

УДК 629.78

Расчет МШУ на отечественной ЭКБ с помощью САПР AWR

Н. Н. Петух, Ю. С. Белоусов, А. П. Гарбузенко, К. О. Дарюшкин

АО «Российские космические системы»

e-mail: petukhnikolay@gmail.com

Аннотация. В условиях ресурсных ограничений, связанных с электронной компонентной базой (ЭКБ) зарубежных производителей для применения в бортовых ретрансляторах, задача разработки СВЧ-изделий на отечественной ЭКБ приобретает все большую актуальность.

В настоящей работе представлены результаты разработки малошумящего усилителя, представляющего собой микросборку на ЭКБ отечественного производства, удовлетворяющей требованиям. Микросборка спроектирована на основе серийно выпускаемых транзисторов типа 3П398 (г. Великий Новгород).

В работе показаны конструктивные и схемотехнические решения, используемые при создании МШУ X-диапазона, приведены результаты расчетов характеристик усиления, шумовой температуры, согласования по входу и выходу, сделана оценка стабильности. Проектирование производилось с использованием САПР MWO AWR.

Сравнение с зарубежными аналогами позволяет сделать вывод о том, что данная микросборка на сегодняшний день по своим техническим характеристикам находится на уровне зарубежных аналогов, применяемых в космической технике.

Также рассмотрен и предложен схемотехнический способ увеличения сроков работы транзисторов.

Ключевые слова: МШУ, $K_{\text{СВЧ}}$, транзисторы, HEMT, ЭКБ, радиация, САС

Design of LNA Based on the Domestic ECB Using CAD AWR

N. N. Petukh, Yu. S. Belousov, A. P. Garbuzenko, K. O. Daryushkin

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: petukhnikolay@gmail.com

Abstract. The purpose of this work was to design a low noise amplifier (LNA) based on the domestic electronic component base (ECB). LNA is in the form of micro assembly. This microassembly was designed on the base of the transistor of 3P398 type (manufactured in Veliky Novgorod). The results of this research showed that the microassembly based on the domestic ECB meets the requirements of the receiver. The paper presents the design solutions used in the creation of the X band LNA. Moreover, the results of calculations characteristics of amplification, noise temperature, matching from input and output and assessment of stability are presented. The design work was made by means of CAD (computer-aided design) MWO AWR. As a result of this study this LNA was compared to foreign analogues and it turned out that this product is at the same level as foreign analogues used in space technology. In addition, a method of increasing the lifetime of circuit operation of transistors is demonstrated.

Key words: LNA, VSWR, transistors, HEMT, ECB, radiation, lifetime

Введение. Состояние проблемы

С ростом эксплуатационных требований к малошумящим усилителям (МШУ), изготавливаемым по технологии гибридных микросхем (ГМС), значительно повышается внимание к точности расчета электрических характеристик и конструкции как усилителя в целом, так и каждого из его элементов в диапазоне частот от постоянного тока до граничной частоты используемых транзисторов ($f_{гр}$). Кроме того, при относительно небольших полосах рабочих частот за счет увеличения точности расчетов появляется возможность более полного использования свойств транзисторов и схемы МШУ для удовлетворения подчас противоречивых требований к $K_{ш}$ (коэффициенту шума), K_y (коэффициенту усиления), $K_{СВн}$ (коэффициенту стоячей волны по напряжению) и устойчивости работы.

В настоящее время для большинства систем связи сантиметрового диапазона сложились следующие основные требования к параметрам МШУ:

$$\begin{aligned} K_y &= 20-30 \text{ дБ}, \\ K_{ш} &= 0,8-1,2 \text{ дБ}, \\ K_{СВн} &= 1,2-1,4. \end{aligned}$$

Этим требованиям в целом удовлетворяют монолитные микросхемы (ММС) и модули многих зарубежных фирм, примеры их характеристик приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1. Малошумящие СВЧ-микросхемы зарубежного производства

Наименование	Характеристики			
	УС, дБ	$K_{ш}$, дБ	$K_{СВн}$	Р1, дБм
НМС753LP4Е Hittite	14	2	2,7	15
НМС903 Hittite	19	1,6	2,3	16
СНА3666-QAG UMS	21	1,8	2	16
CGY2120XUH/C1 Ommic	13,2	0,5	3	12
AMF-5F-04000800-07-10P Miteq	50	0,7	2	10

В монолитных устройствах реализуются цели унификации за счет упрощения структуры согласующих цепей в широком диапазоне частот. Параметры приведенных изделий фирм UMS и Miteq

по-своему уникальны, однако их рабочий частотный диапазон несколько ниже необходимого для разрабатываемого устройства.

Помимо политических (наложение санкций) и финансовых (высокая цена) причин, влияющих на возможность использования зарубежных ММС, существуют и чисто технические причины, по которым их применение не является оптимальным решением.

К техническим причинам относятся определенные технологические аспекты монтажа безвыводных микросхем UMS и Hittite, в частности контроль припаивания и противодействие процессам диффузии в межконтактных зазорах в течение длительного времени эксплуатации в условиях космического производства. Проблемными являются большая мощность рассеивания (порядка 3 Вт) для очень небольших размеров корпуса в случае использования ММС Miteq и микронные толщины линии передач внутри ММС, что само по себе несет потенциальную ненадежность в долгосрочной перспективе. Критичным также является требование обеспечения приемлемых нагрузок вне требуемой рабочей полосы системы, но внутри полосы пропускания микросхемы.

С распадом СССР производство российской электронной компонентой базы (ЭКБ) было практически свернуто.

В течение последних 20 лет используемая на борту ЭКБ (от 80 до 90%) поставлялась из-за рубежа. Зачастую в целях удешевления применялись компоненты класса Industrial после проведения соответствующих тестов. В особо ответственных случаях применялись компоненты класса Space, приобретаемые по очень большой цене. В свете последних геополитических рисков такой подход становится все менее оправданным.

Методика расчета малошумящего усилителя с использованием отечественной электронной компонентной базы

В настоящей работе рассматривается один из ключевых элементов спутниковой системы связи — блок малошумящего усилителя X-диапазона,

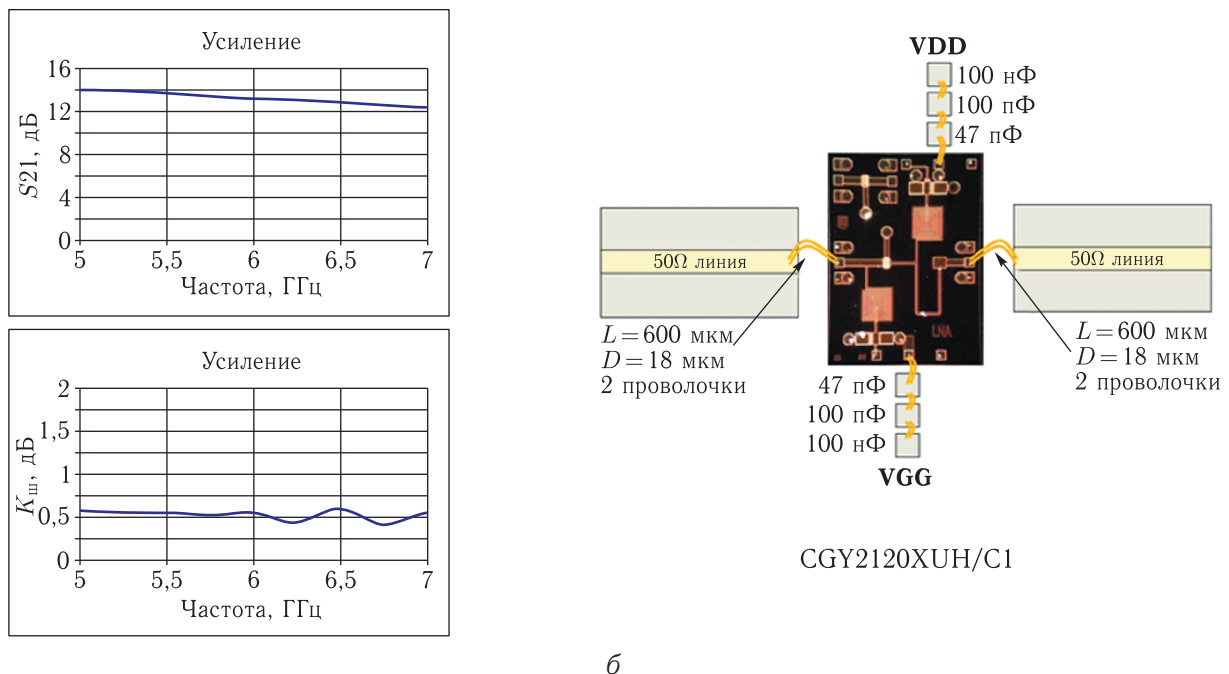
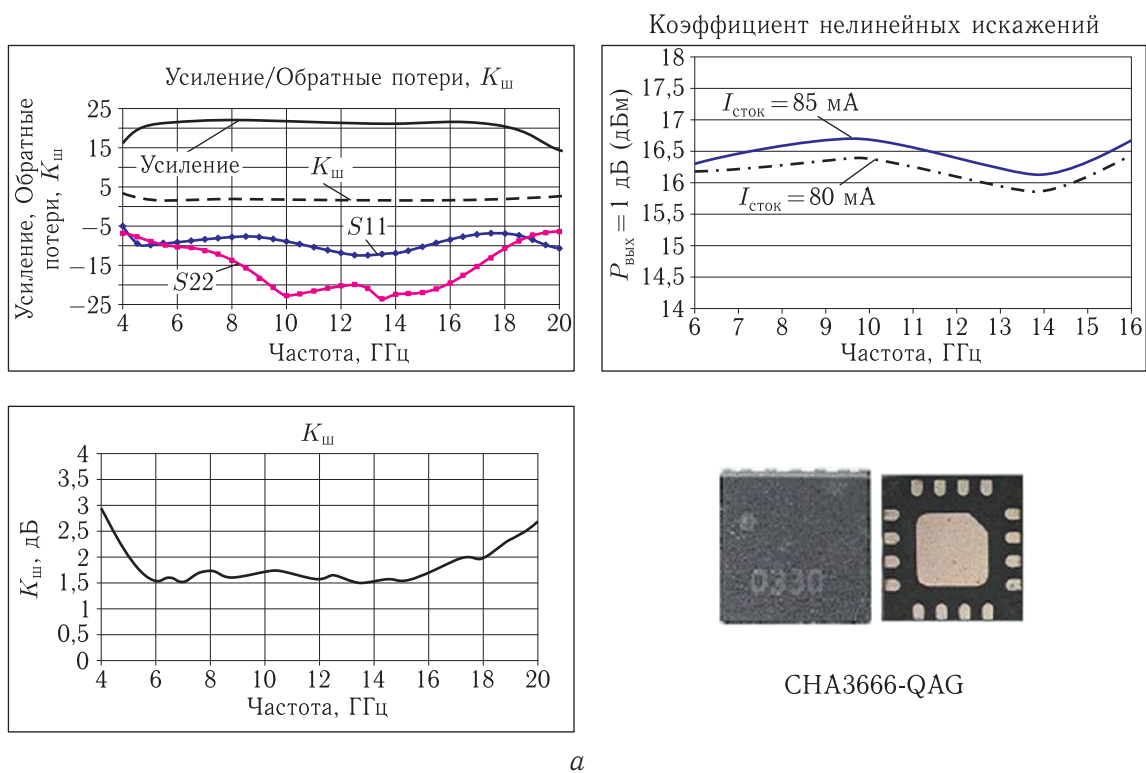
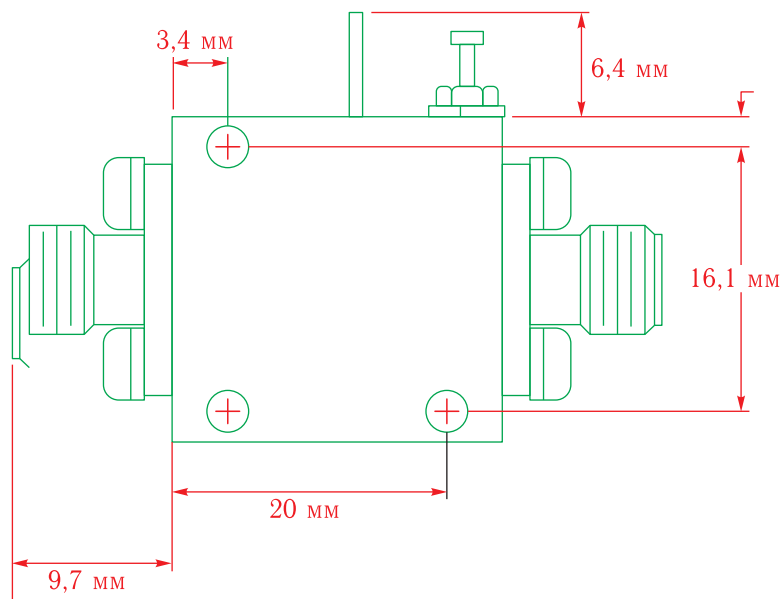


Рис. 1. Детализация параметров маломощных ММС зарубежного производства: а) копулированный усилитель фирмы UMS, б) усилитель, выполненный в кристалле фирмы Omnis

Назначение	Усилитель
Частота	от 4 до 8 ГГц
Усиление	50 дБ min
Неравномерность усиления	+/- 1,5 дБ max
$K_{ш}$	0,7 дБ max
Шумовая температура	50,7 К max
$K_{св}$ по входу	2:1 max
$K_{св}$ по выходу	2:1 max
P_1 , дБ, вых	10 дБm min
Напряжение	15 В номинал
Ток потребления	200 мА номинал
Диапазон температур	от -40 до 75 °С



AMF-5F-04000800-07-10P

в

Рис. 1. в) усилитель в сборке фирмы Miteq

выполненный целиком на отечественной современной ЭКБ и отвечающий по своим параметрам мировым требованиям.

Как правило, диапазон используемых частот в линиях космической связи не превышает 10 % рабочей полосы транзистора. Вследствие этого потенциальные свойства транзистора могут быть реализованы оптимальным образом, что наблюдается в виде тенденции последнего времени в зарубежных разработках при проектировании МШУ под решение приоритетных задач.

Выбор транзистора для реализации долгосрочного проекта не дает широкого поля для деятельности.

В данной работе рассмотрена возможность разработки ГМС МШУ с использованием НЕМТ-транзисторов отечественного производства («Планета-Аргалл», г. Великий Новгород) и применением диалогового режима с САПР MWO AWR. Типы и основные параметры транзисторов приведены в табл. 2 [1].

Для достижения приемлемого результата использовались следующие положения.

1. В диапазонах частот в 2–3 раза меньших граничной частоты применяемых транзисторов в ГМС на СВЧ возникают сложности с ав-

тосмещением на частотах, меньших $f_{гр}$, из-за паразитных резонансов параллельного типа в блокировочных конденсаторах. Это приводит к неустойчивости усилителя и недопустимой неравномерности характеристик $K_{ш}$ и K_y , если резонанс находится вблизи рабочей полосы. Например, конденсатор К10-71 емкостью $C = 5,1$ пФ, размером $1,5 \times 1,5 \times 0,2$ мм имеет реактанс, представленный на рис. 2.

Использование такого конденсатора в цепи автосмещения в двухкаскадном МШУ X-диапазона приводит к появлению неустойчивости и резкому увеличению $K_{ш}$ (см. рис. 3, а, б).

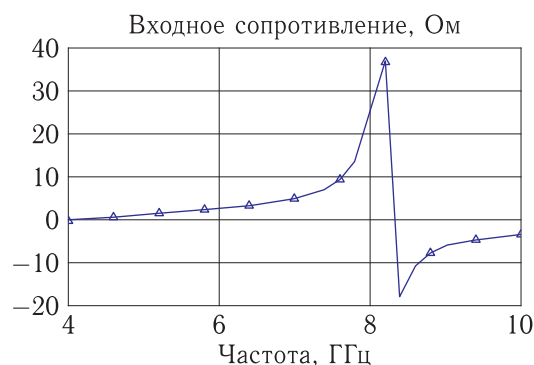
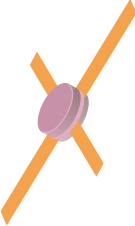

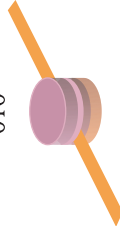
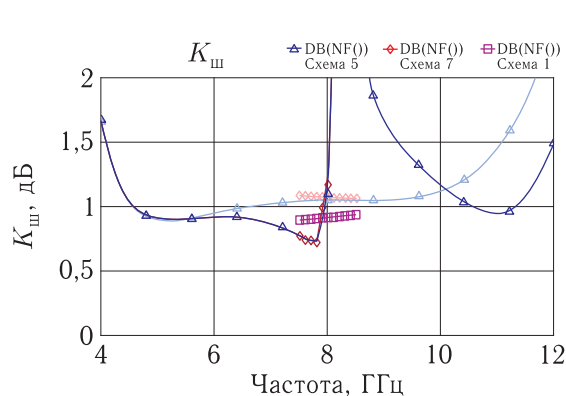


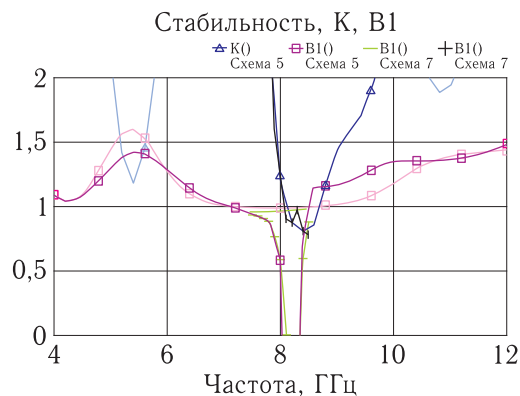
Рис. 2. Пример паразитного резонанса параллельного типа в блокировочном конденсаторе

Таблица 2. Малошумящие СВЧ-транзисторы двойного применения

Наименование изделия	Δf_p , ГГц	$f_{изм}$, ГГц	Значения электрических параметров ($T = 25 \pm 10^\circ\text{C}$)						Корпус
			$K_{ш\min}$, дБ (тип.)	$K_{ур\text{ опт}}$, дБ (min)	S , мА/В (min)	$P_{вых}$, мВт (min)	P (рассеяния), мВт		
ЗП 398А-2	4-18	8	0,4 (тип.)	$K_{ур\max}$ 12,9	60	-	50	<div>023</div> 	
ЗП 398Б-2	4-18	12	0,45 (тип.)	$K_{ур\max}$ 12,9	30	-	50		
ЗП 373А-2	1-8	4	0,4	11,5	30	-	100		
ЗП 373Б-2			0,5	11					
ЗП 373В-2			0,6	10					
ЗП 374А-2	4-18	12	0,85	9	15	-	35		
ЗП 374Б-2			1	10					
ЗП 374В-2			1,2	8,5					
ЗП 397А-2	0,1-6	0,1-6	0,3	16	30	30	200	<div>022</div> 	
ЗП 398В-2	12-25	18	0,95 (тип.)	$K_{ур\max}$ 11,3	24		50		
ЗП 385А-2	12-25	18	0,8	9,5	15	-	35		
ЗП 385Б-2			1	10					
ЗП 385В-2			1,2	8,5					
ЗП 618А-2	0,5-4	0,5-1	0,3	18	60	500	1000		
ЗП 618Б-2		2	0,5	15		250	500		
ЗП 386А-2	18-30	25	1,05	8	10	5	30	<div>010</div> 	
ЗП 386Б-2			1,25	7,5					
ЗП 386В-2			1,5	7					
ЗП 398Г-2	25-35	30	0,8 (тип.)	$K_{ур\max}$ 9,3	20	-	30		
ЗП 618В-2	1-10	4	0,7	12	60	150	300		
		8	1,5	6		100			
ЗП 389А-2	25-40	37	2,5	6	5	-	20		
ЗП 389А-5			2	6,5					



а — Рост шумов усилителя за счет реактansa блокировочного конденсатора



б — Появление неустойчивости усилителя за счет реактansa блокировочного конденсатора

Рис. 3

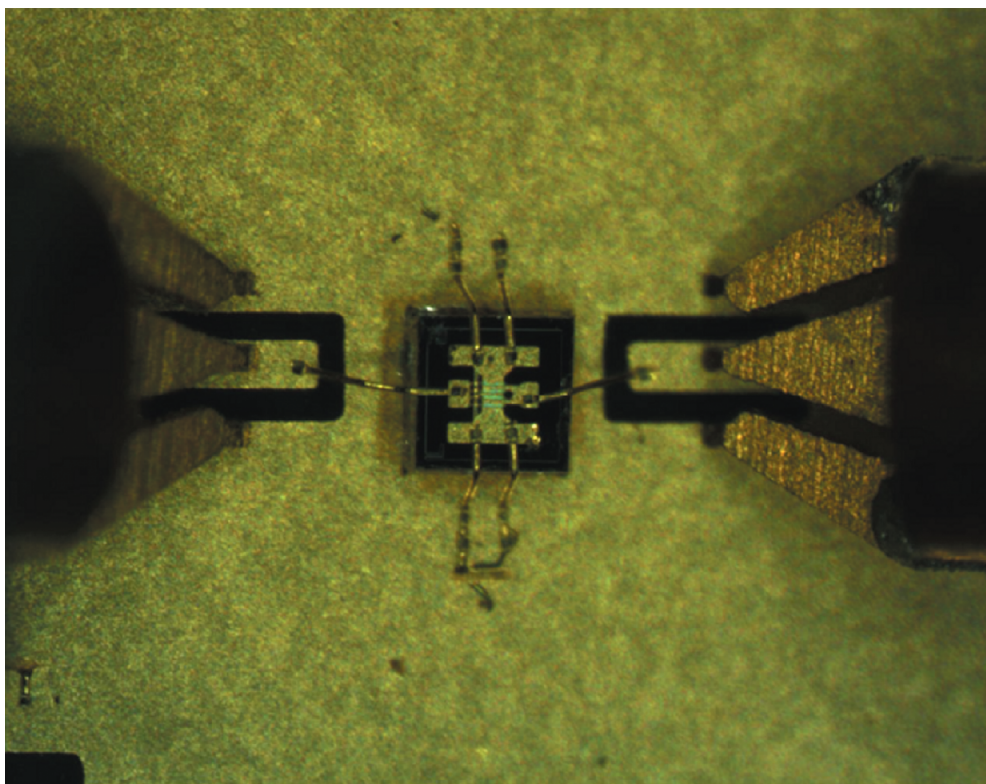


Рис. 4. Измерение параметров кристалла 3П398Б-5 зондовой станцией

Поэтому автосмещение применяют, как правило, только в МШУ, работающих на тех частотах, где можно подобрать конденсатор для заземления истока транзистора с первым последовательным резонансом, попадающим в рабочую полосу частот, а параллельный резонанс должен находиться за пределами $f_{гр}$.

2. Корпус транзистора значительно трансформирует его малосигнальные параметры и приводит к снижению достижимых характеристик. Если измерение S -параметров кристалла производится на весьма высоком современном уровне (с помощью зондовых станций, см. рис. 4 и [2]), то измерение параметров корпуса осуществляется по упрощенной

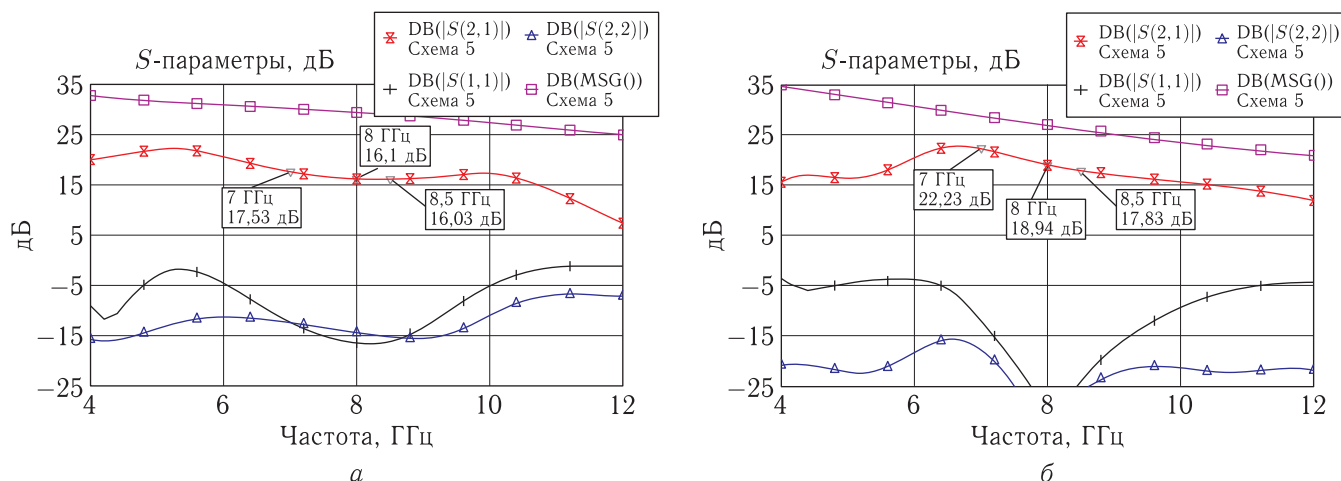


Рис. 5. Сравнение оптимальных параметров двухкаскадных усилителей, выполненных на корпусных транзисторах (а) и на кристаллах (б)

методике, что может приводить к погрешностям расчета на высоких частотах.

На рис. 5 представлены характеристики двухкаскадных МШУ, выполненных на корпусных и бескорпусных транзисторах 3П398Б-2 и 3П398Б-5.

В бескорпусном варианте усиление больше на 3 дБ, коэффициент шума $K_{ш}$ меньше на 0,2 дБ, а коэффициент стоячей волны $K_{СВн}$ значительно ниже. Еще более существенная разница получается в 3-каскадном МШУ. Этими соображениями обосновано решение о применении бескорпусных транзисторов.

3. В справочных данных на параметры отечественных транзисторов не приводятся их шумовые матрицы для аналитического расчета $K_{ш}$. Как правило, приводится величина $K_{ш}$ мин, измеренная в режиме согласования на одной частоте. Поэтому для расчета характеристик МШУ целесообразно использовать малосигнальную модель НЕМТ, представленную в САПР, как FETN. Начальные значения параметров FETN весьма близки к параметрам реальных НЕМТ диапазона С, Х и Ku. Использование встроенных программ оптимизации позволяет с заданной точностью обеспечить совпадение этих параметров. При этом из варьируемых параметров FETN следует исключить точно известные, например, L_g , L_d , L_s и др. На рис. 6 представлены измеренные S-параметры транзистора 3П398А-5 и оптимизированные S-параметры FETN. Экстракция шумовых параметров T_d и T_g

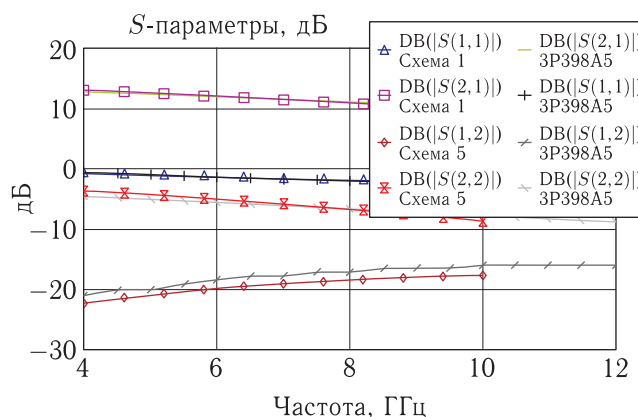


Рис. 6. Соотношение измеренных и оптимизированных параметров транзистора 3П398Б-5

производилась в 50-омном тракте вручную в режиме согласования FETN.

4. На начальном этапе проектирования входные и выходные цепи каждого транзистора рассчитывались по импедансам транзистора в однокаскадном варианте усилителя.

Так как рабочая полоса частот трехкаскадного МШУ не превышала 20 %, то для развязки по цепям питания использовались четвертьволновые шлейфы, что обеспечивало возможность установки за шлейфами резисторов, обеспечивающих необходимый запас устойчивости на внеполосных частотах за счет внесения диссипативных потерь при подавлении их шумов внутри полосы.

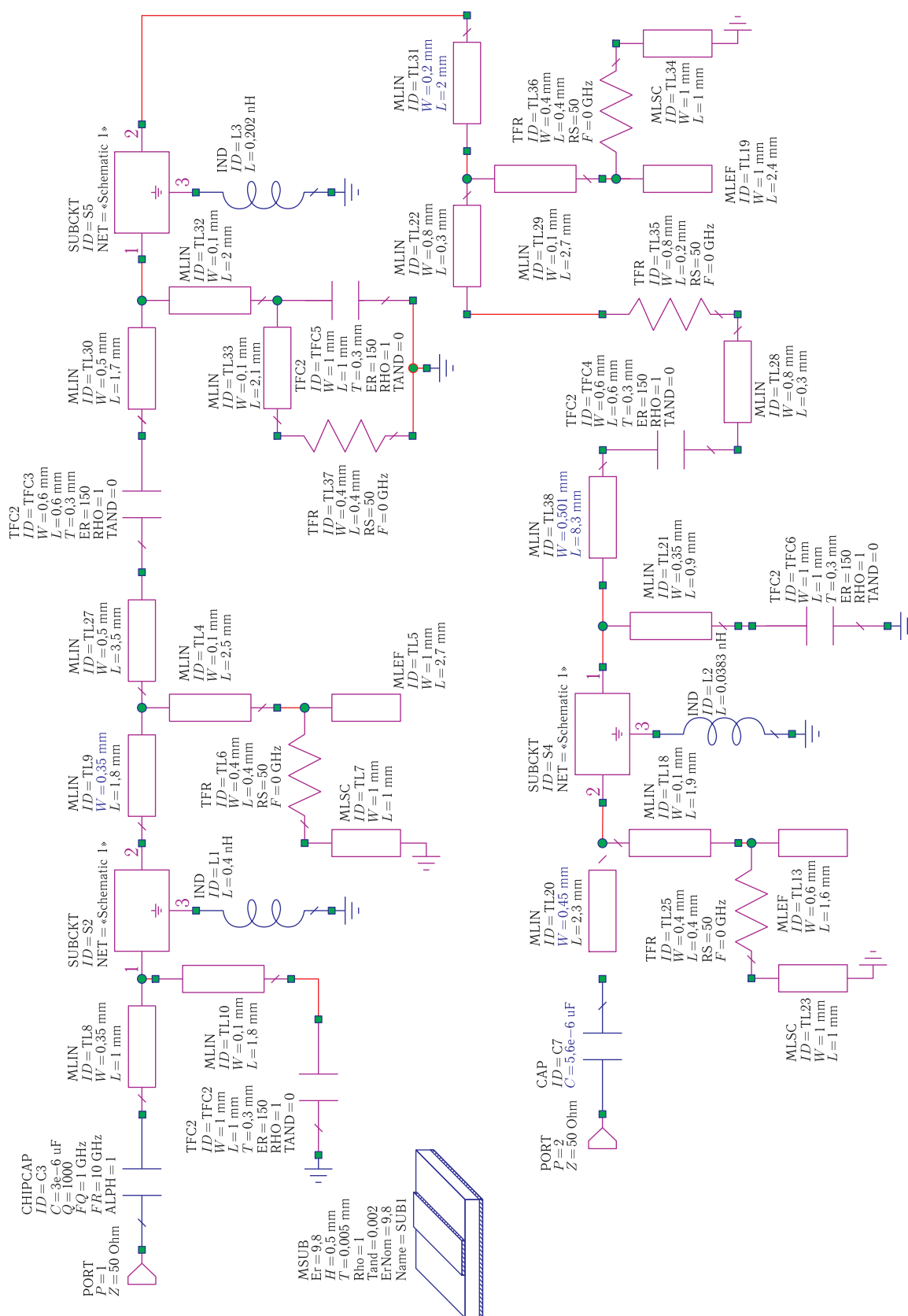


Рис. 7. Представление расчетных элементов топологии МШУ в среде AWR

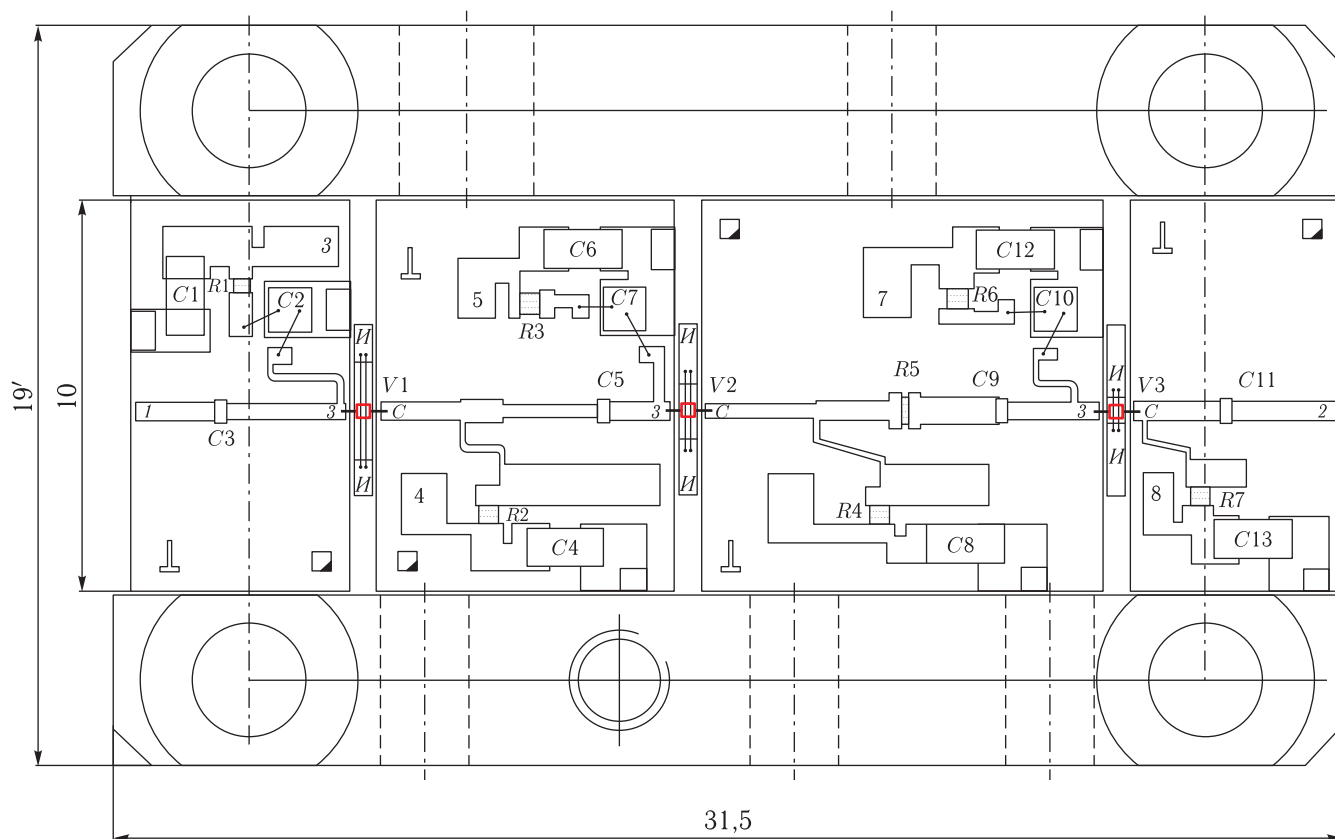


Рис. 8. Реализация топологии МШУ в виде микросборки

В процессе расчетов выяснилось, что весьма существенную роль для комплексной оптимизации параметров усилителя играет величина индуктивности в истоке транзисторов (что в условиях использования корпусных транзисторов труднореализуемо). В первом и втором каскадах применена последовательная обратная связь по току в виде отрезка высокоомной линии передачи в истоке. В первом каскаде величина обратной связи выбиралась исходя из реализации необходимой устойчивости и согласования по шумовым параметрам. Во втором каскаде величина обратной связи, электрическое расстояние между 1 и 2 каскадом и цепи согласования выбирались также исходя из реализации устойчивости и максимизации K_y . В третьем каскаде подбором параметров цепей согласования, развязки и аттенюации обеспечивалась стабильность и коррекция неравномерности характеристики, а также величина K_y .

На основе вышеизложенного был разработан 3-каскадный МШУ с центральной частотой 8 ГГц

и полосой частот более 15 %, $K_y = 28$ дБ, $K_{ш} = 1,1$ дБ, $K_{СВн}$ менее 1,3. Схема и топология МШУ представлены на рис. 7 и 8.

На рис. 9 представлены расчетные частотные характеристики K_y , $K_{СВн}$, $K_{ш}$ и коэффициентов стабильности по амплитуде K и по фазе B_f .

Опыт предыдущих расчетов аналогичных усилителей на зарубежных транзисторах и их реализация говорят о высокой степени совпадения вычислений с полученными результатами.

На основе полученных данных спроектирован функционально законченный прибор МШУ (рис. 10), включающий две идентичных микросборки усилителя, микрополосковый фильтр и два полосковых вентиля, служащих выходной нагрузкой для усилительных микросборок. Входную нагрузку обеспечивает волноводный вентиль, вносящий минимум потерь в общий тракт. Полную автономность прибору обеспечивает источник вторичного электропитания размерами $60 \times 40 \times 8$ мм, устанавливаемый с противоположной стороны от радиотракта.

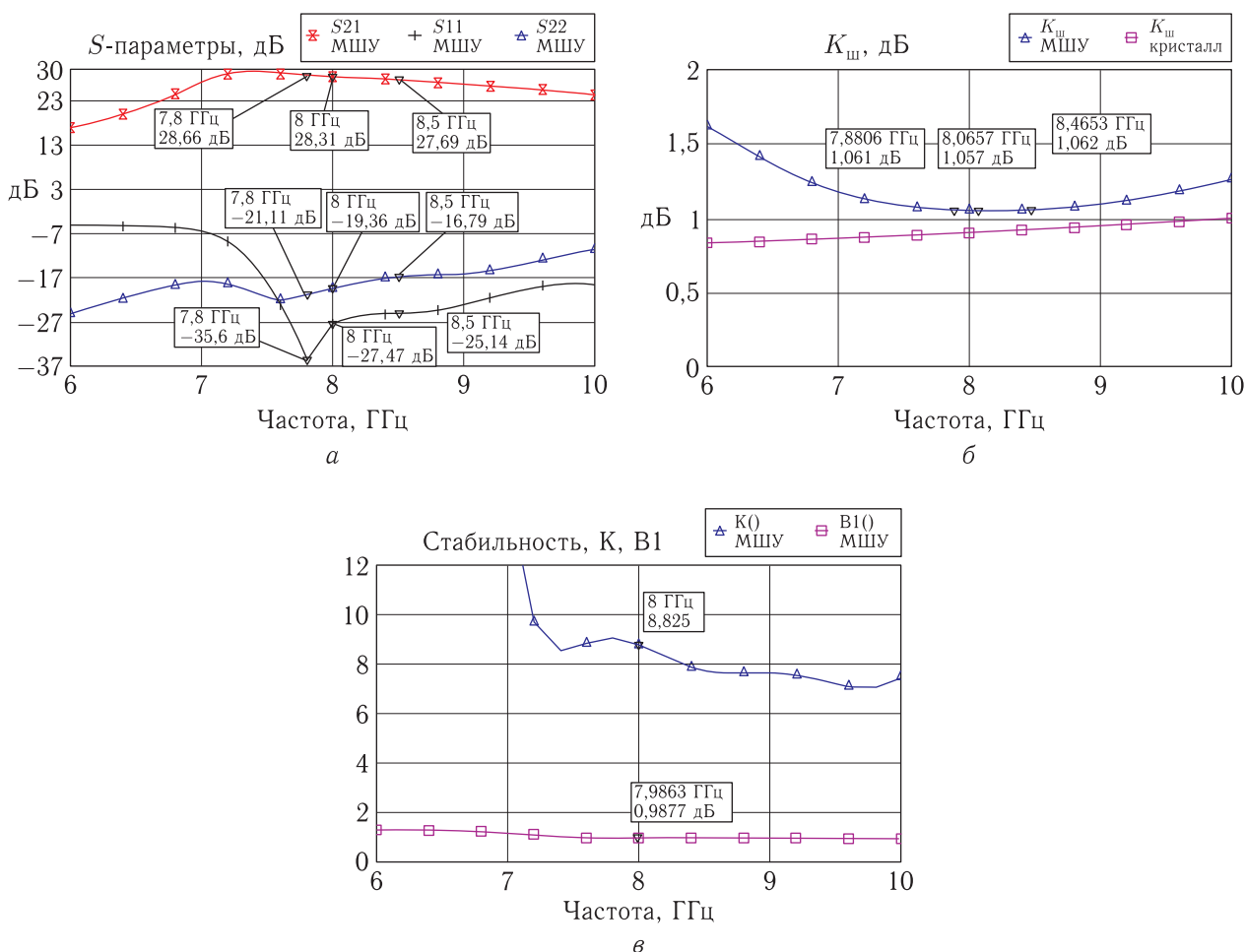


Рис. 9. Расчетные характеристики микросборки МШУ: S -параметры (а), шумовая характеристика (б) и стабильность (в)

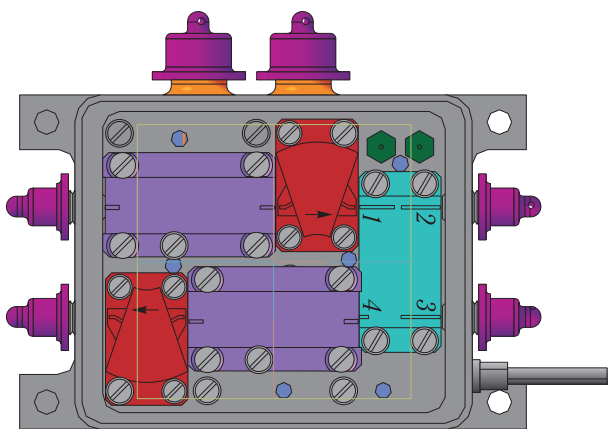


Рис. 10. Внешний вид прибора МШУ

Характеристики МШУ, полученные в ходе моделирования, представлены на рис. 11.

Для увеличения надежности работы прибора предлагаются следующие меры.

1. В сантиметровом диапазоне волн нет необходимости внедрения экзотических технологий, нужен лишь плотный контроль осуществления уже имеющихся.

2. Время безотказной работы транзистора 3П398Б-5, указанное в ТУ, составляет 50 000 ч в тяжелых условиях эксплуатации. При решении задачи построения спутников с 15-летним сроком активного существования указанный ресурс должен составлять 140 000 ч. В связи с этим предлагается применять тройное резервирование входных узлов, для чего потребуется либо закупка,

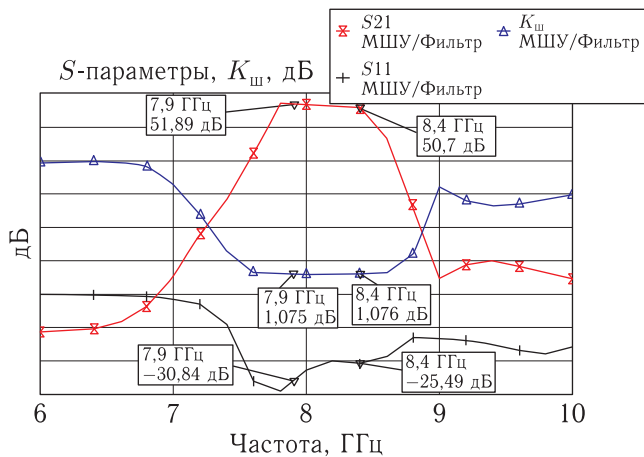


Рис. 11. Основные параметры сконструированного прибора МШУ

либо собственная разработка трехпозиционного электромеханического переключателя, управляемого импульсами напряжения.

3. Кроме того, для увеличения срока активного существования транзисторов, а вместе с ними блока МШУ, возможно по достижению экспертно установленного порогового уровня тока потребления применение своевременного запуска процесса релаксации рабочего полуконтакта.

Метод увеличения ресурса работы СВЧ-транзисторов для спецприменений

Обеспечение требуемой радиационной стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры к ионизирующим излучениям космического пространства является одной из важнейших решаемых задач создания космических аппаратов с длительными сроками активного существования (10–15 лет).

Длительность срока активного существования космических аппаратов напрямую зависит от стойкости используемой электронной компонентной базы к спецфакторам космического пространства (КП).

В технических условиях на используемый транзистор указано значение времени безотказной работы, равное 50 000 ч при температуре окружаю-

щей среды до +85 °С. Максимальная рабочая температура, согласно техническому заданию на систему, составляет +50 °С. Это обстоятельство объективно способствует увеличению срока наработки на отказ, однако требует дополнительных испытаний и согласований с производителем элементной базы.

Интересы обеспечения надежности бортовых устройств требуют резервирования на уровне приборов. В целях безусловного выполнения требований заказчика по наработке для блока малощумящего усилителя предлагается использовать троирование.

В свою очередь, это решение предполагает применение трехпозиционного электромеханического переключателя, управляемого импульсами напряжения.

Результаты исследований воздействия спецфакторов космического пространства на физику работы полупроводниковых приборов свидетельствует о постепенном возрастании тока потребления электронных приборов с течением времени. Как показывает статистика, отказы в условиях КП обусловлены в большей степени превышением максимальных значений поглощенной дозы ионизирующего излучения, указанных в технических условиях на элемент. Влияние тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ) на надежность работы арсенид-галлиевых транзисторов пренебрежимо мало. Дрейф параметров радиоэлемента связан с влиянием ионизирующего излучения космического пространства на структуру полупроводника и является, по сути, показателем превышения критической дозы по отношению к элементу ЭКБ. В то же время степень деградации элемента под воздействием ионизирующего излучения определяется соотношением между процессами накопления и процессами релаксации (отжига). Отжиг позволяет частично привести изделия в рабочее состояние, то есть нейтрализовать захваченный положительный заряд радиационно-индуцированными электронами из зоны проводимости. Скорость восстановления элемента определяется оптимальными значениями температуры и длительности отжига.

В данной работе предлагается схемотехническое решение, позволяющее предотвратить сбои в аппаратуре путем отслеживания момента превышения тока потребления активными элементами

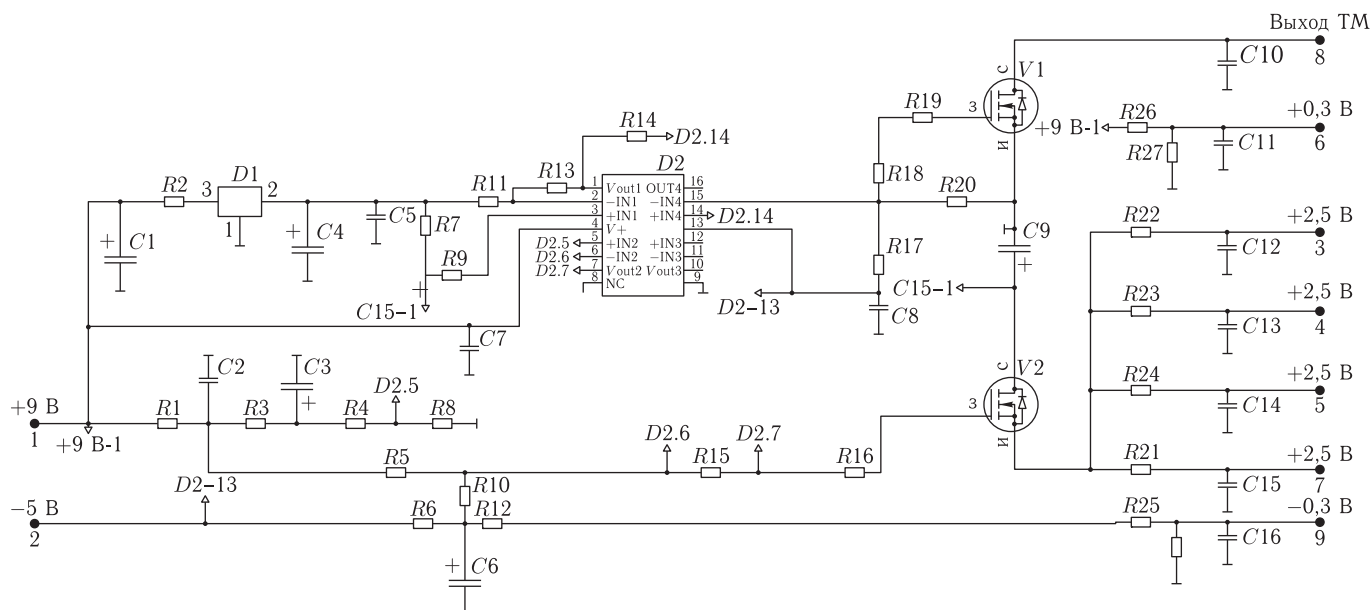


Рис. 12. Фрагмент схемы подачи питания на МШУ с функцией защиты по накопленной дозе. Активные элементы схемы: D1 — линейный стабилизатор напряжения 1325EP1Y; D2 — микросхема контроля работы РЭА 1114СК1Y; V1, V2 — MOSFET-транзисторы 2П525А-9

под воздействием спецфакторов и выдачи соответствующей телеметрической информации на решающее устройство. Схема МШУ, целиком разработанная на отечественной ЭКБ, отвечает требованиям приоритетной (по времени) подачи отрицательного смещения на затворы СВЧ-транзисторов, а также отвечает за выявление отказов вследствие обрыва потенциальных перемычек. Подобное схемное решение может найти применение в большинстве резервируемых радиочастотных узлов ретранслятора. Фрагмент схемы представлен на рис. 12.

Резистор R1 включен последовательно в шину питания МШУ. В зависимости от тока потребления падение напряжения на R1 (порядка 60 мВ) усиливается первыми двумя каскадами операционного УПТ D1. С ростом тока потребления усилителями на 25 % (и при соответствующем превышении порога на входе второго каскада ОУ на 5 мВ) положительное выходное напряжение операционного усилителя (+5 В) трансформируется в отрицательное (–5 В) и транзистор V1, используемый для телеметрии работоспособности блока МШУ, из открытого состояния перейдет в закрытый режим. Это будет служить сигналом неисправности, по которому система осуществит следующее

переключение: входного сигнала и подачу напряжения питания — на резервный полукомплект МШУ, а работающий полукомплект — в режим релаксации. Снятие потенциала с переключаемого полукомплекта позволяет с течением времени восстановить его работоспособность либо полностью, либо в значительной степени, в зависимости от времени последующей релаксации.

Выводы

1. При помощи общедоступной системы САПР на основе серийно выпускаемых малошумящих транзисторов отечественного производства рассчитана топология 3-каскадного усилителя (с параметрами на уровне мировых стандартов), обладающего устойчивостью, внутренним согласованием, необходимыми коэффициентом усиления и шумовой температурой.

2. Технология производства усилителей подобного класса в сантиметровом диапазоне (отработанная десятилетиями), позволяет без особых усовершенствований реализовать на практике предлагаемую схему МШУ. Издержки производства

могут быть существенно снижены при заказе партии средних размеров.

3. Предложенное схемотехническое решение, позволяющее повысить срок службы приборов в условиях воздействия факторов космического пространства, может быть востребовано при разработке аппаратуры для КА с длительным сроком активного существования.

Список литературы

1. *Дмитриев В.* Отечественные СВЧ-комплектующие на арсениде галлия // Компоненты и технологии, 2011, № 6.
2. *Козловский Э.Ю., Селезнев Б.И.* Моделирование СВЧ маломощного рНЕМТ транзистора с применением САПР Microwave Office // Вестник Новгородского государственного университета, 2012, № 68.
3. *Арыков В.С., Баров А.А., Кондратенко А.В.* Монолитная интегральная схема маломощного усилителя диапазона 8–12 ГГц на основе GaAs РНЕМТ-технологии. I Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ», Санкт-Петербург, 2012 г.
4. *Мокеров В.Г., Бабак Л.И., Федоров Ю.В., Черкашин М.В., Шеерман Ф.И., Бугаев А.С., Кузнецов А.Л., Гнатюк Д.Л.* Разработка комплекта монолитных маломощных усилителей X-диапазона на основе 0,15 мкм GaAs рНЕМТ-технологии. Доклады ТУСУРа, № 2(22), ч. 1, декабрь 2010.
5. *Михайлович С.В., Федоров Ю.В., Бугаев А.С., Галиев Р.Р., Ячменев А.Э., Щербакова М.Ю.* Построение масштабируемой шумовой модели МНЕМТ на GaAs с Lg от 50 до 250 нм. Доклады ТУСУРа, № 2(24), ч. 2, декабрь 2011.
6. *Бойко К.В., Нойкин Ю.М., Заргано Г.Ф.* Методические указания к выполнению специального лабораторного практикума «Нелинейные твердотельные устройства СВЧ» (специальность 071500 «Радиофизика и электроника»). Маломощный усилитель на ПТШ. Ростов-на-Дону, 2001.
7. *Иовдальский В.А., Виноградов В.Г., Земляков В.Е., Лапин В.Г., Киличенков Р.Б., Гринберг Д.С., Герасименко С.В.* Моделирование конструкций ГИС МШУ СВЧ-диапазона. Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC–2012. М.: МИРЭА, 2012. Ч. 4.
8. *Петух Н.Н., Белоусов Ю.С., Гарбузенко А.П.* Методика проектирования маломощного усилителя повышенной надежности с использованием отечественной ЭКБ. Материалы VII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». РУДН, Москва, 2015.