

УДК 621.37

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-120-129

Разработка входной защитной цепи радиочастотного тракта приемника КВ-диапазона

А. С. Колотов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

А. Н. Копысов, кандидат технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В. В. Хворенков, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье представлены результаты разработки входной защитной цепи, основное назначение которой – ограничение сигналов большой мощности, поступающих в радиочастотный тракт КВ-приемника по антенному входу. Входная защитная цепь предохраняет чувствительные узлы и элементы приемника от перегрузки и выхода из строя. Потребность в обеспечении надежности, безопасности работы сложных систем и комплексов связи с каждым годом только увеличивается. Актуальность защиты входных цепей проявляется при малом разнесении приемника и источника помехи, в условиях радиоэлектронной борьбы. Принцип действия разработанной схемы основан на управлении релейным переключателем. Описана методика выбора параметров компонентов, применяемых в схеме. Проведены практические испытания опытных образцов входной защитной цепи, установленной по входу выпускаемого КВ-приемника. В ходе практического эксперимента выявлены недостатки, которые не были отражены в имитационной модели, построенной в среде NI Multisim. В частности, это локальный нагрев компонентов на печатной плате, вызванный емкостным сопротивлением и слабым затуханием фильтра, вносимым в диапазоне 23...30 МГц. Отмечены пути доработки действующей цепи защиты. Важной особенностью схемы является то, что после проведения доработки контура входного детектора разработанную схему можно применять на частотах УКВ-диапазона до 520 МГц. К достоинствам схемы следует отнести малое время срабатывания – 1,27 мс, вносимое затухание – менее 0,01 дБм. Установлено, что изделие сохраняет работоспособность после подачи на антенный вход синусоидального ВЧ-сигнала в течение 15 минут с ЭДС 100 В в диапазоне рабочих частот.

Ключевые слова: КВ-приемник, защитная цепь, синусоидальный ВЧ-сигнал, радиочастотный тракт, средства РЭБ.

Введение

В радиочастотный (РЧ) тракт приемного оборудования могут наводиться преднамеренно или непреднамеренно сигналы достаточно высокого уровня, способные вывести из строя высокочувствительные цепи и находящиеся на этих цепях компоненты и элементы печатной платы. Актуальность защиты входных цепей может проявиться при малом разнесении приемника (рецептор помех) и источника мощного сигнала (источник помехи), при различных природных явлениях (атмосферные помехи), в случае преднамеренных радиопомех противника – в условиях радиоэлектронной борьбы (РЭБ) [1, 2], основные задачи которой состоят в том, чтобы ослепить и подавить противника. Подавление радиоэлектронных объектов – это создание на входе приемника шумового сигнала большего, чем полезный сигнал [3]. Вопросы построения частотно-избирательных цепей, использования элементов защиты аппаратуры рассматривались рядом авторов [4–7]. Наиболее распространены схемы, построенные на ограничительных рпн-диодах [8, 9],

реже – технологии трубок TR или Pre-TR [10]. В нормативных документах приемников (ГОСТ Р 52016–2003 «Приемники магистральной радиосвязи гектометрового-декаметрового диапазона волн. Параметры, общие технические требования и методы измерений») для декаметрового диапазона волн регламентирован параметр, который формирует требование к характеристикам входной защитной цепи, а именно сохранение работоспособности радиоприемного устройства после 15-минутного воздействия на его вход высокочастотного сигнала с ЭДС 100 В, в том числе и на частотах настройки.

Целью настоящей статьи является проектирование и исследование поведения работоспособности входной защитной цепи РЧ-тракта приемника КВ-диапазона.

Задачи и методы исследования

Для достижения цели исследования были решены следующие задачи.

1. Разработана электрическая принципиальная схема, выбрана компонентная база входной защитной цепи приемника.

2. Проведено сравнение макета печатной платы и реального образца изделия на предмет пороговых уровней включения схемы и тепловой нагрузки.

В процессе выполнения работы были использованы общенаучные методы теоретического исследования (анализ, синтез, статистические методы), теория автоматизированного проектирования, методы компьютерного моделирования и экспериментального исследования зависимостей параметров.

Разработка входной защитной цепи

К разрабатываемой схеме защиты входных цепей приемника предъявлялись следующие требования:

- входное сопротивление 50 Ом;
- диапазон рабочих частот 3...30 МГц;
- вносимые потери < 0,1 дБм;
- максимальное постоянное напряжение (В) $100 \pm 10 \%$;
- максимальное импульсное напряжение искрового пробоя 600 В;
- максимальная рассеиваемая мощность < 10 Вт;
- рабочая температура $-40 \dots +85 \text{ }^\circ\text{C}$.

Как правило, любая цепь защиты приемника предполагает двухэтапную структуру, где на одном из них будут использованы диодные ограничители. Недостаток в данном случае заключается в большом выделении тепла (порядка 30...40 Вт) [8]. Дополнительно нужно решить задачу теплоотводящих частей конструкции. Ограничение по максимальной рассеиваемой мощности накладывает запрет на использование диодных сборок. Принцип действия предложенной схемы основан на применении релейного переключателя. Схемы с управляемыми ключа-

ми на реле общеизвестны. Однако никто не применял реле в цепях защиты приемного оборудования. Схема работает в двух режимах. Компоненты *K1*, *VD2*, *VT2*, *VT3* образуют классический электронный ключ на реле и работают в принудительном режиме. Предложенная схема отличается от известных наличием дополнительного узла, образованного компонентами *K1*, *VD2*, *VT1*, *VT3* и элементами входного детектора (*C2–C4*, *R1–R3*), позволяющих работать схеме в автоматическом режиме в диапазоне 3...30 МГц. Разъединение (коммутация) участка электрической цепи происходит при превышении порогового уровня напряжения. Пороговый уровень в данной схеме составляет 2,5...5,4 В по входу приемной части *XW1*. Существенное влияние на величину порогового уровня оказывают элементы *C2–C4*, *R1–R4*, *VT1*, *VT3* (рис. 1) [11].

Контуры *C2–C4*, *R1–R3* образуют входной детектор. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) данного контура имеет вид фильтра высоких частот (ФВЧ), представленного на рисунке 2. Целесообразным было бы применение во входной защитной цепи фильтра нижних частот (ФНЧ). Применение ФНЧ по входу защитной цепи приведет к спаду АЧХ за пределами рабочих частот приемника. Данное решение способствует дополнительной защите на частотах свыше 30 МГц, на которых приемник должен быть невосприимчив.

В данном случае применение ФВЧ на пассивных компонентах обосновывается тем, что представленная схема с небольшой доработкой была внедрена также в приемник УКВ-диапазона с рабочим частотным диапазоном 30...520 МГц.

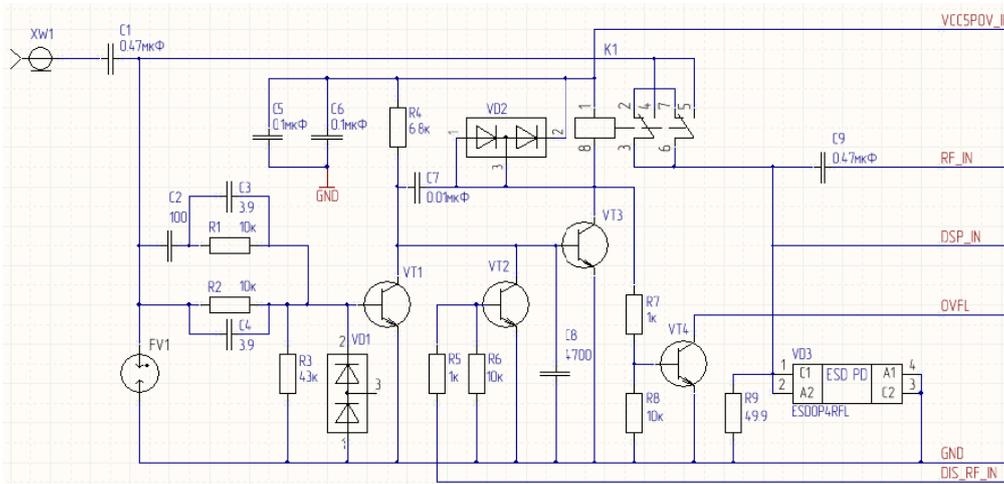


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

Fig. 1. The basic electrical schematics

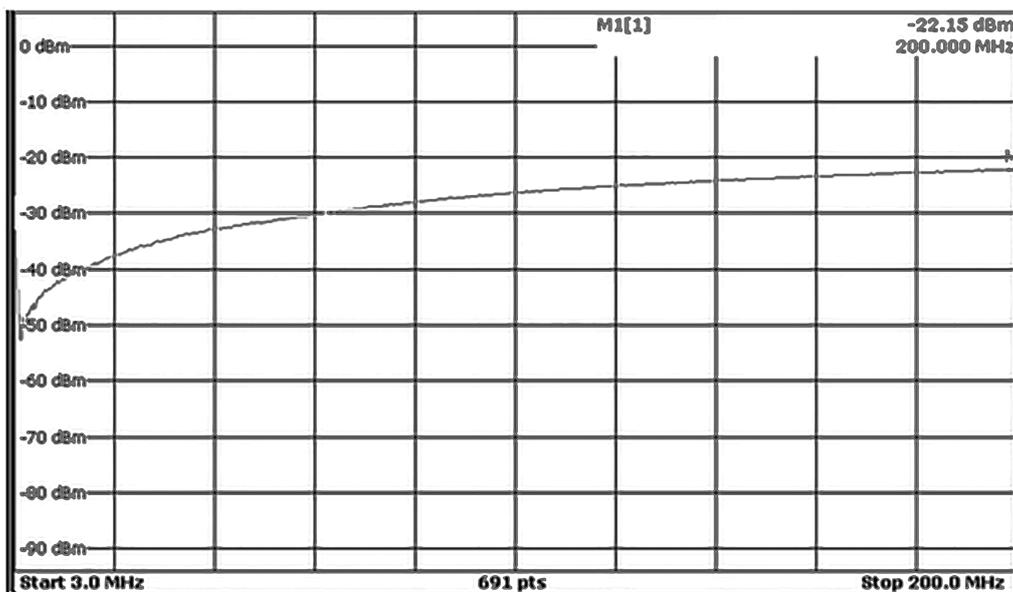


Рис. 2. АЧХ входной цепи компонентов $C2-C4$, $R1-R2$

Fig. 2. Frequency response of the input circuit components of $C2-C4$, $R1-R2$

В схеме применен газовый разрядник $FV1$, назначение которого состоит в том, чтобы погасить слишком большую амплитуду сигнала (до 600 В с длительностью 1 мкс) [12–14]. При возникновении импульса перенапряжения разрядник закорачивается и импульс уходит на землю, тем самым защищая оборудование приемника. Часть энергии входного сигнала преобразуется в тепловую энергию и рассеивается на резисторах $R1-R2$; в данной схеме используются резисторы с рассеиваемой мощностью 2 Вт. Емкости $C3-C4$, включенные параллельно $R1-R2$, образуют ускорительные цепи, влияют на быстродействие схемы и одновременно с этим вносят емкостное сопротивление в контур к $R1-R2$. На 3 МГц вносимое реактивное емкостное сопротивление X_C составит 14 кОм, а на 30 МГц – 1,4 кОм.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Диод $VD1$ нужен для ограничения отрицательного напряжения. При отрицательном полупериоде диод смещен в прямом направлении и проводит ток. Отрицательная полуволна обрывается на 1,2 В (диод $VD1$ является сдвоенным) из-за прямого падения кремниевого диода. Транзисторы $VT1$, $VT3$ следует выбирать широкополосными, граничной частотой коэффициента передачи тока выше 5000 МГц и малой емкостью коллекторного перехода (менее 1 пФ). На самом деле для КВ-диапазона было бы достаточно транзисторов с граничной частотой коэф-

фициента передачи тока около 300 МГц. На практике эффективная частота работы схемы примерно в 10 раз меньше граничной частоты. Применение столь широкополосных транзисторов обусловлено тем, что данная схема была внедрена также в приемник УКВ-диапазона. Данное решение приводит к сокращению номенклатуры элементов. Реле $K1$ управляется транзистором $VT3$ NPN-типа. Когда базовое напряжение транзистора $VT3$ равно нулю, транзистор находится в зоне отсечки и действует как разомкнутый переключатель. В этой ситуации ток коллектора не протекает, и катушка реле обесточена. Параллельно $K1$ включен диод $VD2$, блокирующий обратную связь ЭДС самоиндукции [15], которая возникает при обесточивании обмотки реле, защищая транзистор $VT3$.

Рассчитаем ток коллектора $VT3$. Сопротивление катушки $R_{coil} = 150$ Ом, номинальное напряжение катушки $V_{coil} = 5$ В DC. Используя закон Ома, рассчитаем ток, необходимый для возбуждения катушки реле:

$$I_{coil} = \frac{V_{coil}}{R_{coil}} = \frac{5}{150} = 0,033 \text{ A} = 33 \text{ mA}.$$

Ток коллектора должен быть больше тока срабатывания реле; примем $I_{кVT3}$ в 1,5 раза больше, чем I_{coil} :

$$I_{кVT3} = 1,5 I_{coil} = 50 \text{ mA}.$$

Теперь рассчитаем базовый ток $VT3$, зная величину коэффициента усиления $h_{FE \min}$:

$$h_{FE \min} = \frac{I_{кVT3}}{I_{6VT3}} \rightarrow I_{6VT3} = \frac{I_{кVT3}}{h_{FE \min}} = \frac{50 \text{ мА}}{60} = 0,83 \text{ мА.}$$

Примем $I_{кVT1}$ в 1,5 раза больше, чем I_{6VT3} :

$$I_{кVT1} = 1,5I_{6VT3} = 1,25 \text{ мА.}$$

Чтобы транзистор открылся, величина $I_{кVT1}$ должна быть больше, чем

$$I_{кVT1p} = \frac{V - V_{п}}{R_{п}} = \frac{5 - 0,8}{6800} = 0,62 \text{ мА,}$$

где V – напряжение питания схемы; $V_{п}$ – напряжение падения на транзисторе; $R_{п}$ – сопротивление нагрузки.

Данное условие выполняется.

Рассчитаем базовый ток $VT1$, зная величину коэффициента усиления $h_{FE \min}$:

$$h_{FE \min} = \frac{I_{кVT1}}{I_{6VT1}} \rightarrow I_{6VT1} = \frac{I_{кVT1}}{h_{FE \min}} = \frac{1,25 \text{ мА}}{60} = 0,021 \text{ мА.}$$

Пара, образованная транзисторами $VT1$ – $VT3$ работает в автоматическом режиме. Транзистор $VT2$ необходим для работы схемы отключения нагрузки в принудительном режиме (пара $VT2$ – $VT3$). Им управляет цепь DIS_RF_IN, которая приходит с платы ЦОС. По транзистору $VT4$ контролируется уровень перегрузки по напряжению. Время срабатывания схемы защиты составляет 1,27 мс. Вносимое затухание менее 0,01 дБм. По представленной на рисунке 1 схеме были изготовлены опытные образцы входной защитной цепи. Пороговые уровни срабатывания составили 2,4...4,9 В (при 3 МГц схема включается при 4,9 В, при 30 МГц – при 2,4 В) по входу приемной части $XW1$, а затем успешно внедрены в печатную плату с блоком фильтров, электронных ключей, наличием аттенюаторов и усилителей, где уровни срабатывания составили 2,5...5,4 В по входу приемной части. Разницу уровней можно объяснить наличием большей паразитной емкости в печатной плате.

Условия и порядок проведения испытаний

ГОСТ Р 52016–2003 (ГОСТ 14663–83) описывает методику экспериментальных исследований, в частности указываются средства измерений (наименование, характеристика и норма для прибора) и подготовка к измерениям. Испы-

тания проводились в нормальных климатических условиях и при номинальных напряжениях электропитания:

- температура воздуха +15...+35 °С;
- относительная влажность воздуха 45...75 %;
- атмосферное давление $8,6 \cdot 10^4 \dots 10,6 \cdot 10^4$ Па (645...795 мм рт. ст.);
- напряжение электропитания сети переменного тока 220 В / 50 Гц.

Проверка устройства проводилась после подачи на антенный вход в течение 15 минут синусоидального ВЧ-сигнала с ЭДС 100 В, в диапазоне рабочих частот (номера диапазонов и рекомендуемые частоты для проверки схемы защиты в КВ-диапазоне приведены в таблице 1), на рабочем месте, схема которого приведена на рисунке 3.

Таблица 1. Рекомендуемые частоты для проверки схемы защиты

Table 1. The recommended frequencies for checking the protection circuit

Номер диапазона	Значение рабочих частот диапазона, кГц	Рекомендуемые частоты проверки, кГц
1	3000...4250	3700
2	3750...6250	5700
3	5750...8250	7700
4	7750...11250	9700
5	10750...16250	13700
6	15750...22250	19700
7	21750...30000	25700
8	3000...30000	16700

Согласно схеме необходимо включить питание модуля ПРМ-КВ. На ПЭВМ 1 под управлением операционной системы Windows запустить программу технологического монитора (измерителя). На ПЭВМ-2 под управлением операционной системой Astra Linux запустить программу проверки модуля ПРМ-КВ.

Далее необходимо контролировать чувствительность приемника. На генераторе SMB 100 А устанавливаем немодулированный сигнал с частотой 3701 кГц и уровнем 100 мВ. Включаем питание усилителя мощности VLC-220. Измеряя уровень сигнала генератора с помощью милливольтметра ВЗ-38Б, контролируем напряжение на выходе усилителя. Оно должно быть равно (100 ± 10) В.

Измерительные сигналы следует подавать на вход приемника через эквивалент антенны, представляющий собой безындукционный резистор, номинальное значение сопротивления которого 50 Ом, мощностью не менее 200 Вт. Выдерживаем антенный вход модуля ПРМ-КВ под

напряжением в течение 15 ± 1 мин. Отключаем генератор и усилитель мощности. Контролируем чувствительность модуля ПРМ-КВ. Приемник считают выдержавшим проверку, если после подачи на антенный вход в течение 15 мин. синусоидального ВЧ-сигнала с ЭДС 100 В в диапазоне рабочих частот сохраняется полная

работоспособность устройства. В ходе проверки работоспособности устройства выявлен недостаток схемы – значительный нагрев резисторов R1–R2 на частотах близких к 30 МГц. Данный факт не был отражен в имитационной модели схемы, построенной в среде NI Multisim (см. рис. 4).

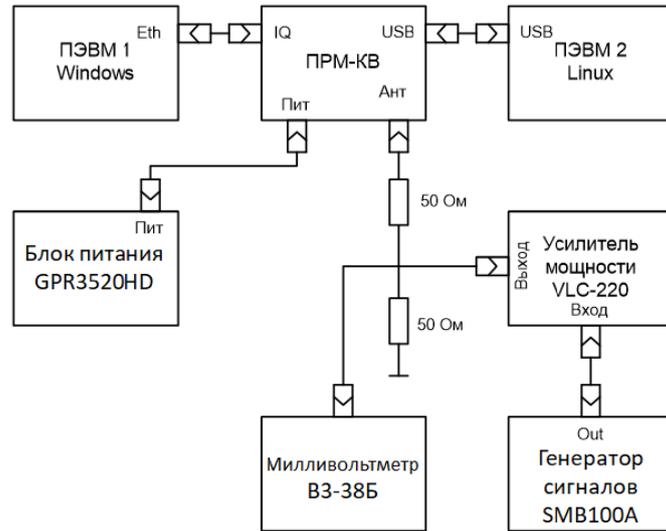


Рис. 3. Схема проверки работоспособности приемника при воздействии ВЧ-сигнала с ЭДС 100 В

Fig. 3. The scheme of checking the receiver's operability when exposed to HF signal with an EMF of 100 V

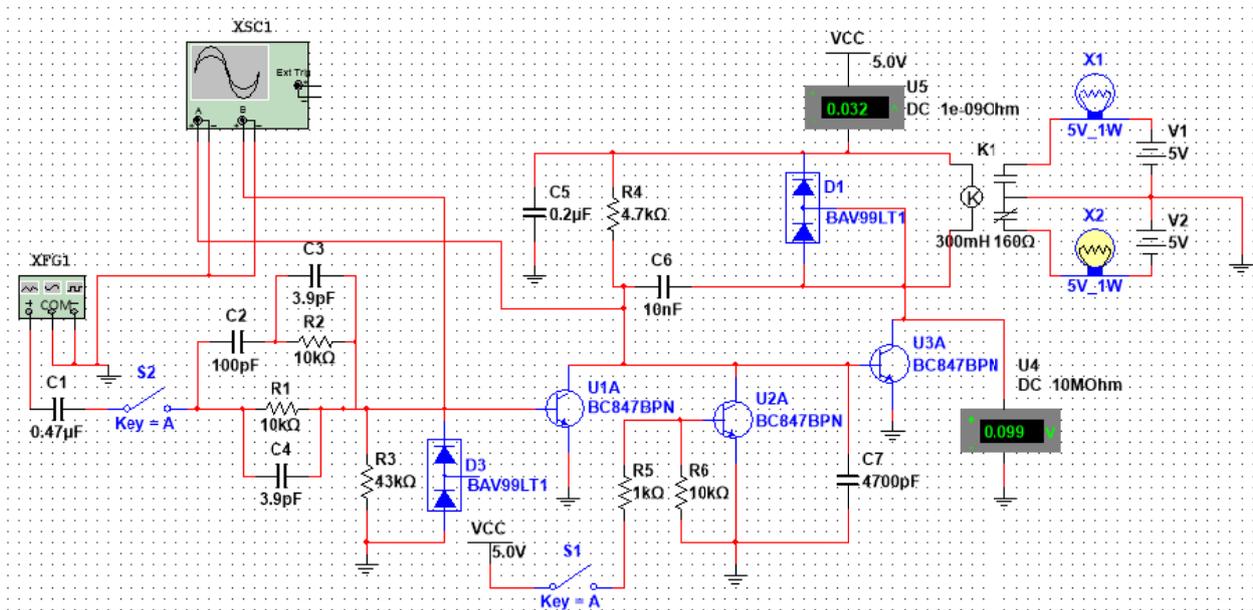


Рис. 4. Схема имитационной модели защиты приемника

Fig. 4. The scheme of the receiver protection simulation model

Результаты работоспособности входной защитной цепи представлены в таблице 2. В первом столбце указан уровень сигнала, мВ, который устанавливался на генераторе сигналов R&S SMB 100 А. В верхней строке отмечена

частота, МГц, на которой выполнялось тестирование устройства. В таблице 2 отсутствуют результаты, полученные для частот 3,7 и 5,7 МГц. Максимальный нагрев на этих частотах не превысил 45 °С. В столбцах 2–7 отмечен уровень

напряжения сигнала, В, полученный на выходе усилителя. Температура самой горячей точки на печатной плате фиксировалась с шагом 30 мВ с помощью тепловизора Fluke TiS55.

На рисунке 5 показана зависимость уровня входного сигнала от напряжения на выходе уси-

лителя VLC-220. Слева направо – частоты 25,7...7,7 МГц. Стоит отметить, что на частоте 25,7 МГц требуется более высокий уровень входного сигнала. Эта зависимость связана с нелинейной характеристикой усиления усилителя мощности [16, 17].

Таблица 2. Результаты проверки схемы защиты
Table 2. The results of checking the protection scheme

Уровень сигнала, мВ	Частота, МГц					
	7,7	9,7	13,7	16,7	19,7	25,7
	Напряжение, В / температура на печатной плате, °С					
130	63,98	62,87	59,28	57,07	55,34	54,21
140	68,51	67,52	63,76	61,44	59,63	57,46
150	73,13/40	71,98/42	68,17/51	65,92/54	63,86/59	61,02/63
160	77,46	76,54	72,59	70,28	67,98	64,44
170	81,58	80,82	76,95	73,98	72,26	68,85
180	85,81/44	84,87/47	81,26/57	78,92/63	76,45/68	72,37/76
190	89,5	88,61	84,97	82,97	80,58	75,62
200	92,6	91,84	89,54	87,42	84,73	78,54
210	95,25/47	94,5/52	93,35/65	91,59/73	88,84/77	81,11/85
220	97,38	96,96	96,85	95,7	92,81	83,34
230	99,12	98,72	98,45	97,33	95,16	85,39
240	↑100/49	↑100/54	↑100/70	↑100/79	98,14/86	87,26/92
250	–	–	–	–	–	88,92
260	–	–	–	–	–	90,86

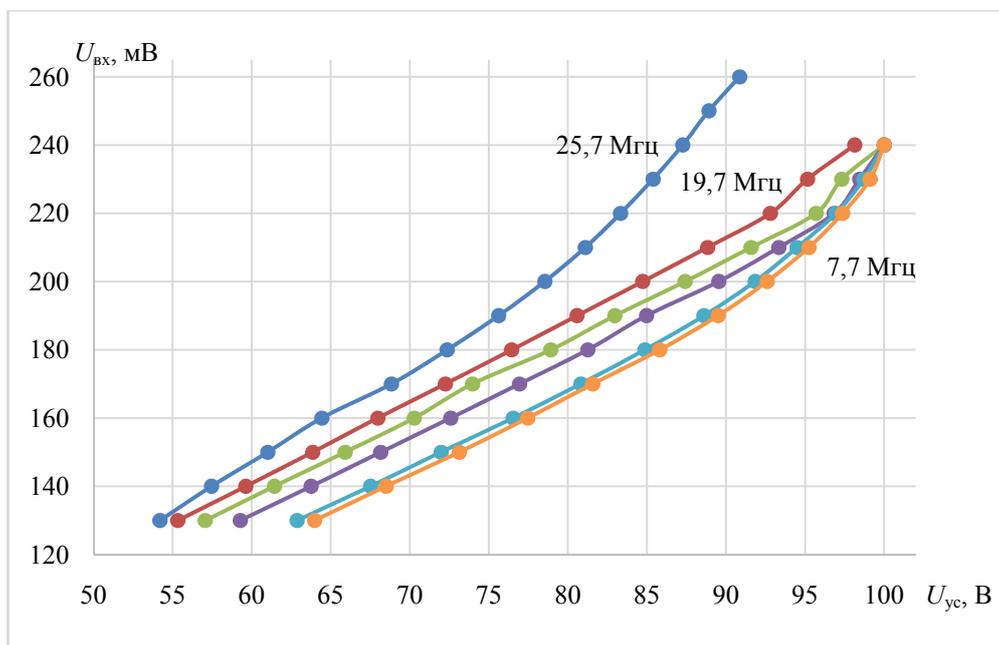


Рис. 5. Зависимость уровня входного сигнала от напряжения на выходе усилителя

Fig. 5. The dependence of the input signal level on the amplifier output voltage

На рисунке 6 показана зависимость температуры, фиксируемой на резисторах R1–R2 от напряжения на выходе усилителя. Максимальная температура составила 92 °С при частоте 25,7 МГц. Наблюдается явная зависимость температуры от частоты. Данная зависимость связана с

емкостным сопротивлением, вносимым емкостями C3–C4, и пороговыми уровнями срабатывания по входу приемной части в диапазоне 2,4...4,9 В. Так, например, при 3 МГц схема включается при уровне 4,9 В, а при 30 МГц – 2,4 В. Помимо перечисленных факторов темпе-

ратурную зависимость от частоты можно снизить путем доработки входного детектора – нужно обеспечить большее затухание, вносимое фильтром на частотах 23...30 МГц.

После воздействия ВЧ-сигнала с ЭДС 100 В на вход приемника далее следует выполнить

процедуру проверки чувствительности модуля ПРМ-КВ [18, 19]. Процедура проверки используется для того, чтобы подтвердить работоспособность устройства. Схема проверки чувствительности приемника представлена на рисунке 7.

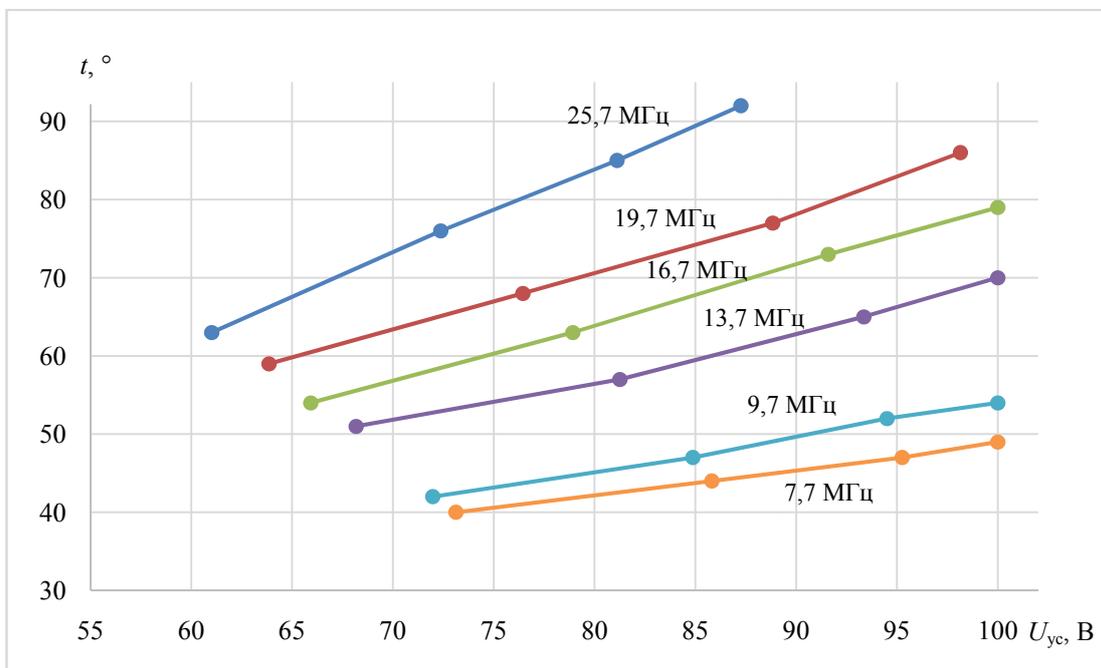


Рис. 6. Зависимость температуры от напряжения на выходе усилителя

Fig. 6. The dependence of the temperature on amplifier output voltage

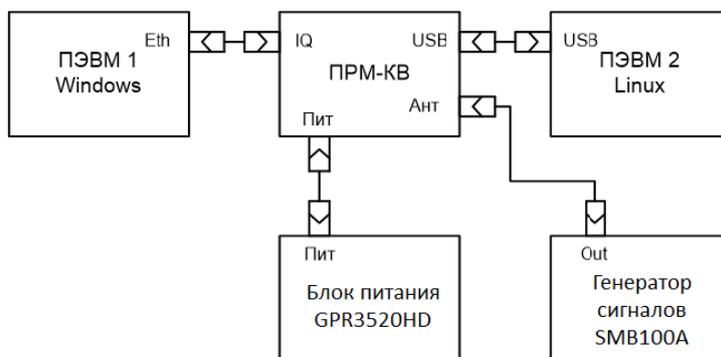


Рис. 7. Схема проверки чувствительности приемника после воздействия ВЧ-сигнала с ЭДС 100 В

Fig. 7. The scheme of checking the sensitivity of the receiver after exposure HF signal with an EMF of 100 V

Согласно схеме необходимо на ПЭВМ 1 запустить программу технологического монитора (измерителя). Данная программа выводит осциллограмму и спектр сигнала, в ней также осуществляется подсчет отношения сигнал/шум плюс искажение (SINAD). На ПЭВМ 2 запустить программу проверки модуля ПРМ-КВ. С помощью данной программы осуществляется установка следующих параметров: рабочей частоты, шага измерения рабочей частоты, частоты

дискретизации, выбора фильтра приемника, затухания на аттенюаторах.

На генераторе SMB 100 А устанавливаем значение частоты 3701 кГц с уровнем (50 ± 5) мкВ. На блоке питания включаем тумблер «Питание». Уменьшаем уровень выходного сигнала на генераторе SMB 100 А до значения, при котором показания значения SINAD в программе технологического монитора не достигнет значения 12 дБ (25 % КНИ). Полученное значение

уровня выходного сигнала на генераторе SMB 100 А должно быть не более 0,5 мкВ. Проверку чувствительности ПРМ-КВ проводят на рекомендуемых частотах (см. табл. 1). ПРМ-КВ считают выдержавшим проверку, если в результате измерений обеспечивается чувствительность 0,5 мкВ при 25 % КНИ [20, 21].

Выводы

Построена относительно простая и компактная схема, обладающая достаточным быстродействием, высокой повторяемостью без дополнительной настройки и при этом обеспечивающая надежную защиту чувствительных узлов и элементов приемника от перегрузки и выхода из строя.

Важной особенностью предложенной схемы является то, что после проведения доработки контура входного детектора разработанную схему можно применять на частотах УКВ-диапазона вплоть до 520 МГц. Доработка схемы заключается в увеличении частотного диапазона рабочих частот. К достоинствам схемы следует также отнести малое время срабатывания – 1,27 мс – и вносимое затухание – менее 0,01 дБм. Значения данных параметров были получены экспериментальным путем.

Проведены практические испытания опытных образцов, а также реальных изделий в составе приемника КВ-диапазона, в ходе которых были выявлены недостатки, не отраженные в имитационной модели, построенной в среде NI Multisim. В частности, это локальный нагрев на печатной плате. Максимальный нагрев на печатной плате составил 92 градуса при частоте 25,7 МГц. Наблюдается явная частотная зависимость от температуры. Данное явление вызвано емкостным сопротивлением и слабым затуханием фильтра детектора, вносимым в диапазоне 23...30 МГц. Намечены пути доработки действующей схемы.

По результатам испытаний установлено, что изделие сохраняет свою работоспособность после подачи на антенный вход синусоидального ВЧ-сигнала в течение 15 минут с ЭДС 100 В в диапазоне рабочих частот.

Библиографические ссылки

1. Перунов Ю. М., Куприянов А. И. Методы и средства радиоэлектронной борьбы : монография. Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 376 с. ISBN 978-5-9729-0591-1
2. Дмитриев В. Г. Радиоэлектронная борьба: функциональное поражение радиоэлектронных средств : монография. Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. 268 с. ISBN 978-5-9729-0700-7

3. Андреев Г. И., Авдеев Э. В., Глушков И. Н. Радиоэлектронная борьба. Тезаурус : справочник. М. : Радиотехника, 2023. 462 с. ISBN 978-5-93108-197-7

4. Баранчугов С. Е., Щербинин В. В. Проектирование полосно-заграждающего фильтра КВ-диапазона // Труды молодых ученых Алтайского государственного университета. 2021. № 18, С. 151–154.

5. Гольденберг В. Л., Луговенко Д. В., Репинский В. Н. Синтез и реализация полиномиального заграждающего фильтра по ВЧ-прототипу // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2023. Т. 14, № 4. С. 4–10.

6. Черепанов В. П., Посысаев Е. И. Защита радиоэлектронной аппаратуры от электрических перегрузок : справочник. М.: РадиоСофт, 2010. 216 с. ISBN 978-5-93037-216-8

7. Черепанов В. П., Хрулев А. К., Блудов И. П. Электронные приборы для защиты РЭА от электрических перегрузок : справочник. М.: Радио и связь, 1994. 224 с. ISBN 5-256-00943-5

8. Посный О. А., Долгушев С. В., Посная Е. А. Входная защитная цепь радиочастотного тракта приемника с заданным уровнем ограничения // Ural Radio Engineering Journal. 2019. № 3. С. 243–250. DOI: 10.15826/urej.2019.3.3.002

9. Вайсблат А. В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах. М.: Радио и связь, 1987. 120 с.

10. Шихов С. Устройства защиты приемника: теоретические основы // Компоненты и технологии. 2022. № 11/12. С. 60–67.

11. Васин А. В., Доминюк Я. В., Левитан Б. А. Защита радиоэлектронного оборудования от микросекундных импульсных перенапряжений // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 4. С. 45–58. DOI: 10.18127/j00338486-202104-06

12. Рентюк В. IsoMOV – инновационные компоненты компании BOURNS для защиты цепей // Компоненты и технологии. 2021. № 9. С. 50–55.

13. Сомин А. А., Доминюк Я. В., Левитан Б. А. Защита радиоэлектронного оборудования от импульсов пускового тока при первичной подаче питающего напряжения // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 10. С. 67–80. DOI: 10.18127/j00338486-202110-07

14. Gregis G., Piegari L., Raciti L., Masper T. (2024) A review of voltage-clamping methods for solid-state circuit breakers. IEEE Open Journal of Power Electronics, vol. 5, p. 873-890. DOI: 10.1109/OJPEL.2024.3411110

15. Смиренин Б. А. Справочник по радиотехнике. Москва-Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1950. 785 с.

16. Транзисторный усилитель мощности СВЧ / А. Н. Зикий, А. Д. Давтян, А. Д. Падалко, В. Н. Ронис, И. И. Шутов // Инженерный вестник Дона. 2019. № 6 (57). С. 61.

17. Оценка чувствительности приема сигналов, используемых в технологии LoRa / С. В. Дворников, А. Р. Бестугин, С. С. Дворников, И. А. Киршина // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 8. С. 18–25. DOI: 10.18127/j00338486-202408-02

18. Сальный И. А. Методы реализации цифровой части приемника с частотным дискриминатором // Радиотехника. 2022. Т. 86, № 11. С. 74–79. DOI: 10.18127/j00338486-202211-11

19. Бахтиярова Е. А., Каргулова А. Н. Оценка отношения сигнал/шум дискретизации и восстановления речи // Актуальные научные исследования в современном мире. 2020. № 11-1 (67). С. 83–87.

20. Алгоритм управления режимами работы системы когнитивного радио / Г. А. Благодатский, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков, И. С. Батурин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 4. С. 93-106. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-93-106. EDN MWOIOP.

21. Методы синтеза составных частотно-временных сигналов / М. Л. Никитин, А. Н. Копысов, В. В. Хворенков [и др.] // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2015. Т. 18, № 3 (67). С. 93-97. EDN UHHHAX.

References

1. Perunov U.M., Kupriyanov A.I. (2021) *Metody i sredstva radioelektronnoj bor'by* [Methods and means of electronic warfare]. Vologda: Infra-Inzheneriya Publishing, 376 p. (in Russ.).

2. Dmitriev V.G. (2021) *Radioelektronnaja bor'ba: funkcional'noe porazhenie radioelektronnyh sredstv* [Electronic warfare: functional destruction of radio-electronic means]. Vologda: Infra-Inzheneriya Publishing, 268 p. (in Russ.).

3. Andreev G.I., Avdeev Je.V., Glushkov I.N. (2023) *Radioelektronnaja bor'ba. Tezaurus* [Electronic warfare. Thesaurus]. Moscow: Radiotekhnika Publishing, 462 p. (in Russ.).

4. Baranchugov S.E., Shherbinin V.V. (2021) [Designing a band-pass filter of the HF band]. *Trudy molodyh uchenyh Altajskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 18, pp. 151-154 (in Russ.).

5. Gol'denberg V.L., Lugovenko D.V., Repinskij V.N. (2023) [Synthesis and implementation of a polynomial rejection filter using an RF prototype]. *Sistemy sinhronizacii, formirovaniya i obrabotki signalov*, vol. 14, no. 4, pp. 4-10 (in Russ.).

6. Cherepanov V.P., Posysaev E.I. (2010) *Zashhita radioelektronnoj apparatury o tjelektricheskikh peregruzok* [The protection of electronic equipment from electrical overloads]. Moscow: RadioSoft Publishing, 216 p. (in Russ.).

7. Cherepanov V.P., Khrulev A.K., Bludov I.P. (1994) *Jelektronnye pribory dlja zashhity RJeA ot jelektricheskikh peregruzok* [The electronic devices for protecting electronic equipment from electrical overloads]. Moscow: Radio i Svjaz' Publishing, 224 p. (in Russ.).

8. Posnyi O.A., Dolgushev S.V., Posnaya E.A. (2019) [The input protective circuit of the radio frequency path of the receiver with fixed restriction level]. *Ural*

Radio Engineering Journal, vol. 3, no. 3, pp. 243-250 (in Russ.). DOI: 10.15826/urej.2019.3.3.002

9. Vaisblat A.V. (1987) *Kommutacionnye ustrojstva SVCh na poluprovodnikovyh diodah* [Microwave switching devices based on semiconductor diodes]. Moscow: Radio i Svjaz' Publishing, 120 p. (in Russ.).

10. Shikhov S. (2022) [The receiver protection devices: theoretical foundations]. *Komponety i tehnologii*, no. 11/12, pp. 42-49 (in Russ.).

11. Vasin A.V., Dominjuk Ja.V., Levitan B.A. (2021) [Radio-frequency hardware protection against microsecond-pulse overvoltage]. *Radiotekhnika*, vol. 85, no. 4, pp. 45-58 (in Russ.). DOI: 10.18127/j00338486-202104-06

12. Rentjuk V. (2021) [IsoMOV - innovative components from BOURNS for circuit protection]. *Komponety i tehnologii*, no. 9, pp. 50-55 (in Russ.).

13. Somin A.A., Dominjuk Ja.V., Levitan B.A. (2021) [Radio-frequency hardware protection against inrush current at initial voltage supply]. *Radiotekhnika*, vol. 85, no. 10, pp. 67-80 (in Russ.). DOI: 10.18127/j00338486-202110-07

14. Gregis G., Piegari L., Raciti L., Masper T. [A review of voltage-clamping methods for solid-state circuit breakers]. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2024, vol. 5, pp. 873-890. DOI: 10.1109/OJPEL.2024.3411110

15. Smirenin B.A. (1950) *Spravochnik po radiotekhnike* [Handbook of Radio Engineering]. Moscow-Leningrad: State Energy Publishing House, 785 p. (in Russ.).

16. Zikij A.N., Davtjan A.D., Padalko A.D., Ronis V.N., Shutov I.I. (2019) [Microwave power transistor amplifier]. *Inzhenernyj vestnik Dona*, no. 6, pp. 1-6 (in Russ.).

17. Dvornikov S.V., Bestugin A.R., Dvornikov S.S., Kirshina I.A. (2024) [Evaluation of the sensitivity of receiving signals used in LoRa technology]. *Radiotekhnika*, vol. 88, no. 8, pp. 18-25 (in Russ.). DOI: 10.18127/j00338486-202408-02

18. Salnyy I.A. (2022) [Methods of implementing the digital part of the receiver with a frequency discriminator]. *Radiotekhnika*, vol. 86, no. 11, pp. 74-79 (in Russ.). DOI: 10.18127/j00338486-202211-11

19. Bahtijarova E.A., Kargulova A.N. (2020) [Estimation of the signal-to-noise ratio of sampling and speech recovery]. *Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*, no. 11-1, pp. 83-87 (in Russ.).

20. Blagodatsky G.A., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V., Baturin I.S. (2019) [Algorithm for controlling the operating modes of a cognitive radio system]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 22, no. 4, pp. 93-96 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-4-93-106. EDN MWOIOP.

21. Nikitin M.L., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V. [et al.] (2015) [Methods of Synthesis of Composite Time-Frequency Signals]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 18, no. 3, pp. 93-97 (in Russ.). EDN UHHHAX.

The Development of an Input Protective Circuit of the Radio Frequency (RF) Path of the High Frequency (HF) Band Receiver

A.S. Kolotov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A.N. Kopysov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

V.V. Khvorenkov, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The article presents the results of the input protection circuit development, the main purpose of which is to limit the signals of high-power entering the HF receiver RF path on the antenna input. The input protection circuit protects the sensitive components and elements of the receiver from overload and failure. The need to ensure the reliability and safety of complex communication systems and complexes is only increasing every year. The relevance of input circuit-protection may occur at small separation of the receiver and the source of interference, under the conditions of electronic warfare. The principle of the developed circuit is based on the relay switch control. The method for selecting the parameters of circuit components is described. The practical prototype tests of the input protection circuit were carried out, being installed at the input of the manufactured HF band receiver. During the practical experiment, shortcomings were identified that were not revealed in the simulation model built in the NI Multisim environment. In particular, it is a local heating of the two components on the printed circuit board, caused primarily by capacitive resistance and weak filter attenuation introduced within the range of 23...30 MHz. The ways to improve the existing protection circuit are noted. An important feature of the circuit is that after minor modification of the input detector contour, the developed circuit can be used at VHF frequencies, up to 520 MHz. The advantages of the scheme should also include a short response time - 1.27 ms, insertion attenuation - less than 0.01 dBm. The product remains operational after applying a sinusoidal RF signal on the antenna input for 15 minutes with an EMF of 100V in the operating frequency range.

Keywords: HF receiver, protection circuit, sinusoidal HF signal, radio frequency path, EW system.

Получено 06.11.2024

Образец цитирования

Колотов А. С., Копысов А. Н., Хворенков В. В. Разработка входной защитной цепи радиочастотного тракта приемника КВ-диапазона // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 120–129. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-109-118

For Citation

Kolotov A.S., Kopysov A.N., Khvorenkov V.V. (2024) [The Development of an Input Protective Circuit of the Radio Frequency (RF) Path of the High Frequency (HF) Band Receiver]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 120-129 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-120-129