

Разработка сверхвысокочастотного многофункционального ферритового коаксиального устройства высокого уровня мощности для бортовых ретрансляторов с использованием датчика телеметрии

К. К. Фадеев[✉], В. М. Кислицын

АО «НИИ "Феррит-Домен"», Санкт-Петербург, Россия

[✉] fadeev-k-k@yandex.ru

Аннотация

Введение. Ферритовые развязывающие устройства широко используются в составе различных приемопередающих трактов космического применения. Компоновка составных узлов современных систем спутниковой связи уплотняется, поэтому для них предпочтительно применять комбинированные устройства, способные заменить несколько различных приборов. Таким образом, актуальна задача создания многофункциональных ферритовых устройств, способных выполнять дополнительные функции помимо развязки СВЧ-сигнала.

Цель работы. Создание многофункционального устройства, рассчитанного на высокий уровень мощности (ВУМ) СВЧ-сигнала. Разработка датчика телеметрии, позволяющего в режиме реального времени получать с указанного в технической документации интерфейса прибора значение постоянного напряжения, пропорциональное мощности, поступающей во встроенную нагрузку устройства.

Материалы и методы. Расчеты проводились в специализированных системах автоматизированного проектирования для электродинамического и теплового моделирования. Измерения и испытания на ВУМ проводились на материально-технической базе АО «НИИ "Феррит-Домен"».

Результаты. Создан многофункциональный прибор со встроенным датчиком телеметрии отраженной мощности. Датчик реализован исключительно на пассивных компонентах, и полученное устройство не требует внешнего источника питания. Значение постоянного напряжения на выходе датчика не более 4.5 В. Получена требуемая зависимость выходного напряжения от отраженной мощности. Прибор обладает повышенной надежностью, соответствующей требованиям современных систем космического применения. Коэффициент стоячей волны по напряжению входа/выхода прибора не превышает 1.25, прямые потери составляют не более 0.35 дБ, а обратные – не менее 20 дБ.

Заключение. Разработанный многофункциональный прибор соответствует современным требованиям к электронной компонентной базе космического применения. Реализованный в его составе датчик отраженной мощности не имеет аналогов в мире. Полученные результаты и наработки могут послужить основой для последующего создания аналогичных приборов на различные частоты и уровни СВЧ-мощности.

Ключевые слова: СВЧ, феррит, вентиль, телеметрия, детектор

Для цитирования: Фадеев К. К., Кислицын В. М. Разработка сверхвысокочастотного многофункционального ферритового коаксиального устройства высокого уровня мощности для бортовых ретрансляторов с использованием датчика телеметрии // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 4. С. 99–108.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-99-108

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.05.2025; принята к публикации после рецензирования 25.08.2025; опубликована онлайн 29.09.2025

Development of a High Power Ultra High Frequency Multifunctional Ferrite Coaxial Device with a Telemetry Sensor for Onboard Repeaters

Konstantin K. Fadeev[✉], Vadim M. Kislitsyn

Ferrite-Domen Scientific Research Institute, St Petersburg, Russia

[✉] fadeev-k-k@yandex.ru

Abstract

Introduction. Ferrite non-reciprocal devices are widely used in various space qualified transmit/receive modules. The layout of modern satellite communication systems is becoming more compact, which requires multifunctional devices capable of replacing several different components. Thus, the creation of hybrid ferrite devices capable of performing additional functions along with microwave signal isolation represents a relevant research task.

Aim. Creation of a multifunctional hybrid device for high RF power. Development of a telemetry sensor capable of providing a DC voltage value proportional to the level of reflected power.

Materials and methods. Calculations were performed in specialized CAD systems for electrodynamic and thermal analysis. Measurements and tests on high RF power were performed using the facilities of the Ferrite-Domen Scientific Research Institute.

Results. A multifunctional ferrite device with a built-in reflected power telemetry sensor is developed. The sensor is implemented exclusively on passive components; the hybrid device does not require an external power source. The DC voltage value at the sensor output does not exceed 4.5 V. The required dependence of the output voltage on the reflected power value is obtained. The device exhibits increased reliability, meeting the requirements of modern space application systems. Its input/output VSWR does not exceed 1.25, with the insertion and isolation losses being no more than 0.35 dB and no less than 20 dB, respectively.

Conclusion. The developed multifunctional device meets modern requirements for space electronic components. The implemented reflected power sensor has no analogues in the world. The obtained results can serve as a basis for the creation of similar devices for different frequencies and power levels.

Keywords: UHF, ferrite, isolator, telemetry, power sensor

For citation: Fadeev K. K., Kislitsyn V. M. Development of a High Power Ultra High Frequency Multifunctional Ferrite Coaxial Device with a Telemetry Sensor for Onboard Repeaters. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 4, pp. 99–108.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-4-99-108

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 06.05.2025; accepted 25.08.2025; published online 29.09.2025

Введение. Ферритовые устройства находят широкое применение в СВЧ-аппаратуре [1, 2] для развязки различных участков приемопередающего тракта. Одним из самых распространенных представителей указанного класса приборов является вентиль, служащий для защиты наиболее чувствительных элементов системы от отраженной мощности.

В соответствии с исходными требованиями в процессе выполнения опытно-конструкторской работы "Диадема" в АО «НИИ "Феррит-Домен"» было разработано многофункциональное (в соответствии с ГОСТ РВ 5999-003–2016)

устройство на основе коаксиального вентиля метрового диапазона длин волн для применения в аппаратуре космического назначения. Отличительные особенности созданного прибора – повышенная надежность (наработка 150 000 ч), стойкость к высоким ударным нагрузкам и наличие уникального элемента – блока телеметрии отраженной мощности.

Наличие телеметрии позволяет в режиме реального времени получать с указанного в технической документации интерфейса прибора значение постоянного напряжения, пропорциональное мощности, поступающей во встроен-

ную нагрузку вентиля. Блок содержит исключительно пассивные компоненты и не требует внешнего источника питания.

По сведениям из открытых источников разработанный многофункциональный прибор не имеет аналогов ни на отечественном, ни на зарубежном рынках.

Описание конструкции и электрические параметры. Прибор состоит из трех основных структурных функциональных блоков: полоскового циркулятора, включающего в себя ферритовый резонатор, согласующие цепи и магнитную систему; модуля нагрузки, подключаемого к свободному (третьему) плечу циркулятора и содержащего микрополосковую резистивную плату; блока телеметрии отраженной мощности, расположенного внутри модуля нагрузки (рис. 1).

Для подключения к коаксиальному тракту аппаратуры на входе и выходе прибора установлены СВЧ-разъемы типа TNC. Дополнительно прибор содержит низкочастотный соединитель (далее – НЧ-вилка), подключаемый к выходу блока телеметрии и служащий для измерения постоянного напряжения.

Многофункциональное устройство предназначено для эксплуатации в составе аппаратуры космического применения. Выбор покупных комплектующих изделий, материалов и покрытий в составе прибора осуществлялся с учетом высоких требований по стойкости к радиационным и специальным видам воздействий. Элементы, входящие в состав блока детектора, выбраны из отечественной электронной компо-

нентной базы и соответствуют предъявляемым к изделию в целом требованиям по надежности.

Стабильность теплового режима работы прибора в составе аппаратуры обеспечивается кондуктивным отводом тепла через его присоединительную поверхность. В условиях вакуума отсутствует механизм конвективного теплообмена внешней поверхности вентиля с окружающей средой, поэтому для повышения эффективности охлаждения он окрашивается эмалью ЭКОМ-2, коэффициент теплового излучения которой равен 0.95. Это позволяет максимально увеличить количество тепла, отводимого через механизм излучения.

Основные электрические параметры устройства приведены в табл. 1. Контрольные точки для датчика телеметрии приведены в табл. 2. Диапазон рабочих частот, а также крутизна и вид зависимости выходного напряжения датчика от отраженной мощности определяются номиналами применяемых электронных компонентов. Соответствие значений напряжения заданным контрольным точкам обеспечивается в процессе настройки блока

Табл. 1. Основные электрические параметры разработанного вентиля

Tab. 1. Main electrical parameters of the developed isolator

Параметр	Значение
Рабочий диапазон частот, МГц	275...325
КСВН входа/выхода, не более	1.25
Прямые потери, дБ, не более	0.35
Обратные потери, дБ, не менее	20.0
Входная непрерывная мощность, Вт, не более	250
Отраженная мощность, Вт, не более	170

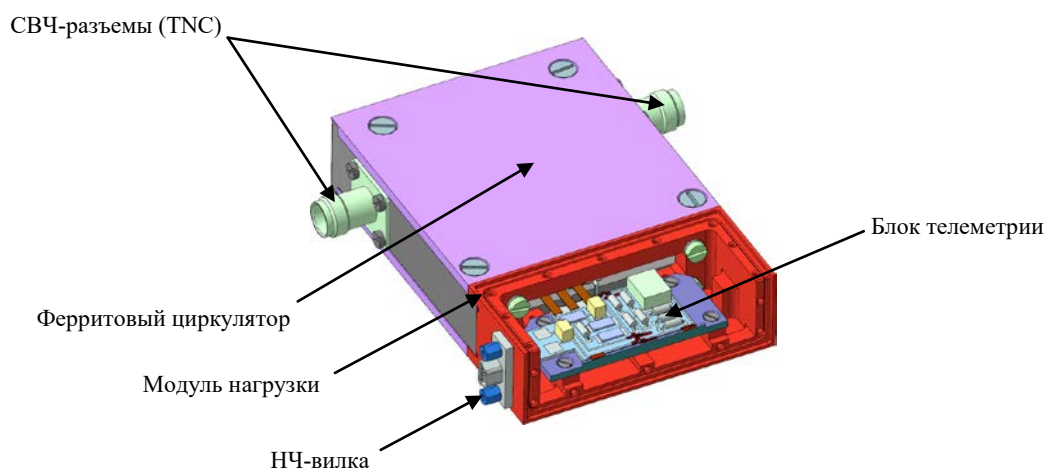


Рис. 1. Общий вид прибора

Fig. 1. General view of the device

Табл. 2. Параметры датчика телеметрии отраженной мощности

Tab. 2. Reflected power telemetry sensor parameters

Отраженная мощность ($P_{отр}$), Вт	Допустимый диапазон значений напряжения на выходе датчика, В
≤ 0.1	0...0.1
От 0.1 до (30 ± 2)	0...2.3
30 ± 2	1.7...2.3
$\geq (30 \pm 2)$	1.7...4.5

телеметрии. Таким образом, возможна реализация зависимостей выходного напряжения в различных частотных диапазонах под индивидуальные требования заказчика.

Устройство ферритового коаксиального вентилля. В основе конструкции разработанного прибора лежит структура классического Y-циркулятора [3, 4], включающая в себя симметричное трехплечное разветвление с выполненными на нем согласующими цепями, ферритовые вкладыши и магнитную систему. Расчет ферритового резонатора и базовой конфигурации полосковой линии проводился по стандартным методикам проектирования полосковых циркуляторов [5–9]. Со стороны третьего плеча располагается поглощающая нагрузка.

За счет применения нестандартных конструктивных решений при формировании проводящей линии (искусственное увеличение электрической длины пути СВЧ-волны, проходящей через устройство; дополнительная компенсация реактивной части сопротивления резонатора) [6, 10] удалось существенно уменьшить общие габариты и массу прибора. Магнитная система вентилля стабилизирована с учетом заданных требований по диапазону рабочих температур.

Классическая конструкция подобных приборов не предназначена для ударных нагрузок, воздействию которых при выходе космического аппарата на орбиту подвергаются все входящие в него компоненты. Для повышения общей механической прочности конструкции

впервые в практике нашего предприятия корпусные детали дополнены упорными связующими элементами с прецизионным сочленением, которые обеспечивают жесткое сопряжение и фиксируют взаимное положение указанных деталей (рис. 2). В ходе предварительных испытаний была подтверждена стойкость вентилей к воздействию механических ударов одиночного действия с пиковым ударным ускорением до $2000g$.

Конфигурация микрополосковой нагрузки выполнена на основе резистора с экспоненциально увеличивающейся шириной. Такая топология позволяет добиться хорошего согласования во всей заданной полосе частот – значение коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) нагрузки не превышает 1.04.

Резистор имеет стандартное сопротивление 50 Ом. В качестве подложки был выбран нитрид алюминия вследствие его высокой теплопроводности.

Микрополосковая плата устанавливается на основание из медного сплава, размещаемое в корпусе модуля нагрузки. К последнему дополнительно предъявляются следующие требования:

- достаточный внутренний объем сборочной единицы для возможности свободного размещения как самой микрополосковой нагрузки, так и блока детектора;

- максимальная эффективность отвода тепла в единицу времени, выделяемого поглощающей нагрузкой, к привалочной поверхности прибора.

Указанные требования в определенном смысле взаимно противоречивы. Для обеспечения максимального теплоотвода следует использовать медные сплавы, поскольку они обладают наиболее высокой теплопроводностью среди доступных материалов. Однако изготовление геометрически сложной цельной детали из этого металла технологически (низкая скорость механической обработки) и финансово (высокая ито-

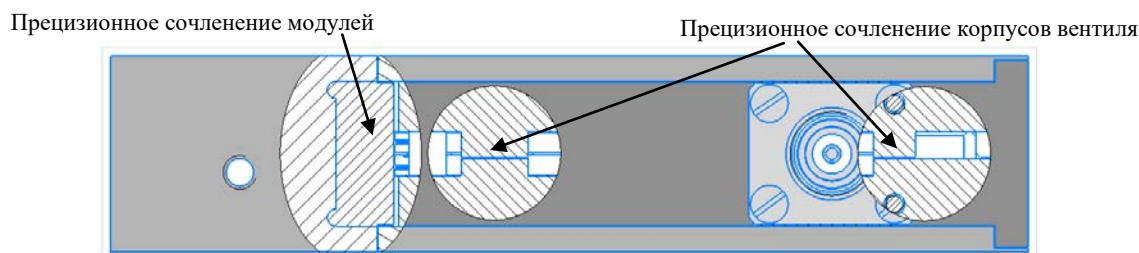


Рис. 2. Упорные элементы корпусов прибора

Fig. 2. Thrust elements of the device housings

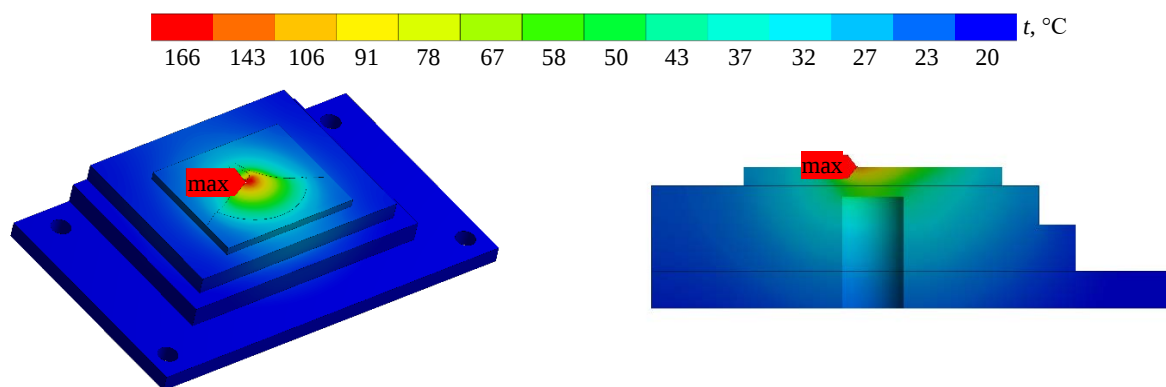


Рис. 3. Температурное распределение нагрузки вентилля
Fig. 3. Temperature distribution of the isolator's termination

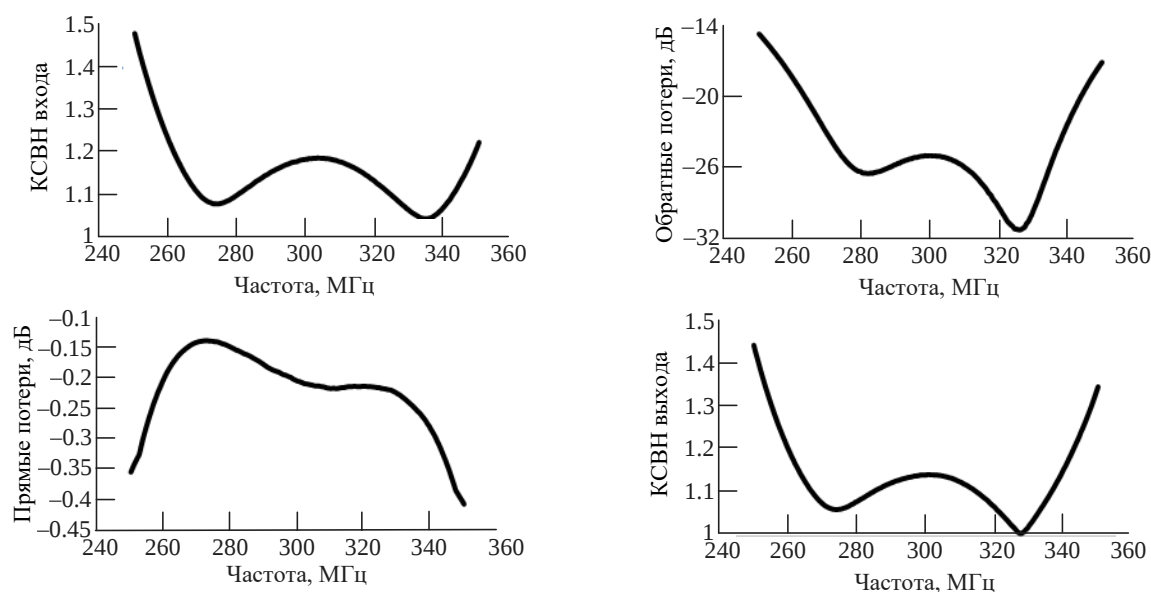


Рис. 4. Основные электрические параметры вентилля
Fig. 4. Main electrical parameters of the isolator

говая стоимость) неоправданно. К тому же, это увеличивает общую массу конструкции, что является критичным фактором для приборов космического применения. Поэтому было принято решение сделать данную деталь составной.

Основание с микрополосковой платой крепится к корпусу нагрузки, выполненному из алюминиевого сплава. Нагрузка, в свою очередь, соединяется с циркулятором. В корпусе также размещается блок детектора и устанавливается НЧ-вилка. В итоге получается сложный и нестандартный по функционалу, но оптимальный по конструктивному исполнению модуль, имеющий явные преимущества перед классической схемой построения в составе подобных СВЧ-устройств.

Для оценки работоспособности нагрузки проводилось электродинамическое и тепловое [11, 12] моделирование устройства в различных режи-

мах эксплуатации. Температурное распределение нагрузки (в режиме насыщения) при рассеиваемой мощности 170 Вт приведено на рис. 3.

Полученные результаты показывают, что в предельном режиме температура разогрева не является критичной для применяемых в нагрузке материалов и покрытий.

Типичные S-параметры вентилля приведены на рис. 4.

Разработанный вентилль является полноценным самостоятельным ферритовым развязывающим устройством, способным выполнять свои функции в заданном рабочем диапазоне частот. Фотография прибора приведена на рис. 5.

Блок телеметрии. Датчик телеметрии позволяет определить относительное значение мощности отраженного от нагрузки тракта СВЧ-сигнала, поступающее в нагрузку прибора.



Рис. 5. Фото разработанного multifunctional устройства

Fig. 5. Photo of the developed multifunctional device

Одним из ключевых требований к датчику телеметрии, входящему в состав разрабатываемого multifunctional устройства, была его пассивность, т. е. отсутствие необходимости во внешнем источнике питания. Доступные готовые решения указанному критерию не соответствовали.

Выбор применяемых в датчике электронных компонентов диктовался необходимостью обеспечить повышенные показатели надежности изделия.

В процессе создания прибора прорабатывались различные подходы к реализации датчика телеметрии. При этом первоначальные варианты обладали недостатками, принципиально не позволяющими применять их в составе multifunctional устройства. Все промежуточные результаты подробно анализировались и учитывались при переходе к последующим этапам разработки. Это позволило в итоге создать прибор, в полной мере удовлетворяющий всем заданным техническим требованиям.

Чтобы подтвердить оптимальность конечной конфигурации, рассмотрим более подробно один из первых вариантов детектора. Основным элементом предложенного механизма реализации телеметрии стали ответвители мощности, размещенные на плате микрополосковой поглощающей нагрузки. Топология последней приведена на рис. 6.



Рис. 6. Топология микрополосковой резистивной нагрузки с ответвителями

Fig. 6. Microstrip resistive termination topology with couplers

Положение и конфигурация микрополосковых выводов, через которые ответвлялась часть СВЧ-сигнала, подбирались таким образом, чтобы номинальное значение переходного ослабления составляло (30 ± 0.1) дБ.

Указанные выводы были электрически связаны с "входом" платы детектора, на которой осуществлялось преобразование СВЧ-мощности в постоянное напряжение. Принципиальная и структурная схемы детектора приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

Согласно ТЗ на проводимую работу детектор должен обеспечивать 2 В выходного напряжения при значении отраженной мощности 30 Вт. Также постоянное напряжение не должно превышать 4.5 В при отраженной мощности от 0 до 170 Вт. Для реализации заданного режима необходима настройка схемы детектора. Регулировка коэффициента ответвления на полосковой нагрузке технически недостижима, поэтому подстройка схемы возможна только подбором номиналов резисторов R2 и R3. Однако на практике зависимость напряжения на выходе детектора от номиналов указанных резисторов оказалась нелинейной и слабопрогнозируемой. Это связано с тем, что никаких мер по экранированию детектора от области рабочего зазора циркулятора предусмотрено не было. В связи с этим все электронные компоненты были подвержены дополнительной наведенной электродвижущей силе от многомодового СВЧ-сигнала [13], что значительно усложняло процесс настройки, а также не позволяло адекватно оценивать работоспособность схемы на этапе расчетов. Следует отметить, что выяв-

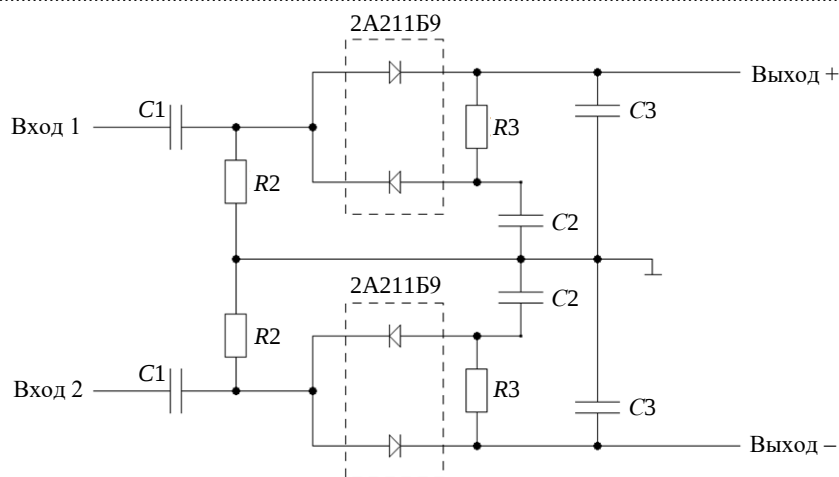


Рис. 7. Принципиальная схема предварительного варианта реализации детектора отраженной мощности

Fig. 7. Schematic diagram of a preliminary implementation of a reflected power detector

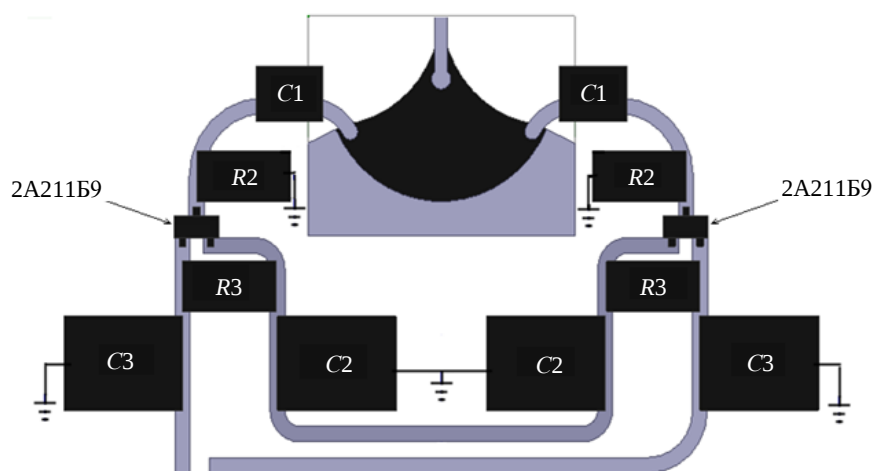


Рис. 8. Структурная схема предварительного варианта реализации детектора отраженной мощности

Fig. 8. Block diagram of a preliminary implementation of a reflected power detector

ленный эффект вторичного возбуждения паразитного сигнала многократно усиливался при работе вентилей на высоком уровне мощности. Дополнительное неудобство при отработке макета было вызвано тем, что подбор номиналов резисторов предполагал многократное и непрогнозируемое в части количества итераций повторение процесса их установки на плату детектора посредством пайки и последующего демонтажа. Это существенно снижало технологичность изготовления в дальнейшем уже серийного изделия, повышало общую трудоемкость и вероятность выхода компонентов из строя.

Как видно из рис. 7, выход схемы являлся дифференциальным, т. е. "отрицательный" вывод датчика электрически не связан с "нулевой" точкой прибора. Однако в конечной аппаратуре, для которой разрабатывается изделие, "нулевая" точка для всех составных компонентов обеспечива-

ется через одну общую шину, поэтому необходим общий "ноль" и у блока телеметрии, и у вентилей. Следовательно, корректная установка разработанного устройства в систему с такой конфигурацией детектора невозможна.

Учитывая отмеченные недостатки предложенного варианта реализации датчика, при составлении нового варианта схемы было решено использовать принципиально иные подходы в части отщепления отраженного сигнала на вход детектора и настройки устройства в целом. Блок телеметрии больше не имеет прямой электрической связи с основной проводящей линией вентилей – СВЧ-сигнал на его вход подается посредством возбуждения волны через петлю связи [13, 14]. Это позволило свести настройку зависимости выходного напряжения от отраженной мощности к подбору коэффициента связи между блоком и основной частью

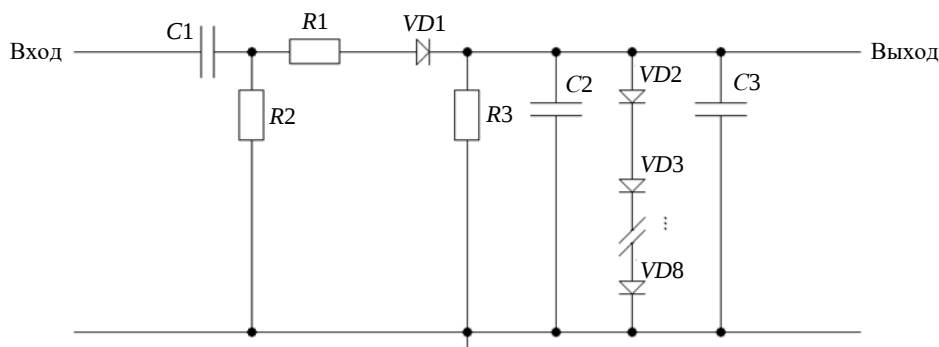


Рис. 9. Принципиальная схема встраиваемого датчика телеметрии

Fig. 9. Schematic diagram of the telemetry sensor

прибора. Итоговая схема датчика телеметрии изображена на рис. 9.

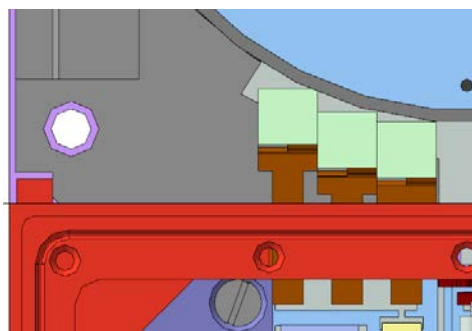
Используемый датчик выполняет функцию выпрямляющего устройства, которое преобразует переменное напряжение в постоянное. Применяемая петля связи представляет собой проводник (выполненный в форме "вилки"), расположенный в области емкостного шлейфа третьего плеча прибора и имеющий прямой электрический контакт со входом блока телеметрии. В состав связующего элемента входит фторопластовый вкладыш, изолирующий проводник от полосковой линии прибора и корпусов. Пример применения петли связи приведен на рис. 10. Значение выходного напряжения настраивается по уровню ответвления отраженного сигнала от основной проводящей линии прибора к детектору и определяется подбором положения петли связи в приборе.

Рассмотрим подробно электрическую схему детектора [15]. Последний представляет собой однополупериодный однофазный выпрямитель. Преобразование напряжения обеспечивается диодом VD1. Конденсатор C1 предназначен для развязки входа схемы по постоянной составляющей

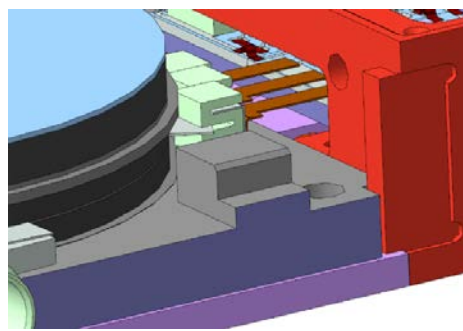
сигнала, резисторы R1 и R2 образуют делитель напряжения, обеспечивающий необходимый режим по току на диоде VD1, резистор R3 определяет выходное сопротивление схемы, конденсатор C2 служит для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, конденсатор C3 шунтирует выход схемы по переменной составляющей. Соединенные последовательно диоды VD2–VD8 обеспечивают ограничение выходного напряжения детектора на уровне не более 4.5 В в соответствии с требованиями заказчика.

"Отрицательный" вывод датчика напрямую связан с корпусом вентиля, благодаря чему блок детектора и сам прибор имеют общую "нулевую" точку.

Использование иного принципа подачи переменного входного сигнала на схему позволило реализовать более эффективную компоновку блока телеметрии в составе модуля нагрузки. Основание с расположенным на нем блоком размещается в области над микрополосковой нагрузкой. Было проведено тепловое моделирование для оценки влияния излучаемого резистивной платой тепла на расположенный над ней блок. Результаты моделирования приведены на рис. 11.



а



б

Рис. 10. Петли связи блока телеметрии: а – вид сверху; б – вид сбоку

Fig. 10. Telemetry communication loops: а – top view; б – side view

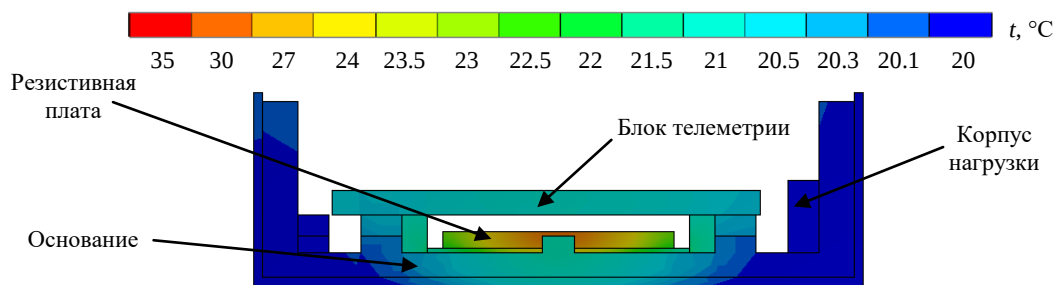


Рис. 11. Тепловое распределение модуля нагрузки

Fig. 11. Thermal distribution of the load module

Электрическая схема блока детектора реализована на подложке из поликора. Поликор является хрупким керамическим материалом, и с целью снижения механических напряжений в объеме платы при внешних воздействиях она разделена на сегменты, располагаемые на основании с обеспечением теплового зазора между ними.

После настройки во избежание временной деградации электронных компонентов и для дополнительной защиты схемы от внешних климатических воздействий плата детектора заливается компаундом К-115.

Принятые конструктивные решения позволили обеспечить стойкость блока телеметрии к заданным требованиям по механическим и температурным воздействиям. Успешные результаты испытаний подтвердили правильность выбранного подхода.

Типовая зависимость выходного напряжения датчика телеметрии от уровня отраженной мощности приведена на рис. 12.

Заключение. Разработан ферритовый многофункциональный прибор метрового диапазона длин волн со встроенным датчиком телеметрии отраженной мощности. Датчик реализован на основе пассивных компонентов, благодаря чему для его работы не требуются внешние источники питания.

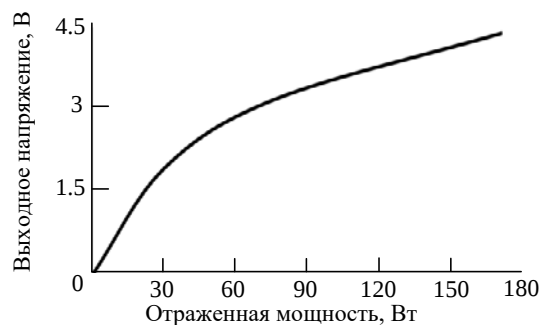


Рис. 12. Зависимость выходного напряжения блока телеметрии от отраженной мощности

Fig. 12. Reflected power dependence of the output voltage of the telemetry unit

Прибор предназначен для применения в космической аппаратуре и обладает повышенной надежностью (наработка 150 000 ч). Материалы, покрытия и применяемые компоненты выбраны с учетом условий эксплуатации вентиля.

Описанные особенности конструктивного исполнения разработанного многофункционального устройства стали отражением обширного перечня требований, предъявляемых со стороны заказчика данной работы.

Полученные авторами результаты и наработки могут послужить основой для последующего создания линейки приборов такого класса, работающих на различных частотах и уровнях СВЧ-мощности, с учетом пожеланий конечного потребителя.

Список литературы

1. Микаэлян А. Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 664 с.
2. Лакс Б., Баттон К. Сверхвысокочастотные ферриты и ферритмагнетики. М.: Мир, 1965. 675 с.
3. Гуревич А. Г., Мелков Г. А. Магнитные колебания и волны. М.: Физматлит, 1994. 464 с.
4. Fay C. E., Comstock R. L. Operation of the Ferrite Junction Circulator // IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. 1965. Vol. 13, iss. 1. P. 15–27 doi: 10.1109/TMTT.1965.1125923
5. Вамберский М. В., Абрамов В. П., Казанцев

В. И. Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ. М.: Радио и связь, 1982. 136 с.

6. Ильченко К. Ферритовые и диэлектрические резонаторы СВЧ. Киев: Изд-во Киев. ун-та, 1973. 175 с.
7. Helszajn J. The Stripline Circulator. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 592 p.
8. Linkhart D. K. Microwave circulator design. Norwood: Artech house, 2014. 364 p.
9. Helszajn J. Microwave Polarizers, Power Dividers, Phase Shifters, Circulators, and Switches. New Jersey: John Wiley & Sons, 2018. 352 p.

10. Фельдштейн А. Л. Справочник по элементам полосковой техники. М.: Связь, 1979. 336 с.
11. Дульнев Г. Н., Тихонов С. В. Основы теории теплообмена / СПбГУИТМО. СПб., 2010. 93 с.
12. Hsiao J. J., Tsounis B. Temperature stability of quality factor of junction circulators // IEE Proc. Microw. Antennas Propag. 1995. Vol. 142, № 1. P. 67–70.

13. Pozar D. M. Microwave engineering. New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 700 p.
14. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
15. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Бином, 2014. 706 с.

Информация об авторах

Фадеев Константин Константинович – инженер по специальности "Электронные приборы и устройства" (2009, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), начальник лаборатории АО «НИИ "Феррит-Домен"». Автор трех научных публикаций. Сфера интересов – разработка пассивной ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: АО «НИИ "Феррит-Домен"», ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия
E-mail: fadeev-k-k@yandex.ru

Кислицын Вадим Михайлович – магистр по специальности "Электроника и нанoeлектроника" (2018, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), ведущий инженер лаборатории АО «НИИ "Феррит-Домен"». Автор одной научной публикации. Сфера интересов – разработка пассивной ЭКБ и устройств СВЧ-диапазона.

Адрес: АО «НИИ "Феррит-Домен"», ул. Цветочная, д. 25, к. 3, лит. Б, Санкт-Петербург, 196006, Россия
E-mail: kislicyn-vadim@yandex.ru

References

1. Mikajeljan A. L. *Teorija i primenenie ferritov na sverhvysokih chastotah* [Theory and Application of Ferrites at Microwave Frequencies]. Leningrad, Gosen-ergoizdat, 1963, 664 p. (In Russ.)
2. Lax B., Button K. J. Microwave Ferrites and Ferrimagnets. New York, McGraw-Hill, 1962, 752 p.
3. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnitnye kolebaniya i volny* [Magnetic Oscillations and Waves]. Moscow, Physmathlit, 1994, 464 p. (In Russ.)
4. Fay C. E., Comstock R. L. Operation of the Ferrite Junction Circulator. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques. 1965, vol. 13, iss. 1, pp. 15–27. doi: 10.1109/TMTT.1965.1125923
5. Vamberskij M. V., Abramov V. P., Kazancev V. I. *Konstruirovaniye ferritovykh razv'yazvayushhih priborov SVCh* [Design of Ferrite Microwave De-coupling Devices]. Moscow, Radio and communications, 1982, 136 p. (In Russ.)
6. Il'chenko K. *Ferritovye i dielektricheskie rezonatory SVCh* [Ferrite and Dielectric Microwave Resonators]. Kiev, Izdatel'stvo Kievskogo universiteta, 1973, 175 p. (In Russ.)

7. Hsiao J. J. The Stripline Circulator. New Jersey, John Wiley & Sons, Inc, 2008, 592 p.
8. Linkhart D. K. Microwave Circulator Design. Norwood, Artech house, 2014, 364 p.
9. Hsiao J. J. Microwave Polarizers, Power Dividers, Phase Shifters, Circulators, and Switches. New Jersey, John Wiley & Sons, 2018, 352 p.
10. Fel'dshteyn A. L. *Spravochnik po elementam poloskovoy tekhniki* [Handbook of Strip Technology Elements]. Moscow, Svyaz', 1979, 336 p. (In Russ.)
11. Dul'nev G. N., Tihonov S. V. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of Heat and Mass Transfer Theory]. SPb, SPbGUITMO, 2010, 93 p. (In Russ.)
12. Hsiao J. J., Tsounis B. Temperature Stability of Quality Factor of Junction Circulators. IEE Proc. Microw. Antennas Propag. 1995, vol. 142, no. 1, pp. 67–70.
13. Pozar D. M. Microwave engineering. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 700 p.
14. Fusco V. Microwave Circuits. Analysis and Computer-Aided Design. New Jersey, Prentice-Hall Intern., 1987, 358 p.
15. Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. Cambridge, Cambridge Academ, 2015, 1220 p.

Information about the authors

Konstantin K. Fadeev – Engineer in Electronic Devices and Systems (2009, Saint Petersburg Electrotechnical University), the Head of the Laboratory of Ferrite-Domen Scientific Research Institute. The author of 3 scientific publications. Area of expertise: development of passive ECB and microwave devices.

Address: Ferrite-Domen Scientific Research Institute, 25, build. 3, let. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg 196006, Russia
E-mail: fadeev-k-k@yandex.ru

Vadim M. Kislicyn – Master in Electronics and Nanoelectronics (2018, Saint Petersburg Electrotechnical University), the Lead Engineer of the Laboratory of Ferrite-Domen Scientific Research Institute. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: development of passive ECB and microwave devices.

Address: Ferrite-Domen Scientific Research Institute, 25, build. 3, let. B, Tsvetochnaya St., St Petersburg 196006, Russia
E-mail: kislicyn-vadim@yandex.ru