

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ X-ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ ДЛЯ ПЕРЕДАТЧИКА НА ОСНОВЕ ЛБВ

Рассмотрены основные этапы разработки предварительного твердотельного усилителя мощности X-диапазона частот с коэффициентом усиления 23 дБ для выходного передатчика на основе мощной спиральной лампы бегущей волны.

ТРЕБОВАНИЯ К ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМУ УСИЛИТЕЛЮ МОЩНОСТИ ПЕРЕДАТЧИКА

В настоящее время передатчики X-диапазона частот на основе мощной лампы бегущей волны (ЛБВ) достаточно широко распространены в системах навигации, радиолокации и связи [1–3]. Основными элементами такого передатчика являются предварительный твердотельный усилитель (ТТУ) и основной усилитель — ЛБВ. Структурная схема передатчика X-диапазона частот представлена на рис. 1.

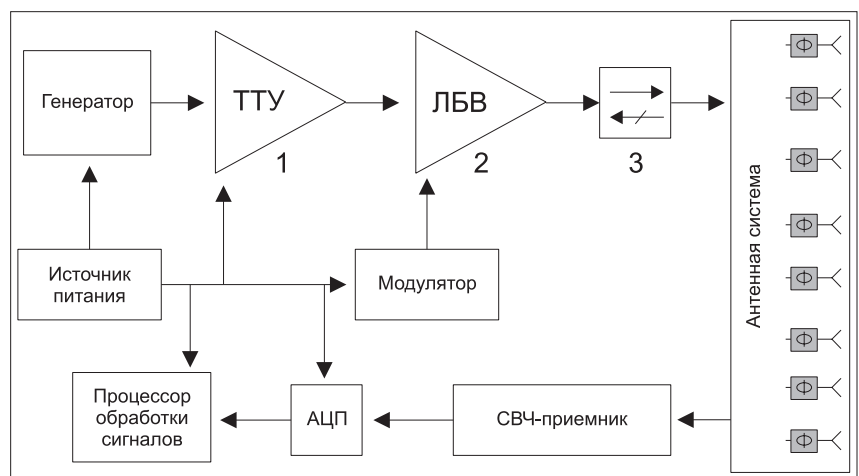
Сигнал заданной частоты поступает с генератора сигналов в предварительный усилитель, где происходит его усиление до уровня, необходимого для работы ЛБВ. Затем лампой бегущей волны сигнал подается на вход передающей антенны. Источник питания обеспечивает подачу напряжений накала катода, коллектора, анода и замедляющей системы ЛБВ. Модулятор обеспечивает импульсный режим работы выходного усилителя мощности.

При создании мощного передатчика X-диапазона частот на основе ЛБВ возникла необходимость в предварительном усилителе со следующими параметрами:

- рабочий диапазон частот: 9,5–10,5 ГГц;
- входная мощность: 2–8 мВт;
- выходная мощность, не менее: 400 мВт.

Усилитель должен быть устойчив к перегрузкам СВЧ-мощности по входу и выходу. Кроме того, должна быть использована компонентная база отечественного производства.

Серийно выпускаемого усилителя мощности с такими параметрами найти не удалось, поэтому потребовалась его разработка. В условиях штучного производства наиболее быстрый и дешевый способ изготовить такой усилитель —



▲ Рис. 1. Структурная схема передатчика. 1 — ТТУ; 2 — ЛБВ; 3 — ферритовый вентиль

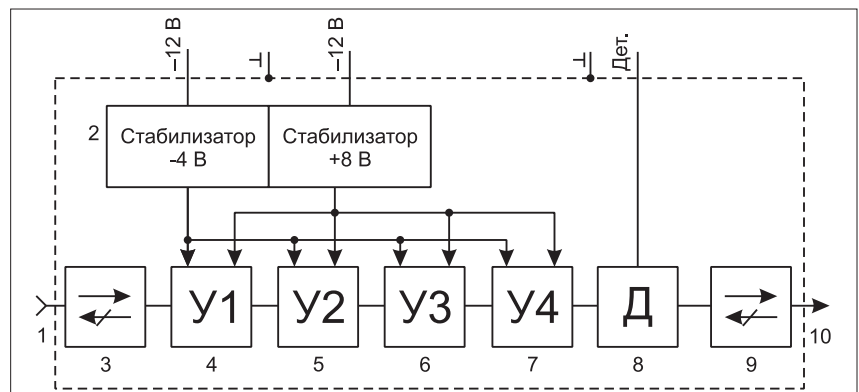
использовать гибридно-интегральную технологию с применением активных элементов в виде кристаллов транзисторов и пассивных элементов, размещенных на керамических подложках.

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА УСИЛИТЕЛЯ

Расчет структурной схемы предварительного усилителя мощности показал, что для реализации его параметров с необходимыми запасами требуется три каскада усиления на транзисторах 3П612А-5 и выходной каскад на транзи-

сторах 3П976Г-5. Усижительные каскады должны быть выполнены по балансной схеме без развязки между каскадами. На входе и выходе усилителя установлены ферритовые вентили. При расчете определен требуемый уровень усиления каждого каскада: 7–9 дБ с учетом температурных уходов и потерь в вентиллях. Расчетная структурная схема разрабатываемого предварительного усилителя мощности представлена на рис. 2.

Усилитель с данной структурной схемой должен обеспечить выходную мощ-



▲ Рис. 2. Структурная схема предварительного усилителя мощности: 1, 10 — коаксиальные вход и выход; 2 — стабилизаторы (вторичные источники питания); 3, 9 — входной и выходной ферритовые вентили; 4–7 — усилительные каскады; 8 — детекторы

ность не менее 400 мВт в полосе рабочих частот 9,5–10,5 ГГц при входной мощности 2 мВт и напряжениях питания +12 В и смещения –12 В и при температуре +70 °С.

РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ СОГЛАСОВАНИЯ ТРАНЗИСТОРОВ

Были рассчитаны балансные усильтельные каскады со сложением мощности полевых транзисторов двух типов. Для обеспечения оптимальных нагрузок транзистора необходимо рассчитать его согласующую цепь. При расчете были использованы нелинейные модели

транзисторов CURTICE. Схема включения нелинейной модели транзистора 3П612А-5 приведена на рис. 3.

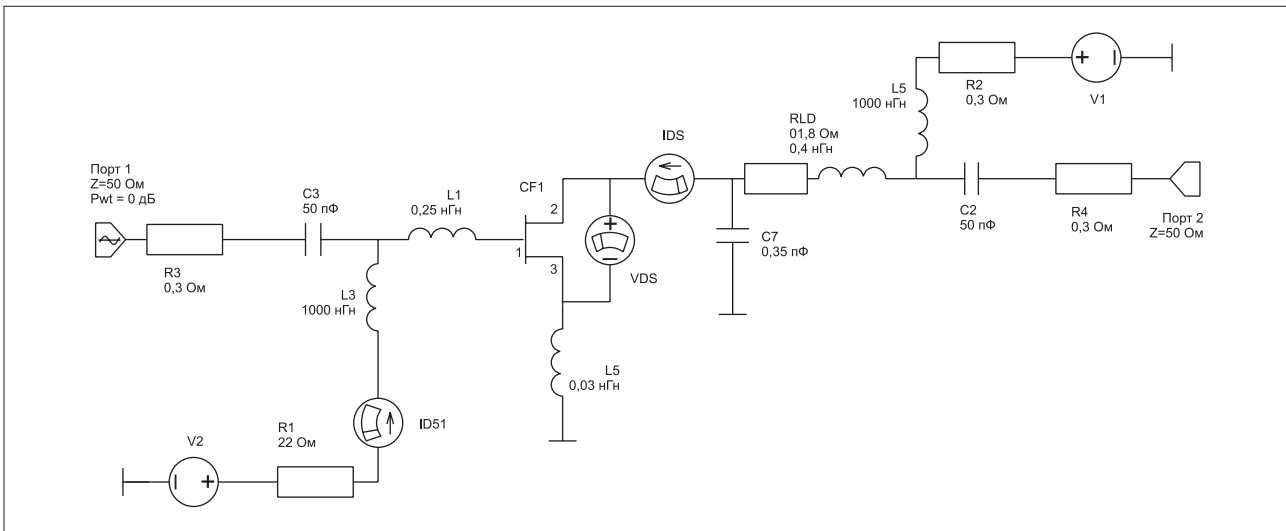
Схемы согласующих входных и выходных цепей транзисторов представлены на рис. 4 и 5.

После оптимизации параметров согласующих цепей была получена топология согласующих цепей, показанная на рис. 6.

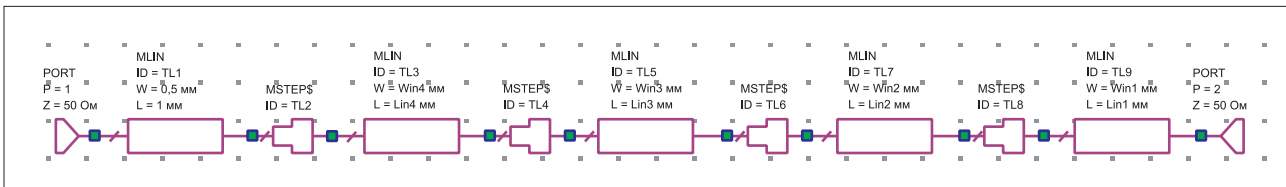
Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) в линейном режиме (при малом сигнале) транзистора 3П612А-5 для 1–3 усилительных каскадов представлена на рис. 7.

Как показал расчет, в диапазоне частот 9,5–10,5 ГГц максимальный коэффициент усиления каскадов 1–3 равен 12 дБ.

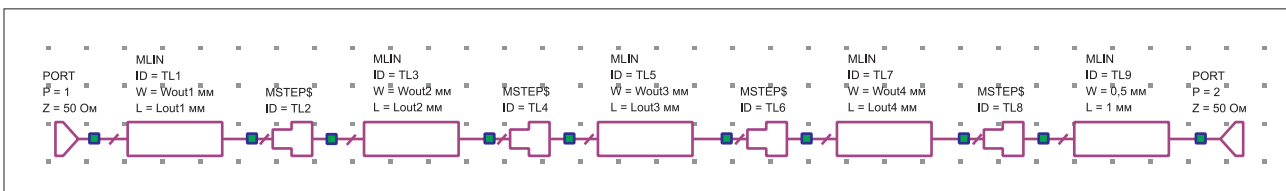
Аналогично была рассчитана топология согласующих цепей транзистора 3П976Г-5 для выходного каскада. Расчетная АЧХ транзистора 3П976Г-5 в линейном режиме имеет коэффициент усиления 9,5 дБ в рабочем диапазоне частот (рис. 8). Эти коэффициенты усиления, казалось бы, избыточны, но, учитывая потери в делителях, сумматорах и вспомогательных цепях, представленную топологию цепей согласования можно принять в качестве на-



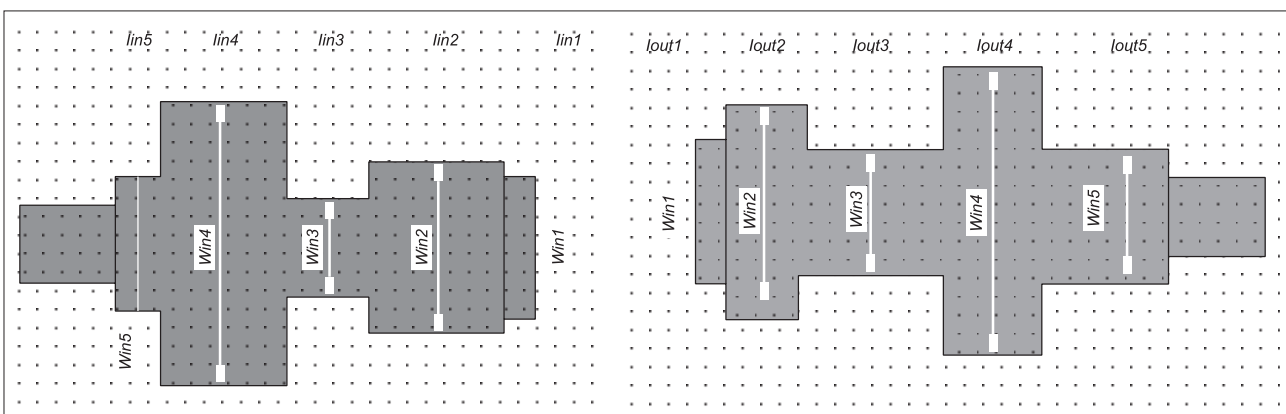
▲ Рис. 3. Схема включения нелинейной модели транзистора 3П612А-5



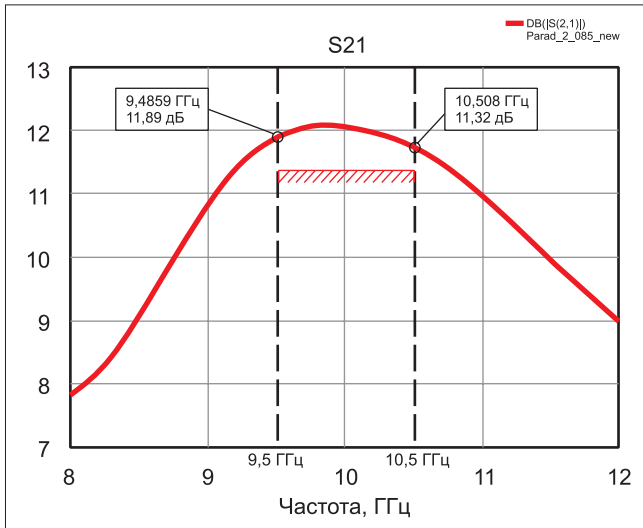
▲ Рис. 4. Схема входной согласующей цепи транзисторов



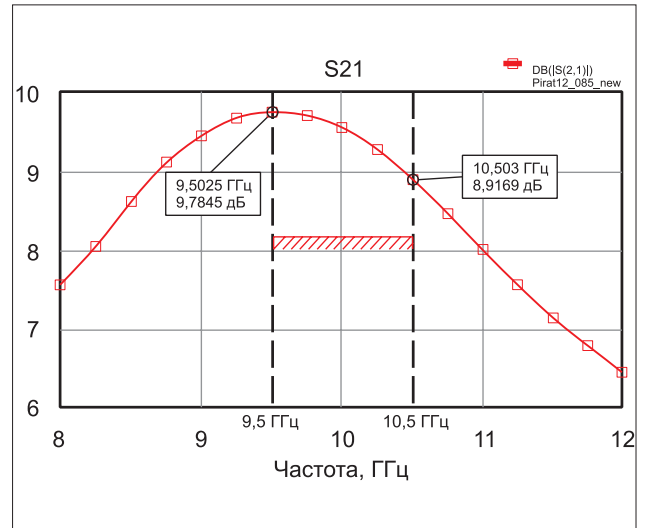
▲ Рис. 5. Схема выходной согласующей цепи транзисторов



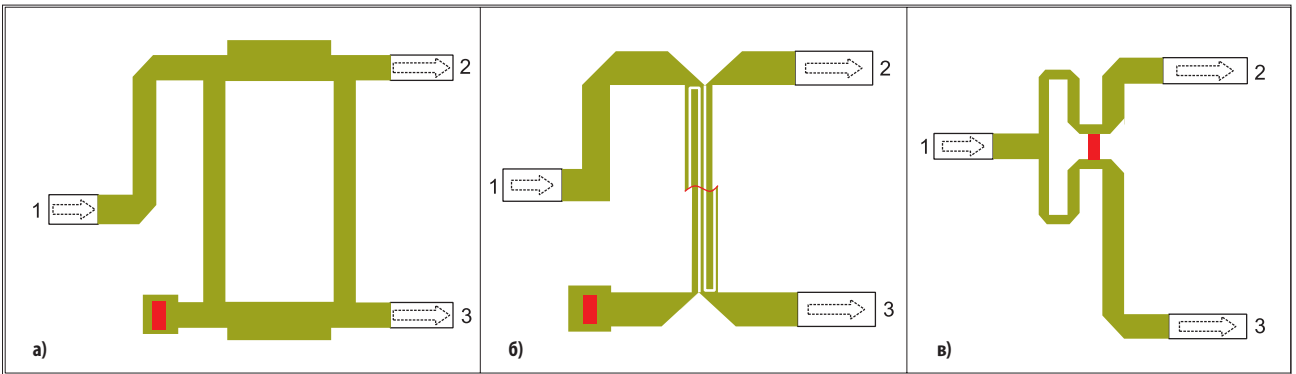
▲ Рис. 6. Топология входной и выходной согласующих цепей транзистора 3П612А-5



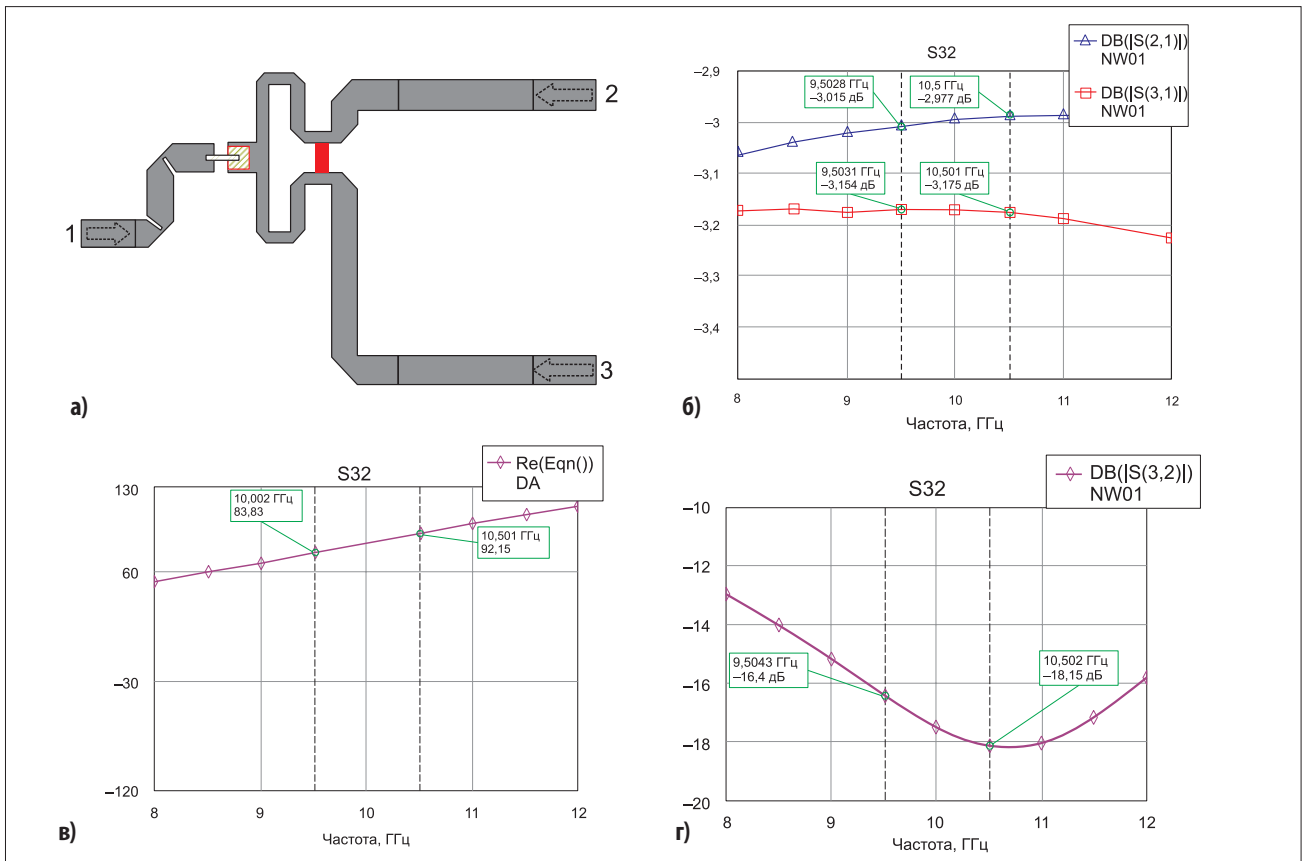
▲ Рис. 7. АЧХ транзистора 3П612А-5 в линейном режиме



▲ Рис. 8. АЧХ транзистора 3П976Г-5 в линейном режиме



▲ Рис. 9. Квадратурные делители мощности: а) гибридный мост; б) мост Ланге; в) кольцевой делитель Уилкинсона; 1 — вход, 2 и 3 — выходы сигнала



▲ Рис. 10. Делитель Уилкинсона: а) топология; б) коэффициент передачи сигнала; в) разность фаз между плечами в зависимости от частоты; г) частотная зависимость величины развязки

чальной для дальнейших расчетов усилительных каскадов в целом и с учетом уменьшения усиления на большом сигнале.

РАСЧЕТ ТОПОЛОГИИ ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

При построении балансных усилительных каскадов применяют квадратные делители мощности. Наиболее распространены кольцевой делитель Уилкинсона, гибридный мост и мост Ланге — рис. 9 [3, 7].

Каждый из этих делителей мощности имеет свои преимущества и недостатки.

Гибридный мост обеспечивает необходимый сдвиг фаз, позволяет использовать большую нагрузку и потому широко применяется для построения балансных усилительных каскадов большой мощности (десятки ватт). Однако гибридный мост имеет большие размеры и не предназначен для конструкций, где требуются минимальные размеры.

Мост Ланге имеет небольшие размеры и обеспечивает необходимую разность фаз на выходах. Однако наличие тонких длинных полосков и узких зазоров меж-

ду ними усложняет технологию изготовления делителя.

Кольцевой делитель Уилкинсона имеет приемлемые размеры, обеспечивает практически идеальное деление мощности из-за симметричности конструкции. Его применяют в балансных каскадах с малым и средним уровнем мощности.

В данной работе был выбран кольцевой делитель Уилкинсона. При этом было учтено, что для построения балансного каскада необходимо обеспечить сдвиг фазы на 90° на одном из выходов делителя, что несколько искажает его характеристику. Результаты расчета кольцевого делителя Уилкинсона представлены на рис. 10.

Как показывают результаты расчета, разность фаз между плечами 90° и развязка -16 дБ в рабочем диапазоне частот вполне удовлетворительны, а коэффициенты передачи между первым и вторым плечами — 3 и 3,2 дБ соответственно — не получаются полностью равными из-за несимметричности конструкции.

Для подвода питания и подавления возбуждения активных элементов вне

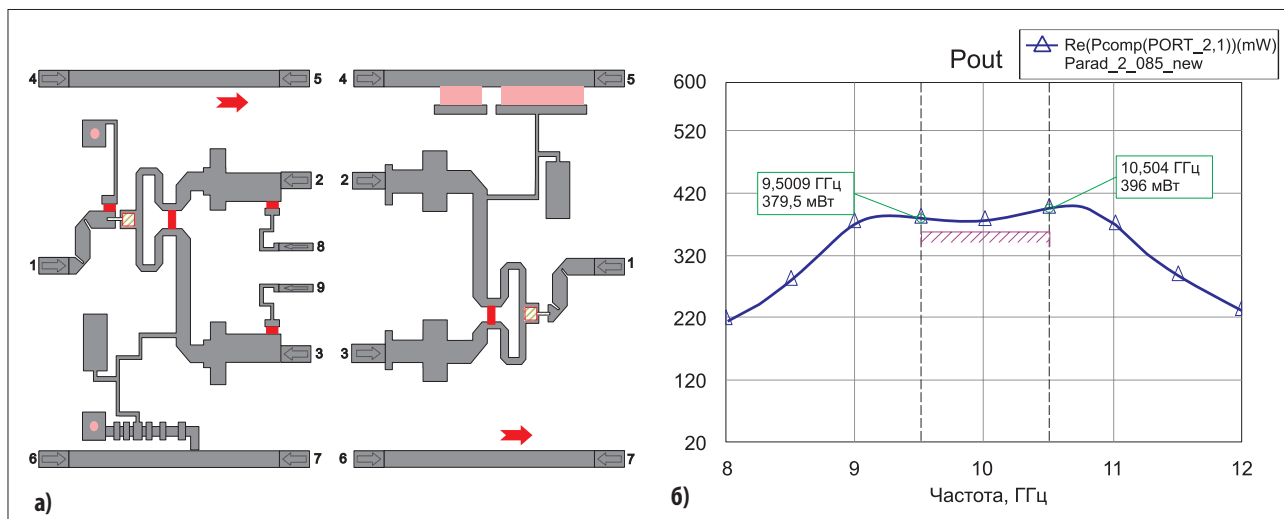
рабочей полосы частот были рассчитаны антипаразитные цепи, цепи питания и смещения.

Результаты расчета усилительных каскадов с реальными уровнями входных мощностей приведены на рис. 11 и 12.

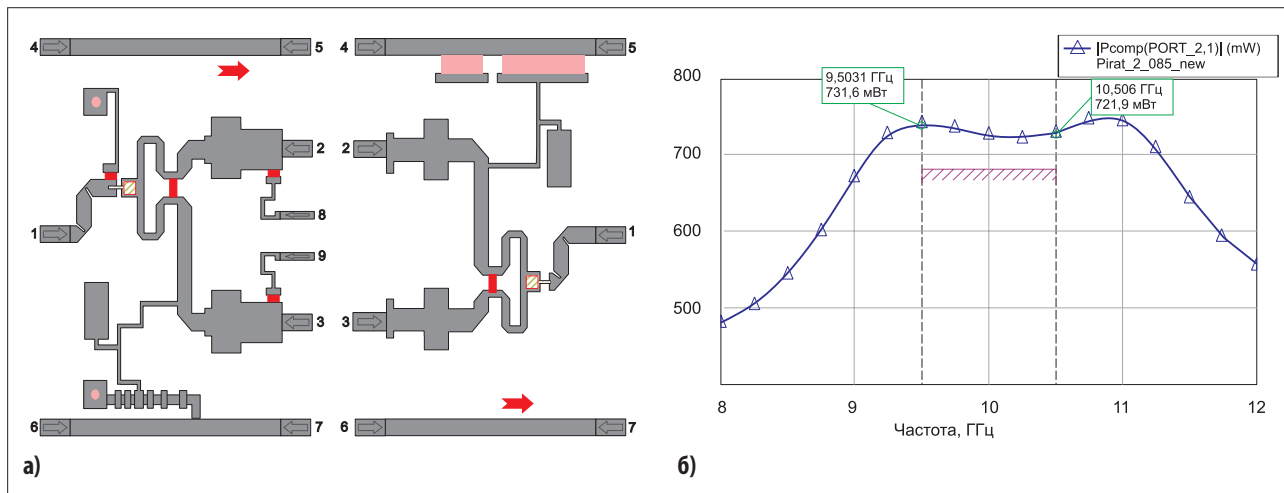
С учетом величины потерь в выходном ферритовом вентиле, равной приблизительно 0,5 дБ, расчетный уровень выходного сигнала превышает 720 мВт.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ

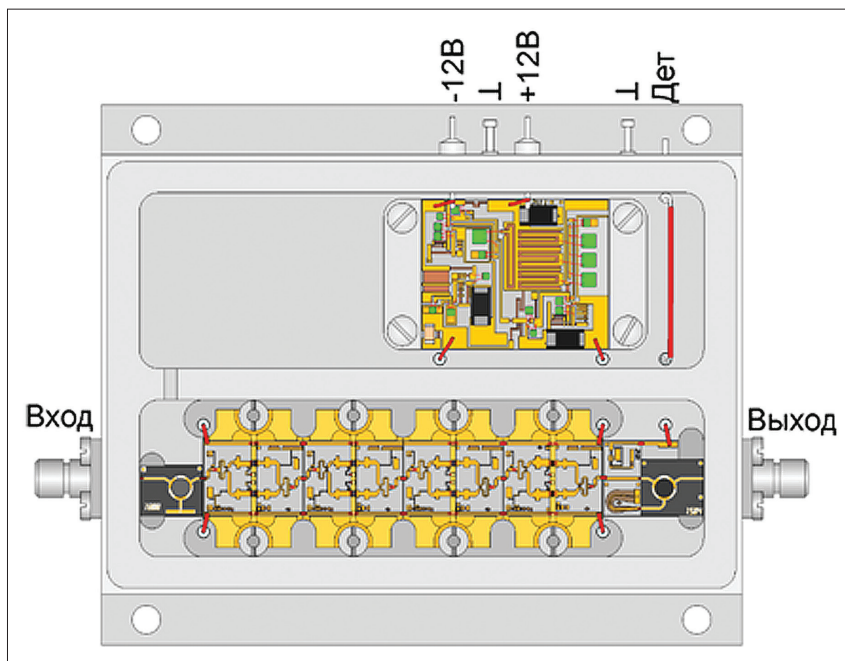
Каскады выполнены по гибридно-интегральной технологии. Входные и выходные платы каскадов изготовлены по стандартной тонкопленочной технологии на подложках из поликора толщиной 0,5 мм [6]. Платы и кристаллы транзисторов припаивают на основание из псевдосплава медь-молибден МД50 припоем золото-олово. В каскадах согласующие трансформаторы размещены на одной плате вместе с цепями подвода напряжений, делителями и сумматоров мощности. Это существенно упрощает конструкцию и сборку усилительных каскадов.



▲ Рис. 11. Топология и АЧХ 1–3 усилительных каскадов: а) топология, б) АЧХ выходной мощности при реальном уровне входных сигналов



▲ Рис. 12. Топология и АЧХ выходного каскада: а) топология; б) АЧХ выходной мощности при реальном уровне входного сигнала



▲ Рис. 13. Общий вид предварительного усилителя мощности

Корпус усилителя, изготовленный из алюминиевого сплава, состоит из двух отсеков. В первом отсеке установлены усилительные каскады, во втором — вторичный источник питания, выполненный в гибридно-интегральном исполнении на поликорковой плате. В корпус впаяны платы входного и выходного вентиляей. Усилительные каскады и вторичный источник питания прикручивают к корпусу винтами. Для улучшения теплового контакта используют прокладку припоя ПСИп12 толщиной 0,05 мм.

Межсхемные соединения разваривают золотой фольгой. Усилительные каскады накрывают крышкой, которую прикручивают винтами М2 к цилиндрическим головкам крепежных винтов каскадов. В такой конструкции усилительные каскады оказываются размещенными внутри запердельного волновода. Корпус усилителя закрывается крышкой из алюминиевого сплава и герметизируется клеем. Внутреннюю полость усилителя заполняют сухим азотом. Общий вид усилителя показан на рис. 13.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании предварительного усилителя мощности X-диапазона частот для передатчика на основе ЛБВ были определены структурная схема усилителя, типы полевых транзисторов и рассчитано требуемое количество усилительных каскадов. Выполнены расчеты согласующих цепей транзисторов, делителя мощности, цепей питания и смещения. Предложено конструктивно-технологическое решение усилителя мощности, обеспечивающее коэффициент усиления сигнала 23 дБ и выходную мощность более 400 мВт в диапазоне частот 9,5–10,5 ГГц.

В случае необходимости снижения габаритных размеров модуля следует применять монолитные схемы усилителя. Однако при этом возрастает сложность конструкции усилителя и затраты на его изготовление. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В. Н., Горяинов В. Т., Кулин А. Н. и др. Радиолокационные системы. М.: Радио и связь, 1988.
2. Гилмор А. С. Лампы с бегущей волной. М.: Техносфера, 2013.
3. Сечи Ф. Мощные твердотельные СВЧ-усилители. М.: Техносфера, 2016.
4. Пчелин В. А., Трегубов В. Б., Корчагин И. П. и др. Гибридно-интегральные малогабаритные усилители мощности//Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2015. Вып. 4.
5. Гуртов В. А. Твердотельная электроника. Учеб. пособие. 2-е изд., М.: Техносфера, 2005.
6. Медведев А. М. Сборка и монтаж электронных устройств. М.: Техносфера, 2007.