**КОМПЛЕКТ ЗАГРАДИТЕЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ
УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ,
НАВОДИМЫХ В ПРИЁМНОЙ АНТЕННЕ
КВ-ДИАПАЗОНА БЛИЗКОРАСПОЛОЖЕННЫМ ПЕРЕДАТЧИКОМ**

В.В. Щербинин^{1,2}, И.А. Шмаков¹, П.Н. Уланов¹

¹*Алтайский государственный университет, Барнаул, Российская Федерация*

²*Институт физики им. Л.В. Киренского КНЦ СО РАН, Красноярск, Российская Федерация*

Описывается подход к созданию комплекта полосно-заграждающих фильтров, обеспечивающих возможность селективной защиты входа радиоприёмного устройства от узкополосной помехи высокой интенсивности. Приводится структурная схема устройства защиты, описывается общий подход к проектированию комплекта фильтров. Обосновывается использование в качестве фильтров комплекта традиционных пассивных LC-фильтров. Формулируются требования к элементной базе фильтров. Дается краткое описание серии катушек индуктивности, разработанных авторами для использования в комплекте фильтров. Приводится описание комплекта фильтров, реализованного с использованием предлагаемого подхода.

Ключевые слова: защита от помех, LC-фильтры, фильтры Чебышева.

**PROTECTIVE FILTERS SET FOR SUPPRESSING HIGH-INTENSITY
NARROWBAND INTERFERENCES IN THE RECEIVING ANTENNA
OF THE HF BAND BY CLOSE-LOCATED TRANSMITTER**

V.V. Scherbinin^{1,2}, I.A. Shmakov¹, P.N. Ulanov¹

¹*Altai State University, Barnaul, Russian Federation*

²*Kirensky Institute of Physics KSC SB RAS, Krasnoyarsk, Russian Federation*

This paper describes an approach to creating a set of band-stop filters that provide the ability to selectively protect the input of a radio receiver from high-intensity narrow-band interference. The block diagram of the protection device is given, a general approach to designing a set of filters is described. The use of traditional passive LC filters as a set of filters for protection device is substantiated. The requirements for the capacitors and inductors are formulated. A brief description is given for a series of inductors developed by the authors for use in a filter kit. A description is given for a set of filters implemented using the proposed approach.

Keywords: interference protection, LC filters, Chebyshev filters.

Особенностью современных систем связи является их широкополосность. Расширение частотной полосы системы связи обеспечивает массу преимуществ: от увеличения пропускной способности до возможности действия в условиях постановки активных помех. Современные коротковолновые приёмники, как правило, являются широкополосными – способны принимать сигналы во всём КВ-диапазоне, – и реализуются в виде программно-определяемых систем (также именуемых SDR-приёмниками, далее – ПОС), которые непосредственно оцифровывают в реальном времени токи в фидерной линии, принимаемые антенной, а выделение полезного сигнала осуществляется путём цифровой обработки полученного массива данных [1]. Преимуществами ПОС, определяющими их широкое распространение, являются: сравнительно простая конструкция ВЧ-тракта; возможность применения для обработки сигнала сравнительно недорогих крупносерийных высокопроизводительных вычислительных устройств; относительная простота внесения изменений в порядок работы устройства – замены прошивки без необходимости изменения аппаратной части.

Наиболее ответственной частью ПОС, во многом определяющим его характеристики, является аналогово-цифровой преобразователь. Современные АЦП, применяемые в ПОС, имеют весьма высокие характеристики быстродействия, однако доступные в настоящее время на рынке комплектующие не позволяют осуществлять преобразование сигналов, амплитуда которых составляет десятки и сотни вольт. К тому же комплектующие с наиболее широкими возможностями зачастую подпадают под различные виды экспортных ограничений.

В практике связи, например, во время совместного плавания кораблей, возможны ситуации, когда одна станция, оснащённая широкополосным высокочувствительным приёмником, прослушивает эфир, в то время как другой станции, оснащённой мощным передатчиком, необходимо осуществить передачу. В этом случае мощный сигнал работающего передатчика второй станции способен перегрузить АЦП приёмника первой станции и на некоторое время (как минимум на весь сеанс передачи) исключить возможность приёма каких-либо сигналов. В худшем случае возможен выход радиоприёмного устройства из строя.

Наиболее простым решением вышеописанной проблемы является включение в тракт РПУ перед приёмником подключаемого аттенюатора. В случае возникновения мощной помехи аттенюатор включается в тракт и обеспечивает защиту входа АЦП от перегрузок. Недостатком подобного решения является существенное снижение чувствительности станции и, соответственно, уменьшение дальности приёма во всей частотной полосе работы станции. В этой связи представляет интерес создание устройства селективной защиты (далее – УСЗ) входа РПУ, которое обеспечивало бы защиту входа АЦП от узкополосной помехи при сохранении исходной дальности связи вне частотного диапазона, в котором присутствует помеха. Возможная структурная схема реализации такого устройства представлена на рис. 1.

Рис. 1. Структурная схема устройства селективной защиты

Сигнал со входа устройства через аттенюатор поступает на вход устройства управления А, которое анализирует эфир и при наличии помехи в каком-либо диапазоне включает в тракт прохождения сигнала один или несколько заградительных (режекторных) фильтров $Z_1, \dots, Z_n$. Если действие помехи прекращается, фильтры отключаются. Неактивные фильтры, исключенные из тракта прохождения сигнала, обоими выходами шунтируются на согласованные нагрузки – резисторы, имеющие сопротивление, равное волновому сопротивлению линий передачи, что позволяет избежать их возбуждения и резонансного взаимодействия с фильтрами, включенными в тракт прохождения сигнала.

Комплект заградительных фильтров, входящий в УСЗ, должен отвечать ряду требований. Основным требованием является обеспечение заданного уровня подавления сигналов во всём частотном диапазоне: полосы подавления фильтров должны пересекаться друг с

другом, чтобы исключить наличие полос частот, в которых уровень подавления недостаточен. Также на фильтры накладываются требования по максимальному напряжению подавляемой помехи. Поскольку мощные передатчики могут наводить на близкорасположенной антенне достаточно высокое напряжение, это требование существенно влияет на схемотехнику фильтров и выбор комплектующих. В любом случае фильтры не могут быть цифровыми, поскольку при наличии АЦП, позволяющего оцифровать сигнал с помехой, в отдельном УСЗ нет необходимости.

При разработке комплекта фильтров желательно обеспечить достаточно малую ширину полосы, в которой каждый из фильтров вносит существенное ослабление в сигнал. Это требование несколько противоречивое: с одной стороны, чем уже полоса пропускания заградительных фильтров, тем уже диапазоны частот, которые будут исключены из полосы приёма устройством защиты. С другой стороны, малая ширина полосы увеличивает количество фильтров, входящих в комплект, что увеличивает габариты и стоимость УСЗ, так что необходимо искать компромисс между массогабаритными характеристиками изделия и его возможностями по фильтрации помех.

Применение активных фильтров в составе УСЗ нежелательно. Во-первых, активные фильтры вносят в сигнал дополнительные шумы. Во-вторых, в полосе пропускания активных заградительных фильтров присутствуют заметные потери. В-третьих, активные фильтры, работающие с сигналами высокого напряжения, потребуют обеспечения соответствующего питания и организации теплоотвода. Таким образом, для УСЗ, предназначенного для эксплуатации в КВ-диапазоне, наиболее целесообразно применение пассивных LC-фильтров на сосредоточенных элементах.

Методы расчёта таких фильтров давно и хорошо известны [2]; возможность расчёта пассивных LC-фильтров встроена во многие программные комплексы, предназначенные для проектирования электрических цепей; для некоторых топологий фильтров существуют онлайн-сервисы, позволяющие выполнить их синтез. Однако при проектировании фильтров для УСЗ имеется проблема, затрудняющая их моделирование.

Дело в том, что для цифровых фильтров, которые обычно применяются в ПОС, сложность программной реализации фильтров мало зависит от их порядка: в большей степени порядок фильтра ограничивается быстродействием применяемой вычислительной системы. В силу того, что аппаратные возможности современных вычислительных систем весьма высоки, не существует объективных препятствий для использования в цифровой обработке сигналов КВ-диапазона фильтров 7, 9 и даже более высоких порядков. Заказчики систем КВ-связи привыкли к высокой крутизне характеристик цифровых фильтров и склонны требовать столь же высоких характеристик от пассивных LC-фильтров.

В LC-фильтрах любой топологии повышение порядка сопряжено с усложнением электрической цепи, т.е. появлением в ней новых контуров, что приводит к искажению характеристики, поскольку, во-первых, имеются допуски на характеристики использованных радиоэлектронных компонентов; во-вторых, характеристики меняются при изменении внешних условий; в-третьих, при ограниченных габаритах возрастает плотность монтажа и, следовательно, взаимное влияние настроенных на одну резонансную частоту контуров. Также возможно нарушение согласования между контурами фильтра. Зачастую оказывается, что вследствие невозможности точной настройки и неидеальности характеристик сосредоточенных элементов крутизна характеристики фильтра более высокого порядка оказывается меньше, чем у фильтра более низкого порядка. Фильтры высоких порядков требуют особенно точного соблюдения вычисленных величин индуктивностей и емкостей.

Таким образом, в фильтрах высоких порядков желательно применять высокодобротные и прецизионные конденсаторы и катушки индуктивности.

Перед авторами была поставлена задача разработать комплект заградительных фильтров, способных перекрыть весь КВ-диапазон, при этом требовалось обеспечить подавление помехи по уровню -40 дБ и ширину полосы пропускания по уровню -3 дБ не более

3 МГц. Также были выдвинуты достаточно высокие требования по напряжению в линии и ряд эксплуатационных требований.

Наибольшей крутизной характеристики обладают эллиптические фильтры, однако для этих фильтров характерно различие резонансных частот контуров, что удобно при настройке, однако все контуры являются различными, что усложняет подбор комплектующих. Несколько меньшей крутизной характеристики обладают фильтры Чебышёва первого рода. Достоинством заградительных фильтров Чебышёва является симметрия цепи, позволяющая уменьшить номенклатуру деталей, что немаловажно при производстве. Эта топология была использована при разработке.

Моделирование, выполненное с помощью программы FilterCAD 3.0, показало, что при применении заграждающих фильтров Чебышёва первого рода третьего порядка одновременно выполнить требования по уровню подавления и полосе пропускания невозможно. Чётные порядки не рассматривались, поскольку фильтры были выполнены электрически симметричными. Таким образом, порядок фильтров требовался не ниже пятого. Схема заградительного фильтра Чебышёва I рода пятого порядка представлена на рис. 2.

Рис. 2. Принципиальная схема фильтра Чебышёва I рода 5-го порядка

Для удобства монтажа и обеспечения стабильных значений паразитной индуктивности, при изготовлении фильтров были использованы SMD-конденсаторы.

Номинальное рабочее напряжение конденсаторов, применяемых в схеме фильтра, должно превышать скачки напряжения, которые могут возникнуть в цепи при переходных процессах (включение фильтра в тракт, отключение фильтра от тракта). Кроме того, для обеспечения длительного срока эксплуатации фильтров требуется, чтобы номинальное рабочее напряжение для конденсаторов превышало фактическое напряжение, по крайней мере, на 50 %. Это требование ограничило выбор конденсаторов сериями, номинальное рабочее напряжение которых составляет 500 В и исключило возможность применения подстроечных конденсаторов, поскольку доступные на рынке подстроечные конденсаторы не соответствуют требованиям к номинальному рабочему напряжению. Таким образом, для регулировки резонансной частоты контуров при настройке фильтров могут быть использованы только катушки индуктивности. Ограниченный выбор конденсаторов ограничивает и их максимальную добротность. Конечно, существуют серии конденсаторов, сочетающие высокое рабочее напряжение с высокой добротностью, например, Murata GQM, однако в высоковольтной линейке присутствует ограниченный набор номиналов, не позволяющий обеспечить все необходимые значения емкости.

Поскольку, как уже было сказано выше, подстройка значений емкости оказалась невозможной, а для обеспечения расчётных характеристик требуется точно выдерживать значение емкости, конденсаторы подбирались по фактическому (измеренному) значению ёмкости. Вследствие того, что емкость применённых конденсаторов, по данным производителя, в полосе частот КВ-диапазона мало меняется (прирост частоты менее половины допуска на номинальное значение емкости), измерения фактической емкости проводились на частоте 200 кГц, которую обеспечивал доступный RLC-метр.

Поскольку в настоящее время активно развиваются методы цифровой обработки сигналов, катушки индуктивности имеют ограниченное применение. Можно сказать, что они

практически отсутствуют на рынке, исключая дроссели для подавления высокочастотных помех, применяемые в цепях питания. Доступные на рынке катушки индуктивности имеют неудовлетворительную добротность. Катушки для фильтров, предназначенных для использования в составе УСЗ, должны иметь возможность подстройки индуктивности и сохранять работоспособность при высоких токах (при нештатных режимах работы фильтра через него может протекать переменный ток амплитудой до 3А).

Была разработана линейка катушек индуктивности, обмотка которых сформирована из провода ПЭТВ-2 диаметром 1 мм. Диаметр провода был выбран из соображений сохранения умеренной температуры катушки при протекании переменного тока 3А с частотой 30МГц. Катушки, индуктивность которых превышает 150 нГн, имеют каркас, изготовленный из акрилбутадиенстирола методом 3D-печати. По оси катушки имеется резьбовой канал. Катушка крепится к печатной плате фильтра капроновым винтом с фиксацией резьбы жидким стопором резьбы, что позволяет обеспечить вибростойкость изделия. Также канал каркаса катушки используется для размещения в нём сердечника из карбонильного железа марки Р-100Ф2 или из латуни, с помощью которых обеспечивается регулировка индуктивности катушки (увеличение или уменьшение индуктивности соответственно) и, следовательно, подстройка резонансной частоты колебательного контура. Отсутствие влияния вибрации на индуктивность настроенной катушки обеспечивается фиксацией сердечников анаэробным герметиком резьбовых соединений либо термопластичным клеем. Габаритные ограничения, предъявленные заказчиком, потребовали выполнить катушки с индуктивностью, превышающей 1000 нГн, двухслойными, что при прочих равных снижает добротность. Также известно [3], что в КВ-диапазоне наивыгоднейшим диаметром провода для намотки катушек индуктивности является диаметр около 0.2 мм, что существенно меньше выбранного авторами значения. Применение более толстого провода тоже несколько снижает добротность катушек и затрудняет обеспечение требуемой характеристики. Наиболее существенно от снижения добротности катушек страдает ширина полосы пропускания.

Поскольку техническая возможность выполнить измерение индуктивности катушек в рабочем диапазоне фильтров отсутствовала, и, следовательно, не было возможности провести полное моделирование всего комплекта фильтров, фильтры проектировались последовательно, снизу вверх по частоте. Модельная характеристика каждого последующего фильтра рассчитывалась таким образом, чтобы по целевому уровню подавления она несколько перекрывалась (на 6–10 кГц, поскольку полоса узкополосного сигнала обычно составляет около 3 кГц, т.е. на 2–3 полосы) с фактической характеристикой предыдущего фильтра. При этом в качестве оценки добротности катушек индуктивности намеренно использовалось заведомо заниженное значение, что обеспечивало запас по ширине полосы при регулировке.

После разработки первых трёх фильтров была выполнена оценка возможности перекрытия всего целевого диапазона заданным количеством фильтров, для чего была построена зависимость ширины достигнутой полосы подавления от центральной частоты фильтра. Зависимость была построена путём полиномиальной аппроксимации результатов полиномом второй степени, а затем экстраполирована на весь целевой частотный диапазон. По результатам моделирования был сделан вывод, что обеспечить перекрытие диапазона заданным количеством фильтров пятого порядка невозможно. Для решения проблемы первые несколько фильтров были перепроектированы и реализованы как фильтры седьмого порядка. При этом удалось для всех фильтров использовать общую печатную плату, рассчитанную на седьмой порядок: колебательные контуры, которые не используются в фильтрах пятого порядка, замыкались перемычками.

Фактически реализованный с применением описанного подхода комплект обеспечивает перекрытие целевого диапазона 3–27 МГц 22 фильтрами (из них 4 фильтра имеют седьмой порядок, а остальные – пятый) с гарантированной шириной полосы пропускания по уровню –3 дБ менее 3 МГц и гарантированными ширинами полос подавления (по уровню –40 дБ), уменьшающимися от 1,73 МГц у нижней границы диапазона до 725 кГц у верхней.

Конструктивно фильтры выполнены в виде печатных плат с расположенными на них контуром фильтра, реле включения фильтра и электроникой, управляющей включением реле. Плата расположена в алюминиевом корпусе (Gainta G113MF). Крышка корпуса располагается в непосредственной близости от катушек индуктивности и безусловно влияет на их характеристики. Для настройки катушек с учётом влияния корпуса на их индуктивность, фильтры настраиваются в отдельном корпусе с отверстиями для вращения сердечников в катушках. Отверстия имеют размеры, существенно меньшие длины волны сигнала, поэтому не влияют на качество экранирования полей крышкой. Крышка корпуса крепится к основе четырьмя винтами через мягкую пористую прокладку, причем электрический контакт крышки и корпуса обеспечивается только за счет винтов, так что качество затяжки влияет на электрическую цельность корпуса.

Настройка фильтра выполняется в три этапа: первый – предварительная настройка отдельных контуров на резонансные частоты; второй – настройка фильтра целиком в собственном корпусе с собственными разъемами и настроенной крышкой, но без реле; третий – финальная подстройка при необходимости, фиксация сердечников, тестирование работы с реле, затяжка и фиксация винтов, крепящих крышку на анаэробный герметик резьбы.

Разработанный подход обеспечивает воспроизводимость изделий: было изготовлено несколько серийных комплектов, фильтры которых обладают взаимозаменяемостью. Данная технология не подходит для массового производства, поскольку содержит трудоёмкие операции по подбору емкостей и настройке фильтров, однако с учётом предполагаемой области применения данный недостаток нельзя признать существенным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слюсар В.* Военная связь стран НАТО: проблемы современных технологий // *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2008. №. 4. С. 66–71.
2. *Zverev A.I.* Handbook of filter synthesis. Wiley, 1967.
3. *Волгов В.А.* Детали контуров радиоаппаратуры. Расчет и конструкция / под ред. В.И. Сидорова. М.; Л.: Госуд. энергет. изд-во, 1954.