

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЛОШУМЯЩЕГО  
УСИЛИТЕЛЯ ПРЕСЕЛЕКТОРА СИГНАЛОВ  
СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
ДЛЯ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ  
С УЧЕТОМ ЗАЩИТЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ  
ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ  
ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ**

А. С. Свиридов, И. Ю. Лисицын, А. А. Колганов

В эпоху цифровых электронных систем в современной авиации неуклонно растет количество бортового оборудования отличающегося высокой чувствительностью к воздействию электромагнитных полей различной природы и интенсивности. Кроме того, эти бортовые системы предъявляют высокие требования к качеству электропитания, что делает бортовые системы питания более сложными и восприимчивыми к воздействию электромагнитных полей.

Проектирование малошумящего усилителя преселектора сигнала спутниковых навигационных систем с учетом защиты системы электропитания от воздействия электромагнитных полей высокой интенсивности является сложной и трудоемкой задачей. Использование матриц рассеяния, состоящих из набора  $S$ -параметров, совместно с программами автоматизации разработки электронных устройств, высокочастотного моделирования и оптимизации, и их интеграция с измерительными приборами, позволяют решать сложные задачи по проверке моделей устройств и создавать конечные решения, гарантирующие успешную разработку изделия с первой итерации.

Система питания (рис. 1) одна из самых сложных систем на борту, она состоит из: источников электрической энергии, системы передачи и распределения электрической энергии, преобразователей электрической энергии. Наиболее интересными в рамках данной статьи для нас являются преобразователи электрической энергии, установленные в конечных потребителях, и преобразующие параметры питающего напряжения под необходимые параметры [1].



Рис. 1. Структурная схема бортовой системы питания

Из всего многообразия внешних воздействующих факторов электромагнитной природы можно выделить некоторые, наиболее воздействующие на преобразователи электрической энергии: внутрисистемная и межсистемная электромагнитная совместимость (EMC), электромагнитный импульс (EMI) и электромагнитные поля высокой интенсивности (HIFR). Электромагнитные поля высокой интенсивности относятся к классу межсистемной электромагнитной совместимости, целью которой является обеспечение совместного функционирования различных систем при всех возможных воздействующих внешних радиочастотных полях. К электромагнитным полям высокой интенсивности относятся исключительно излучения от антропогенных источников, при этом это передатчики, преднамеренно излучающие электромагнитную энергию, например, радиопередатчики, радары наземных средств управления воздушным движением, средства радиоэлектронной борьбы и противодействия.

При попадании летательного аппарата в электромагнитное поле возникают влияния двух типов: наведенные токи и электромагнитное облучение [2]. Современный комплексный подход к защите системы питания бортовых радиоэлектронных средств при воздействии электромагнитных полей высокой интенсивности достигается путем многоуровневой защиты:

- размещение элементов систем в наименее опасных зонах самолета;
- экранирование элементов и блоков системы;
- заземление элементов и блоков системы;
- фильтрация помех, поступающих в блоки через внешние линии связи.

Высокие частоты электромагнитного поля полностью пронизывают корпус и внутреннюю аппаратуру летательного аппарата, взаимодействуют с электронными компонентами. Экранирование и фильтрация помех по линиям связи являются основными способами защиты. Экранирование снижает уровень помех, проникающих в блоки. При попадании под облучение экран становится токопроводящим элементом, по которому протекают токи, наводимые электромагнитными полями высокой интенсивности. Фильтрация помех – важнейшее схемное решение защиты, которое представляет собой установку фильтров на входных цепях с целью ослабления наводимых токов до некритичных значений [3].

Проектирование и оптимизацию разрабатываемого МШУ с учетом комплексного подхода к защите системы электропитания от воздействия электромагнитных полей высокой интенсивности предлагается выполнять в четыре этапа.

На первом этапе проектирования МШУ необходимо определить основные тактико-технические характеристики (ТТХ) проектируемого МШУ.

К основным ТТХ МШУ можно отнести: диапазон рабочих частот, коэффициент усиления, неравномерность АЧХ, коэффициент шума, коэффициент стоячей волны по входу, коэффициент стоячей волны по выходу, входной импеданс, выходной импеданс, напряжение питания, потребляемый ток, рабочий диапазон температур, предельный диапазон рабочих температур, интермодуляционные составляющие 3-го порядка, точка однодецибельной компрессии.

Опираясь на назначение и условия эксплуатации МШУ, из всего перечня ТТХ необходимо выбрать приоритетные параметры, по которым необходимо получить наилучший результат.

МШУ может быть реализован на СВЧ-транзисторе или на интегральной микросхеме (ИМС). По сравнению с ИМС СВЧ-транзистор обладает меньшим коэффициентом шума, но подбор питающего напряжения, рабочей точки смещения, а также согласование входа и выхода, отнимает много времени и в большинстве случаев может привести к ухудшению ожидаемого результата и такого важного для МШУ параметра, как коэффициента шума. Многие ИМС МШУ сигналов навигационных систем имеют внутри цепи согласования на линию с импедансом 50 Ом, но, несмотря на это, для полного согласования и задания рабочей точки им все же нужны некоторые внешние пассивные электронные компоненты. Коэффициент шума такой ИМС может быть не больше 1 дБ.

Для большинства конечных решений использование микросхем МШУ предпочтительней, чем СВЧ-транзистора. Пассивные электронные компоненты – конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности, могут быть производства любых фирм, но рассчитанные на работу в принимаемом диапазоне частот и конструктивно удовлетворяющие требованиям конечного изделия [4–6].

Второй этап – этап проектирования и оптимизации МШУ, является самым сложным и продолжительным. Сначала надо разработать схему электрическую принципиальную, выбрать стек

слоев и материал печатной платы, подготовить топологию малошумящего усилителя, изготовить оснастку для калибровки анализатора цепей, выполнить калибровку анализатора цепей, измерить S-параметры схемы МШУ.

Топологию следует делать как можно компактней, так как маленькие размеры делают МШУ более привлекательным для использования в новых проектах конечных изделий.

При разработке схемы электрической принципиальной необходимо на входе и выходе МШУ предусмотреть посадочные места для электронных компонентов, которые в процессе моделирования и оптимизации позволят установить одну из Г-образных согласующих цепей. Г-образная цепь позволяет согласовать любой комплексный импеданс с любым другим комплексным импедансом с помощью всего двух реактивных элементов: конденсатора и индуктивности.

МШУ является изделием высокочастотным, поэтому для решения потенциальных проблем наводок, а также упрощения процесса согласования линий передач и разводки топологии актуально использовать только многослойные печатные платы с количеством слоев не менее четырех. Четыре слоя проводящего рисунка необходимы для создания стека слоев печатной платы с отдельными слоями заземления и питания. Для проектирования МШУ сигналов спутниковых систем определения координат достаточным является использование материала FR4 High Tg или FR5.

При разработке печатной платы необходимо придерживаться золотого правила разработчика: если есть возможность, нужно обеспечить запас по технологическим нормам и стараться избегать узких мест с предельными значениями технологических параметров печатной платы [6].

При разработке печатной платы рекомендован следующий подход [7]:

1. Предварительно выбрать класс точности проектируемой платы, проанализировав элементную базу, электрические и сигнальные параметры схемы, типогабаритные показатели платы, допуски на контур, отверстия, технологические пазы и пр.

2. Убедиться, что предполагаемое производство может изготовить печатную плату данного класса точности (как образцы, так и промышленную серию).

3. Ознакомиться с технологическими нормами (ограничениями) данного производителя.

4. В случае возникновения вопросов обязательно связаться с техническим отделом производителя и заранее детально обсудить их.

5. Задать в используемом для трассировки пакете прикладных программ (PCAD, OrCAD, Altium и др.) правила проектирования (Desing Rules).

6. Выполнить трассировку печатной платы, соблюдая правила проектирования.

Используя исходные данные, полученные на предыдущих этапах проектирования, была разработана отладочная плата МШУ (рис. 2).

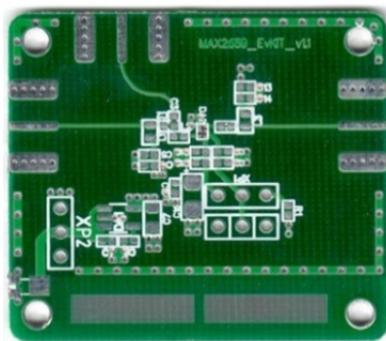


Рис. 2. Топология печатной платы МШУ

Для достоверного измерения электротехнических параметров схемы МШУ, смонтированной на представленной топологии, необходимо изготовить набор калибровочных мер векторного анализатора электрических цепей с аналогичным стеком слоев как у отладочной платы МШУ.

Набор калибровочных мер должен содержать следующий комплект нагрузок: нагрузка согласованная (LOAD); нагрузка короткозамкнутая (SHORT); нагрузка холостого хода (OPEN); перемычка (THRU).

Схема электрическая принципиальная нагрузок представлена на рис. 3, практическая реализация топологии печатной платы показана на рис. 4.

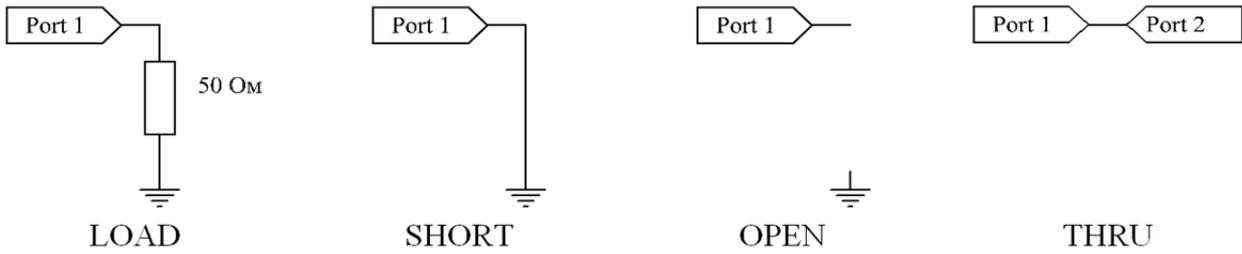


Рис. 3. Схема электрическая принципиальная набора калибровочных мер



Рис. 4. Набор калибровочный мер

До начала проведения калибровки рекомендуется определить конфигурацию векторного анализатора цепей: выбрать требуемые кабели и переходы для последовательного подключения калибровочных мер. После калибровки любое изменение конфигурации приводит к расширению пределов погрешности измерения.

Калибровка выполняется за несколько шагов. На каждом шаге к измерительным портам векторного анализатора цепей подключаются некоторые меры (рис. 5).

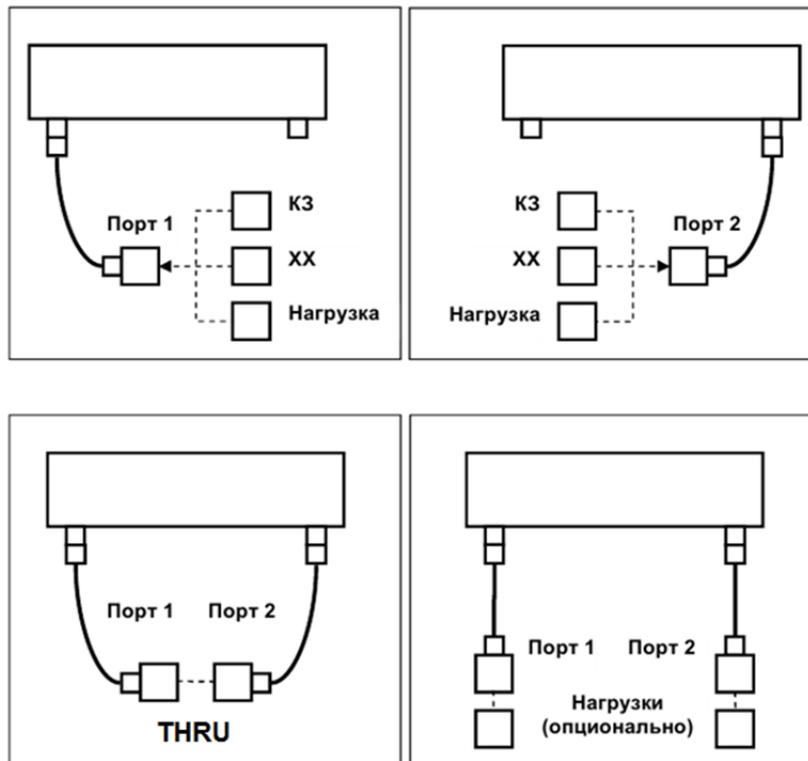


Рис. 5. Подсоединение мер при калибровке

По завершении процесса двухпортовой калибровки программное обеспечение векторного анализатора цепей рассчитает и запомнит в памяти калибровочные коэффициенты.

Измерение S-параметров топологического решения МШУ проводится без установленных элементов согласующих цепей, это позволит узнать входной и выходной импеданс схемы, зная который можно выбрать один из типов согласующей схемы. Значение элементов этих Г-образных цепей могут быть найдены графическими методами расчета по книге [8] или с использованием электронной диаграммы Смита [9], которые использует множество программ, например, Smith Chart [10].

Рассчитав номиналы электронных компонентов согласующей цепи, выбираем из стандартных рядов номиналов радиодеталей: E3, E6, E12, E24 и т.п. номинал элемента, максимально близкий к расчетному значению, и устанавливаем на заранее предусмотренное топологией печатной платы место. После утверждения номиналов элементов корректирующей цепи проводится измерение технических параметров МШУ и сравнение с выдвинутыми требованиями.

В случае отрицательного результата необходимо выполнить коррекцию схемы, например, настроить смещение по постоянному току, топологии МШУ, изменить стек слоев или выбрать другой материал. Необходимо отметить, что внесение изменений в топологию печатной платы МШУ может потребовать новой топологии набора калибровочных мер.

На третьем этапе по результатам, полученным на втором, необходимо выбрать топологические решения проектирования МШУ, которые удовлетворяют требованиям. Сравнить выбранные топологии между собой и выбрать несколько лучших вариантов. Из лучших вариантов выбрать один, который будет использован в разработке конечного решения.

Четвертый этап – этап принятия компромиссных решений. Компромисс присутствует на протяжении всего процесса разработки, моделирования и оптимизации. Из-за различных физических и производственных ограничений сделать идеальный МШУ не представляется возможным. При увеличении приоритета одного параметра, неукоснительно будет ухудшен другой. Поэтому расстановка приоритетов является важным этапом в проектировании конечного устройства.

Для принятия решения, какому параметру отдать предпочтение, может помочь информация о целевом назначении проектируемого МШУ. В частности, если это портативное гражданское устройство, предпочтение отдается потребляемой мощности и коэффициенту шума. А если конечное устройство военное или специального назначения, то важными параметрами будет линейность и коэффициент шума.

Таким образом, предложенный метод проектирования МШУ позволяет разработать функционально законченный модуль преселектора сигналов с заданными характеристиками, учитывая рекомендации по защите системы питания от электромагнитных полей высокой интенсивности, принимая во внимание частотную широкополосность и мощность воздействия. Были рассмотрены особенности разработки печатной платы для модуля и способы расчета согласующих цепей, а также необходимое для этого измерительное оборудование.

### *Список литературы*

1. Увайсов, С. У. Защита бортовой спутниковой навигационной системы от кратковременного пропадания электропитания и электромагнитных помех / С. У. Увайсов, Д. А. Аминев, И. Ю. Лисицын // Технологии электромагнитной совместимости. – 2013. – № 3 (46). – С. 45–49.
2. Акбашев, Б. Б. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий / Б. Б. Акбашев, Н. В. Балюк, Л. Н. Кечиев. – М. : Грифон, 2013. – 246 с.
3. Кечиев, Л. Н. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Л. Н. Кечиев, Н. В. Балюк, П. В. Степанов. – М. : ООО «Группа ИДТ», 2007. – 147 с.
4. Аминев, Д. А. Варианты реализации входного тракта спутникового навигационного приемника / Д. А. Аминев, А. С. Свиридов, С. У. Увайсов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 3 – С. 76–82.
5. Свиридов, А. С. Мультисистемный двухдиапазонный бортовой приемник сигналов спутниковых радионавигационных систем для космических аппаратов / А. С. Свиридов, А. А. Колганов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 339–341.
6. Свиридов, А. С. Преселектор сигнала спутниковых навигационных систем: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в навигационных радиоприемниках ответственного назначения /

- А. С. Свиридов, А. А. Колганов // Труды Междунар. симп. Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 341–347.
7. Памятка разработчику печатных плат – Выпуск 1. – Минск : ООО «Нанотех», 2004. – 24 с.
  8. Смит, Ф. Круговые диаграммы в радиоэлектронике. (Линии передачи и устройства СВЧ) / Ф. Смит ; пер. с англ. М. Н. Бергера и Б. Ю. Капилевича. – М. : Связь, 1976. – 144 с.
  9. Курушин, А. А. Проектирование СВЧ устройств с использованием электронной диаграммы Смита / А. А. Курушин ; под ред. д.т.н., проф. Б. Л. Когана. – М : Изд -во МЭИ, 2008. – 120 с.
  10. Smith Chart. – URL: <http://fritz.dellsperger.net/smith.html> (дата обращения: 11.01.2016).

**Свиридов Александр Сергеевич**

аспирант,  
Московский институт электроники и математики,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»  
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)  
E-mail: [asviridov@hse.ru](mailto:asviridov@hse.ru)

**Лисицын Иван Юрьевич**

аспирант,  
Московский институт электроники и математики,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»  
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)  
E-mail: [lisitsyn@hse.ru](mailto:lisitsyn@hse.ru)

**Колганов Андрей Андреевич**

аспирант,  
Московский институт электроники и математики,  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики»  
(101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20)  
E-mail: [akolganov@hse.ru](mailto:akolganov@hse.ru)

**Аннотация.** Описывается метод проектирования маломощного усилителя (МШУ) преселектора сигналов спутниковых навигационных систем с учетом защиты системы электропитания. Приведена общая структурная схема бортовой системы электропитания и виды электромагнитных воздействий на нее. Основная концепция метода – это интеграция программы моделирования и измерительного оборудования, так называемое «взаимосвязанное решение» и применение средств защиты электропитания.

**Ключевые слова:** ЭМИ, экранирование, фильтрация, электромагнитные поля высокой интенсивности, система питания бортовых радиоэлектронных средств, маломощный усилитель (МШУ), проектирование, коэффициент шума.

**Sviridov Aleksandr Sergeevich**

postgraduate student,  
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics  
National Research University  
«Higher School of Economics»  
(101000, 20 Mjasnickaja street, Moscow, Russia),

**Lisitsyn Ivan Yur'evich**

postgraduate student,  
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics  
National Research University  
«Higher School of Economics»  
(101000, 20 Mjasnickaja street, Moscow, Russia),

**Kolganov Andrey Andreevich**

postgraduate student,  
Moscow State Institute of Electronics and Mathematics  
National Research University  
«Higher School of Economics»  
(101000, 20 Mjasnickaja street, Moscow, Russia),

**Abstract.** Describes a method of designing a low noise amplifier (LNA), preselection of signals of satellite navigation systems, taking into account the protection of the power supply system. Shows the general block diagram of an onboard power supply system and the types of electromagnetic impacts. The basic concept of the method – is the integration of simulation software and measurement equipment, so-called «integrated solution» and the use of means of power protection.

**Key words:** EMI, shielding, filtration, high intensity electromagnetic fields (HIFR), power system avionics, Low Noise Amplifier (LNA), design, Noise Figure (NF).

УДК 629.7.05, 629.7.054.07

Свиридов, А. С.

Проектирование маломощного усилителя преселектора сигналов спутниковых навигационных систем для бортовых радиоэлектронных средств с учетом защиты системы электропитания от воздействия электромагнитных полей высокой интенсивности / А. С. Свиридов, И. Ю. Лисицын, А. А. Колганов // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 4 (12). – С. 110–115.