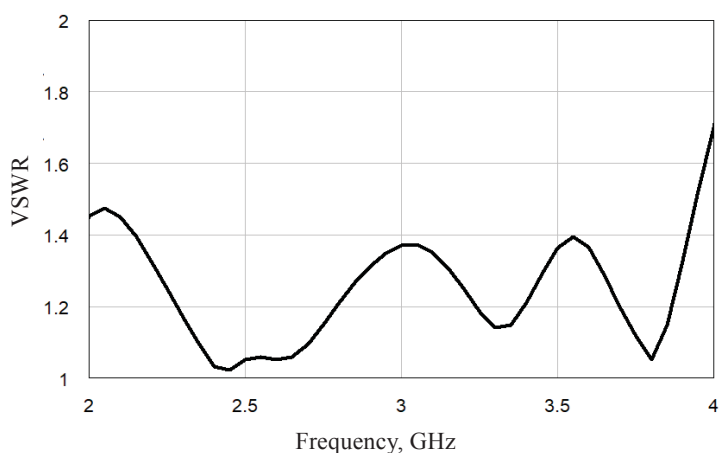


Рис. 9. КСВН выхода усилителя мощности
Fig. 9. VSWR of the power amplifier output



Рис. 10. Коэффициент усиления усилителя (дБ)
Fig. 10. Amplifier gain (dB)



усиления в пределах 14–15 дБ, максимальная выходная мощность 22.5 Вт (43.5 дБм).

Необходимо отметить, что представленные на рынке усилители СВЧ-диапазона отличаются чрезвычайно разнообразным сочетанием рабочих характеристик в зависимости от их функционального назначения: диапазон частот, КСВН входа/выхода, чувствительность, выходная мощность в линейном режиме, экономичность, массогабаритные показатели и др., что усложняет задачи поиска аналогов и сравнения характеристик.

Наиболее близкий диапазон рабочих частот имеет усилитель TM9420 фирмы API Technologies Corp. (США), однако его выходная мощность существенно меньше. Усилитель TQP3M9038 фирмы Qorvo (TriQuint Semiconductor + RFMD, США) имеет меньшее, чем у УМ, значение выходной мощности в более широкой полосе рабочих частот, но при этом КСВН входа/выхода превышает 2.0. Сравнительные характеристики усилителей представлены в таблице.

Сравнительная таблица характеристик усилителей мощности
Table. Comparative table of characteristics of power amplifiers

Наименование усилителя / Amplifier name	Диапазон частот, ГГц / Frequency range, GHz	Коэффициент усиления, дБ / Gain, dB /	КСВН (входа)/ (выхода) / (input)/(output) VSWR	Мощность, дБм / Power, dBm /	Производитель (ссылка) / Manufacturer (link)
TM9420	2–4,3	15–16	1,8/1,8	22	API Technologies Corp. https://assets.apitech.com/amplifiers/TM9420.pdf
TQP3M9038	0,05–4	13–16	2,6/2,3	39,5	Qorvo (TriQuint Semiconductor + RFMD) https://www.qorvo.com/products/p/TQP3M9038
УМ	2–4	14–15	1,5/1,5	43,5	

Заключение

В результате проведённой работы была создана конструкция УМ в микрополосковом исполнении, включающая основные блоки: делители/сумматоры мощности, базовый двухкаскадный усилительный модуль. Выходная мощность УМ в диапазоне частот от 2 до 4 ГГц составляет 22.5 Вт, КСВН входа и выхода – не более 1.5. По ряду основных характеристик УМ не уступает известным зарубежным аналогам.

Данное устройство может использоваться в качестве предварительного усилителя в задачах получения высоких значений выходной мощности УВЧ и СВЧ [1].

Список литературы

1. Хвалин А. Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Самара, 2014. 32 с.
2. Тутков А. А., Хвалин А. Л. Измерение статических и частотных характеристик биполярного транзистора // Измерительная техника. 2019. № 8. С. 58–62.
3. Хвалин А. Л., Тутков А. А., Ляшенко А. В. Экспериментальные исследования основных характеристик

транзистора 2Т937 // Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко. Саратов : ОАО «Институт критических технологий», 2019. Вып. 26. С. 4–10.

4. Хвалин А. Л., Ляшенко А. В. Многоканальный микрополосковый делитель/сумматор мощности // Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко. Саратов : ОАО «Институт критических технологий», 2019. Вып. 27. С. 43–50.
5. Калинин А. В., Хвалин А. Л. Перестраиваемые радиотехнические генераторы шума // Гетеромагнитная микроэлектроника : сборник научных трудов / под ред. проф. А. В. Ляшенко. Саратов : ОАО «Институт критических технологий», 2019. Вып. 27. С. 31–43.
6. Ma H., van der Zee R., Nauta B. A high-voltage class-D power amplifier with switching frequency regulation for improved high-efficiency output power range // IEEE J. Solid-State Circuits, June. 2015. Vol. 50, № 6. P. 1451–1462. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2015.2421994>
7. Zhong S., Xu J., Chen J., Zhou X. Battery powered high efficiency single-stage switching amplifier // Electron. Lett., June 2016. Vol. 52, № 12. P. 1052–1054. <https://doi.org/10.1109/TLE.2018.2815953>
8. Seung Kyu Oh, Moon Uk Cho, James Dallas, Taehoon Jang, Dong Gyu Lee, Sara Pouladi, Jie Chen, Weijie Wang, Shahab Shervin, Hyunsoo Kim, Seungha Shin, Sukwon Choi, Joon Seop Kwak, Jae Hyun Ryou. High-power flex-



- ible AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors with suppression of negative differential conductance // *Appl. Phys. Lett.* 2017. Vol. 111, № 13. Article number 133502. <https://doi.org/10.1063/1.5004799>
9. Zhang H., Li J., Liu D., Min S., Chang T. H., Xiong K., Park S.H., Kim J., Jung Y.H., Park J., Lee J., Han J., Katehi L., Cai Z., Gong S., Ma Z. Heterogeneously integrated flexible microwave amplifiers on a cellulose nanofibril substrate // *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11. Article number 3118. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16957-4>
 10. Vegas D., Moreno F., Ruiz M. N., García J. A. Efficient class-E power amplifier for variable load operation // *Proc. Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits Workshop*. April 2017. P. 1–4. <https://doi.org/10.1109/INMMIC.2017.7927319>
 11. Popovic' Z., García J. A. Microwave class-E power amplifiers // *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.* 2017. P. 1323–1326. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058855>
 12. Song P., Oakley M., Ulusoy A. C., Kaynak M., Tillack B., Sadowy G. A class-E tuned W-band SiGe power amplifier with 40.4% power-added efficiency at 93 GHz // *IEEE Microwave Compon. Lett.* October 2015. Vol. 25, № 10. P. 663–665. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2015.2463231>
 13. Alsuraistry H., Wu M. H., Huang P. S., Tsai J. H., Huang T. W. 5.3 GHz 42% PAE class-E power amplifier with 532 mW/mm² power area density in 180 nm CMOS process // *Electron. Lett.* July 2016. Vol. 52, № 15. P. 1338–1340. <https://doi.org/10.1049/el.2016.1629>
 14. Jiang X. Fundamentals of audio class D amplifier design : A review of schemes and architectures // *IEEE Solid-State Circuits Mag.* August 2017. Vol. 9, № 3. P. 14–25. <https://doi.org/10.1109/MSSC.2017.2712368>
 15. Chen S.-H. Embedded single inductor bipolar-output dc–dc converter in class-D amplifier for low common noise // *IEEE Trans. Power Electron.* April 2016. Vol. 31, № 4. P. 3106–3117. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2446510>
 16. 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. Vol. 49, № 3. P. 575–579. <https://doi.org/10.1109/22.910569>
 17. Zhou X., Xu J., Zhong S., Liu Y. Soft switching symmetric bipolar outputs dc-transformer (DCX) for eliminating power supply pumping of half-bridge class-D audio amplifier // *IEEE Trans. Power Electron.* July 2019. Vol. 34, № 7. P. 6440–6455. <https://doi.org/10.1109/tpe.2018.2873234>
 18. Alfred Lim, Aarom Tan, Zhi-Hui Kong, Kaixue Ma. A Design Methodology and Analysis for Transformer-Based Class-E Power Amplifier // *Electronics.* May 2019. Vol. 8, № 5. P. 494. <https://doi.org/10.3390/electronics8050494>
 19. Chaudhary V., Rao I. S. A novel 2GHz highly efficiency improved class-E power amplifier for base stations // *Proc. Int. Conf. Communication and Signal Processing.* 2015. P. 0940–0944. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2015.7322634>
 20. Cos J. de, Suárez A., García J. A. Hysteresis and oscillation in high-efficiency power amplifiers // *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* December 2015. Vol. 63, № 12. P. 4284–4296. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2492968>

References

1. Khvalin A. L. *Analiz i sintez integral'nyh magnitoupavljaemyh radiotekhnicheskikh ustrojstv na ferritovykh rezonatorakh* [Analysis and Synthesis of Integral Magnetically Controlled Radio Devices on Ferrite Resonators]. Diss. Dr. Sci. (Tech.). Samara, 2014. 32 p. (in Russian).
2. Titkov A. A., Khvalin A. L. Measurement of static and frequency characteristics of a bipolar transistor. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2019, no. 8, pp. 58–62 (in Russian).
3. Khvalin A. L., Titkov A. A., Lyashenko A. V. Experimental studies of the main characteristics of the 2T937 transistor. *Geteromagnitnaya mikroelektronika*, 2019, iss. 26, pp. 4–10 (in Russian).
4. Khvalin A. L., Lyashenko A. V. Multichannel microstrip divider / power combiner. *Geteromagnitnaya mikroelektronika*, 2019, no. 27, pp. 43–50 (in Russian).
5. Kalinin A. V., Khvalin A. L. Tunable Radio Engineering Noise Generators. *Geteromagnitnaya mikroelektronika*, 2019, no. 27, pp. 31–43 (in Russian).
6. Ma H., van der Zee R., Nauta B. A high-voltage class-D power amplifier with switching frequency regulation for improved high-efficiency output power range. *IEEE J. Solid-State Circuits*, June 2015, vol. 50, no. 6, pp. 1451–1462. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2015.2421994>
7. Zhong S., Xu J., Chen J., Zhou X. Battery powered high efficiency single-stage switching amplifier. *Electron. Lett.*, June 2016, vol. 52, no. 12, pp. 1052–1054. <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2815953>
8. Seung Kyu Oh, Moon Uk Cho, James Dallas, Taehoon Jang, Dong Gyu Lee, Sara Pouladi, Jie Chen, Weijie Wang, Shahab Shervin, Hyunsoo Kim, Seungha Shin, Sukwon Choi, Joon Seop Kwak, Jae Hyun Ryou. High-power flexible AlGaIn/GaN heterostructure field-effect transistors with suppression of negative differential conductance. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, vol. 111, no. 13, article number 133502. <https://doi.org/10.1063/1.5004799>
9. Zhang H., Li J., Liu D., Min S., Chang T. H., Xiong K., Park S.H., Kim J., Jung Y.H., Park J., Lee J., Han J., Katehi L., Cai Z., Gong S., Ma Z. Heterogeneously integrated flexible microwave amplifiers on a cellulose nanofibril substrate. *Nat. Commun.*, 2020, vol. 11, article number 3118. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16957-4>
10. Vegas D., Moreno F., Ruiz M. N., García J. A. Efficient class-E power amplifier for variable load operation. *Proc. Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-Wave Circuits Workshop*, April 2017, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/INMMIC.2017.7927319>
11. Popovic' Z., García J. A. Microwave class-E power amplifiers. *Proc. IEEE MTT-S Int. Microwave Symp.*, 2017, pp. 1323–1326. <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8058855>



12. Song P., Oakley M., Ulusoy A. C., Kaynak M., Tillack B., Sadowy G. A class-E tuned W-band SiGe power amplifier with 40.4% power-added efficiency at 93 GHz. *IEEE Microwave Compon. Lett.*, October 2015, vol. 25, no. 10, pp. 663–665. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2015.2463231>
13. Alsuraisry H., Wu M. H., Huang P. S., Tsai J. H., Huang T. W. 5.3 GHz 42% PAE class-E power amplifier with 532 mW/mm² power area density in 180 nm CMOS process. *Electron. Lett.*, July 2016, vol. 52, no. 15, pp. 1338–1340. <https://doi.org/10.1049/el.2016.1629>
14. Jiang X. Fundamentals of audio class D amplifier design: A review of schemes and architectures. *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, August 2017, vol. 9, no. 3, pp. 14–25. <https://doi.org/10.1109/MSSC.2017.2712368>
15. Chen S.-H. Embedded single inductor bipolar-output dc–dc converter in class-D amplifier for low common noise. *IEEE Trans. Power Electron.*, April 2016, vol. 31, no. 4, pp. 3106–3117. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2446510>
16. 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, vol. 49, no. 3, pp. 575–579. <https://doi.org/10.1109/22.910569>
17. Zhou X., Xu J., Zhong S., Liu Y. Soft switching symmetric bipolar outputs dc-transformer (DCX) for eliminating power supply pumping of half-bridge class-D audio amplifier. *IEEE Trans. Power Electron.*, July 2019, vol. 34, no. 7, pp. 6440–6455. <https://doi.org/10.1109/tpe.2018.2873234>
18. Alfred Lim, Aarom Tan, Zhi-Hui Kong, Kaixue Ma. A Design Methodology and Analysis for Transformer-Based Class-E Power Amplifier. *Electronics*, May 2019, vol. 8, no. 5, p. 494. <https://doi.org/10.3390/electronics8050494>
19. Chaudhary V., Rao I. S. A novel 2GHz highly efficiency improved class-E power amplifier for base stations. *Proc. Int. Conf. Communication and Signal Processing*, 2015, pp. 0940–0944. <https://doi.org/10.1109/ICCSP.2015.7322634>
20. de Cos J., Suárez A., García J. A. Hysteresis and oscillation in high-efficiency power amplifiers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, December 2015, vol. 63, no. 12, pp. 4284–4296. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2492968>

Поступила в редакцию 18.11.2020, после рецензирования 03.04.2021, принята к публикации 26.04.2021
Received 18.11.2020, revised 03.04.2021, accepted 26.04.2021