

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

УДК 004.312.4: 004.42

На правах рукописи

ЮХНОВЕЦ
Илья Анатольевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМ
И АНАЛИЗ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ
В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ *ALTIUM DESIGNER***

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание степени
магистра техники и технологий

по специальности 1-39 81 01 – Компьютерные технологии
проектирования электронных систем

Минск 2018

Работа выполнена на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель: **ПИСКУН Геннадий Адамович**,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры проектирования информационно-
компьютерных систем учреждения образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Рецензент: **ПОЛОЗКОВ Юрий Викторович**,
Заведующий кафедрой «Программное
обеспечение вычислительной техники и
автоматизированных систем» БНТУ, кандидат
технических наук, доцент

Защита диссертации состоится «26» июня 2018 г. года в 10⁰⁰ часов на заседании Государственной экзаменационной комиссии по защите магистерских диссертаций в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, копр. 1, ауд. 415, тел. 293-20-80, e-mail: kafpiks@bsuir.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире повсеместно применяется радиоэлектронная аппаратура и с каждым годом изделия становятся всё сложнее. Самой важной частью любого радиоэлектронного изделия является печатная плата.

Требования к проектированию печатных плат растут высокими темпами. Платы работают на более высоких частотах, с высокими напряжениями и токами. Также, в современных реалиях конкурентной борьбы на рынке электронных устройств, сильно возросла скорость выпуска готовых изделий. Учитывая вышесказанное, для исключения ошибок при проектировании, ускорения производства новых изделий, исключения ряда ошибок, удешевления производства, обязательным условием при создании печатных плат являются различного рода моделирования. Одним из таких является моделирование электрических схем.

Проведение схемотехнического моделирования предполагает наличие знаний в схемотехнике, а также глубокого понимания процессов, происходящих в печатной плате. Существует необходимость разбираться в специфике возникновения различного рода помех, знать их природу, форму, источники их возникновения и наиболее важные характеристики.

Также, обладая вышеназванными знаниями, необходимо иметь знания в области защиты печатных плат радиоэлектронной аппаратуры от воздействия электромагнитных помех.

Помимо этого, компьютерное схемотехническое моделирование электрических схем предполагает наличие знаний в специальных программных продуктах, предназначенных для проведения вышеназванного моделирования.

Учитывая всё вышперечисленное, разработка научных и технических основ проектирования, моделирования процессов, внедрения их в работу предприятий и, как следствие, повышение качества выпускаемой ими продукции доказывает актуальность темы диссертации.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Схемотехническое моделирование воздействия электромагнитных помех и протекание их в металлизированных дорожках печатных плат является одной из наиболее сложных и актуальных задач. Это обусловлено, в первую очередь, тем, что на этапе моделирования можно выявить наиболее уязвимые к электромагнитному воздействию области. Во-вторых, схемотехническое моделирование позволяет при помощи использования

элементов фильтрации показать наиболее эффективные способы защиты от помех.

Степень разработанности проблемы

Исследования влияния электромагнитных помех на печатные платы осуществлялось на основе построения теоретических и практических моделей с использованием работ как отечественных, так и зарубежных ученых. В частности, стоит отметить работы таких ученых, как: Гизатуллин З.М., Чермошенцев С.Ф., Кечиев Л.Н., Алексеев В.Ф., Пискун Г.А. и т.д.

Одним из недостатков исследований, представленных в современной технической литературе, является нехватка практических примеров схемотехнических способов защиты печатных плат от электромагнитных помех.

Предложенное исследование направлено на устранение этого недостатка на основе разработки методики моделирования сигналов при электромагнитном воздействии.

Цель и задачи исследования

Целью диссертации является исследование схем электрических принципиальных в которых предложены различные способы фильтрации помех, а также компьютерное моделирование сигналов в электрических схемах с выявлением наиболее эффективных методов борьбы с помехами, возникающими в печатных платах.

Поставленная цель работы определяет следующие основные задачи:

- провести обзор и анализ специфики возникновения помех в печатных платах, а также провести анализ изменения полезных сигналов при воздействии электромагнитных помех;
- разработать методику моделирования сигналов в электрических схемах с фильтрами от электромагнитных помех;
- экспериментально выявить наиболее эффективные схемотехнические методы борьбы с возникающими в печатных платах помехами.

Область исследования

Содержание диссертации соответствует образовательному стандарту высшего образования второй ступени (магистратуры) специальности 1-39 81 01 «Компьютерные технологии проектирования электронных систем».

Теоретическая и методологическая основа исследования

В основу диссертации легли работы белорусских и зарубежных авторов в области влияния электромагнитных помех на печатные платы и

схемотехнических способов их защиты, компьютерного моделирования способов защиты от помех, а также анализ технических нормативных правовых актов по рассматриваемой тематике.

Научная новизна

Научная новизна и значимость полученных результатов работы заключается в разработке методики моделирования и выявления наиболее эффективных схемотехнических методов борьбы с возникающими помехами в печатных платах.

Теоретическая значимость работы заключается в детальном анализе возникающих в печатных платах электромагнитных помех.

Практическая значимость диссертации состоит в разработанных схемотехнических моделях борьбы с электромагнитными помехами в печатных платах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Классификация и систематизация воздействия электромагнитных помех на печатные платы, основанная на анализе их природы возникновения, позволяющая выявить наиболее характерные помехи при определенных условиях эксплуатации устройств.

2. Схемотехническое моделирование защиты от электромагнитных помех в печатных платах, основанное на анализе изменения полезного сигнала и методах защиты, позволившее разработать методику построения конечной модели.

3. Модели пассивных сглаживающих фильтров и фильтра звуковых частот, основанные на их моделировании в *Altium Designer*, позволяющие определить наиболее эффективные фильтры для различных видов воздействующих электромагнитных помех.

Публикации

Изложенные в диссертации основные положения и выводы опубликованы в 4 печатных работах. В их числе 2 работы опубликованы в сборниках материалов научных конференций и 2 тезиса приняты к опубликованию.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе приведен обзор специфики возникновения помех в печатных платах радиоэлектронных средств. Дана классификация помех в печатных платах, произведен анализ программных продуктов и выявлены

особенности разработки компьютерных моделей в *Altium Designer*. **Во второй главе** представлен анализ изменения полезных сигналов при воздействии электромагнитных помех, анализ методов защиты печатных плат от них. Так же представлена методика построения компьютерной модели симуляции электрической схемы в *Altium Designer*. **В третьей главе** представлен эксперимент по выявлению наиболее эффективных схемотехнических методов борьбы с возникающими в печатных платах помехами, посредством моделирования пассивных сглаживающих фильтров.

Общий объем диссертационной работы составляет 84 страницы. Из них 65 страниц основного текста, 63 иллюстрации на 20 страницах, 1 таблица на 1 странице, библиографический список из 44 наименований на 3 страницах, список собственных публикаций соискателя из 4 наименований на 1 странице, 3 приложения на 10 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрено современное состояние проблемы повышения требований к схемотехнической защите печатных плат от воздействия электромагнитных помех, а также представлено обоснование актуальности темы диссертации.

В **общей характеристике** работы показана актуальность проводимых исследований, степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи диссертации, обозначена область исследований, научная (теоретическая и практическая) значимость исследований.

В **первой главе** рассмотрена специфика возникновения помех в печатных платах, приведена классификация этих помех (рисунок 1).

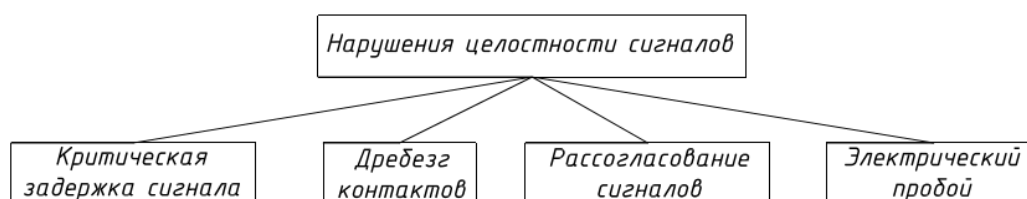


Рисунок 1 – Схема нарушений целостности сигналов

Из анализа следует, что проектирование ПП является сложным процессом, включающим в себя различное количество этапов. В ряде случаев, грамотной разработки схемы электрической принципиальной и разводки печатной платы бывает достаточно для обеспечения корректного

функционирования устройства согласно исходному техническому заданию. Однако при работе с высокоскоростными сигналами качественный анализ схемы электрической принципиальной не гарантирует правильного функционирования разрабатываемого устройства.

Рассмотрены основные программные комплексы, используемые для моделирования электрических схем.

Во **второй главе** проведен анализ полезных сигналов при воздействии электромагнитных помех, определена их природа, обозначены аспекты электромагнитной совместимости (рисунок 2).

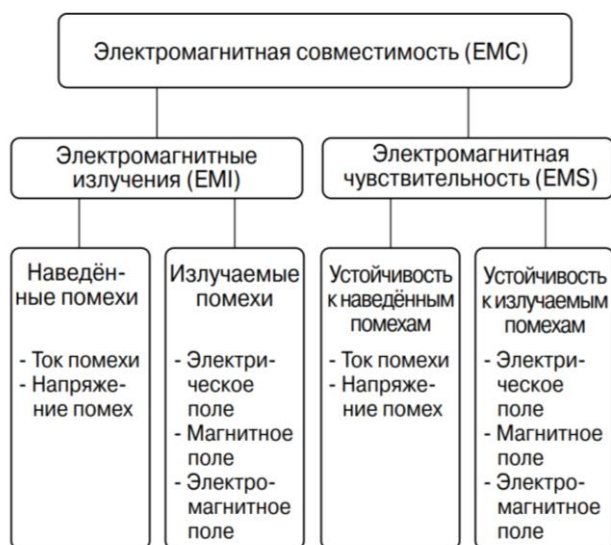


Рисунок 2 – Аспекты электромагнитной совместимости

Проведен анализ методов защиты печатных плат от воздействия электромагнитных помех, представлены варианты схем заземления, рассмотрена проблематика разводки печатной платы, разделения элементов на логические блоки, проблематики создания многослойных и высокоскоростных печатных плат.

Разработана и представлена подробная методика построения компьютерной модели симуляции работы электрической схемы в *Altium Designer*.

В **третьей главе**, по разработанной ранее методике, проведено исследование по выявлению наилучшего сглаживающего фильтра для работы с «грязным» синусоидальным сигналом.

В работе впервые были рассмотрены 5 фильтров электромагнитных помех, наиболее характерных для высокочастотных печатных плат. В ходе исследования была представлена серия графиков с исходным и отфильтрованным сигналами, представленными на рисунках 3...13.

На рисунках 3 и 5 представлены LC -фильтры. Все LC -фильтры обладают тем преимуществом, что на переменном токе конденсаторы и катушки индуктивности работают взаимнообратно, т.е. при увеличении частоты сигнала индуктивное сопротивление возрастает, а емкостное падает. Таким образом, в LC -фильтре нижних частот реактивное сопротивление параллельного элемента при увеличении частоты сигнала уменьшается и этот элемент шунтирует высокочастотные сигналы. На низких частотах реактивное сопротивление параллельного элемента достаточно высокое. Последовательный элемент обеспечивает прохождение низкочастотных сигналов, а для сигналов высоких частот его реактивное сопротивление велико.

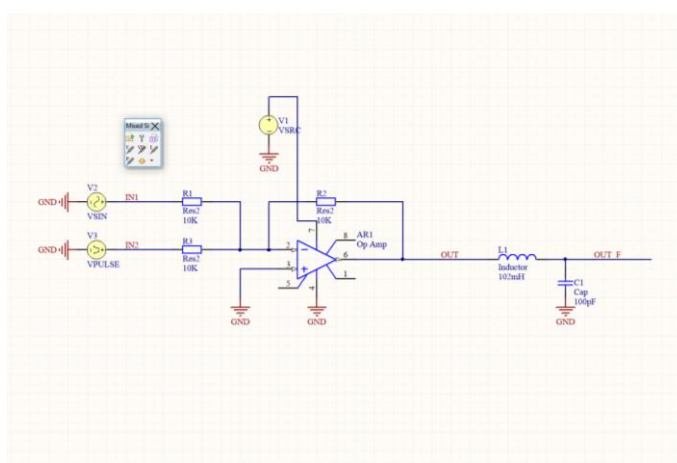


Рисунок 3 – Схема на базе LC -фильтра (схема 1)

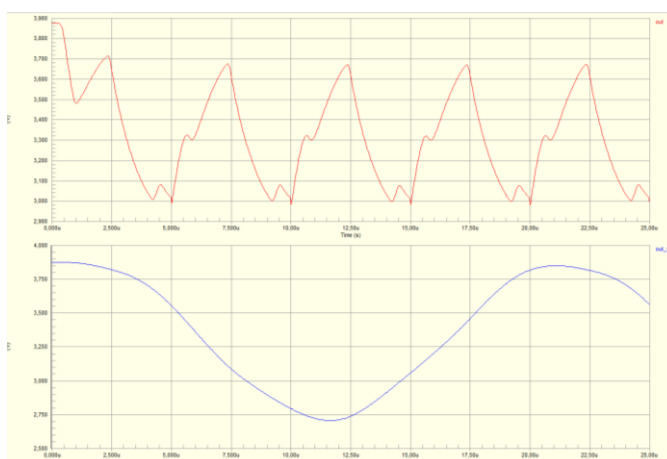


Рисунок 4 – Графики выходных сигналов схемы 1

Из графика, представленного на рисунке 4, видно работу первого фильтра, сигнал приведен к синусоидальному виду. Однако частота сигнала значительно изменилась.

На рисунке 5 представлена схема LC -фильтра с добавлением дополнительной катушки индуктивности.

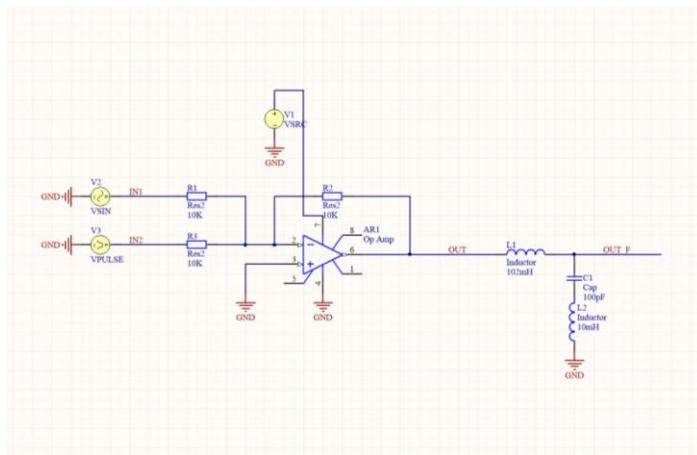


Рисунок 5 – Схема на базе LC -фильтра с дополнительной индуктивностью (схема 2)

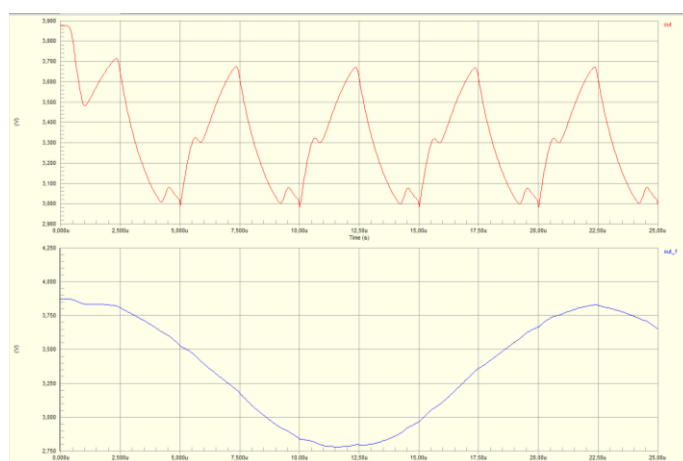


Рисунок 6 – Графики выходных сигналов схемы 2

Отфильтрованный сигнал, представленный на рисунке 6, представляет из себя синусоиду схожую по форме с синусоидой, представленной на рисунке 4, однако чуть менее сглаженную.

На рисунке 7 представлена схема RLC -фильтра. Достоинствами данной схемы являются небольшие потери мощности, а также незначительная зависимость выходного напряжения от изменения сопротивления нагрузки.

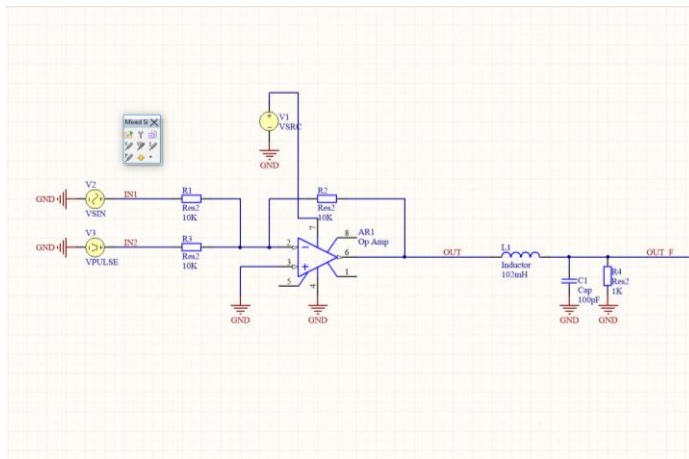


Рисунок 7 – Схема на базе RLC -фильтра (схема 3)

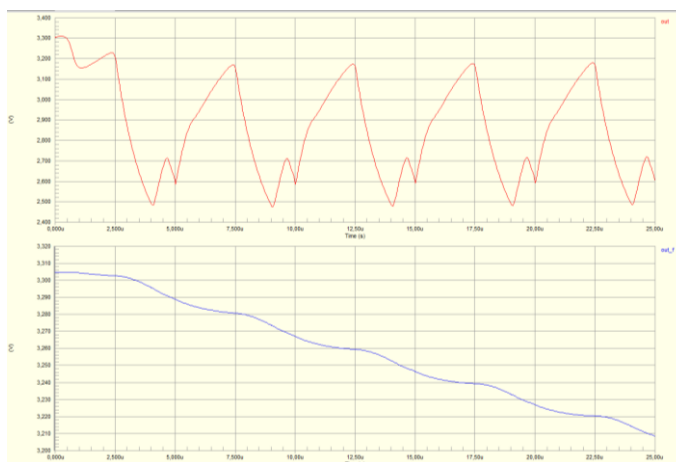


Рисунок 8 – Графики выходных сигналов схемы 3

На рисунке 8 представлен график выходного сигнала RLC -фильтра, из которого следует, что данный фильтр не подходит для фильтрации данного сигнала.

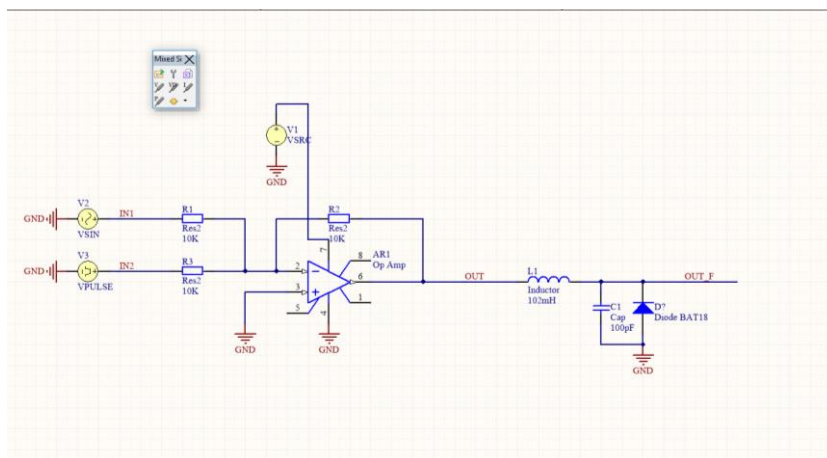


Рисунок 9 – Схема на базе LC -фильтра с дополнительным диодом (схема 4)

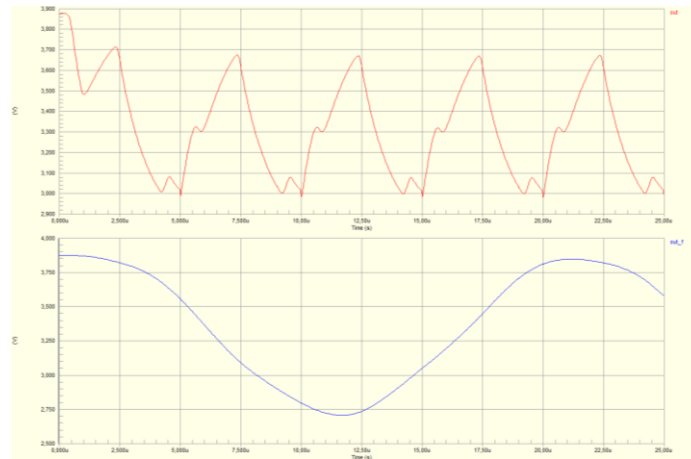


Рисунок 10 – Графики выходных сигналов схемы 4

На рисунке 11 представлен RC -фильтр. Принцип его работы основан на том, что при изменении частоты реактивное сопротивление конденсатора изменяется обратно пропорционально частоте, а сопротивление резистора остается неизменным. При подаче на вход такого фильтра низкочастотного сигнала реактивное сопротивление конденсатора C будет гораздо больше, чем сопротивление резистора R . В результате падение напряжения на конденсаторе будет большим, а на резисторе — малым. При подаче на вход этого фильтра высокочастотного сигнала картина будет обратная: падение напряжения на конденсаторе будет малым, а на резисторе — большим. Если представить схему где падение напряжения на конденсаторе является выходным, то в выходном сигнале будут преобладать НЧ-составляющие, а ВЧ будут сильно ослабляться. Другими словами, мы получим фильтр нижних частот. И наоборот, если выходное напряжение снимать с резистора, то получим фильтр верхних частот. Значения R и C определяют частоту среза фильтра.

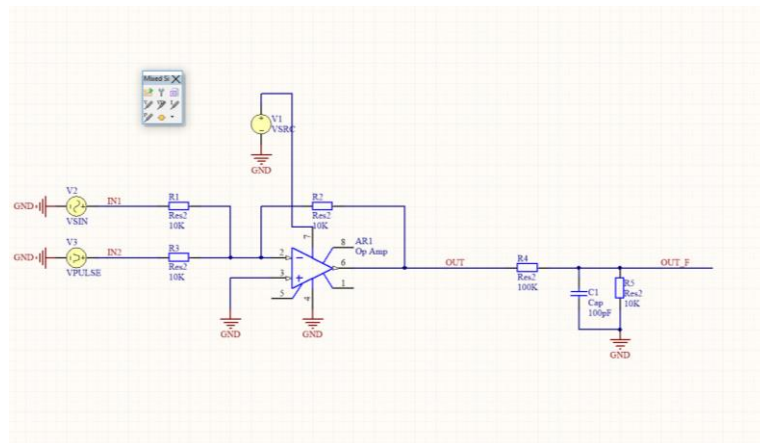


Рисунок 11 – Схема на базе RC -фильтра (схема 5)

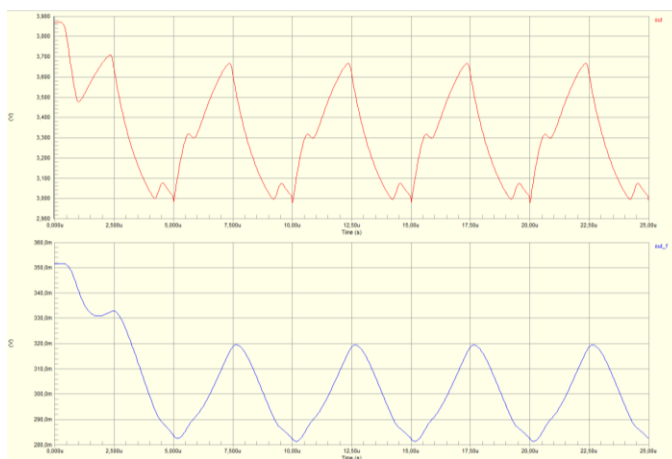


Рисунок 12 – Графики выходных сигналов схемы 5

На рисунке 12 представлен график выходного сигнала *RC*-фильтра. Отфильтрованный сигнал имеет схожую форму с исходным, нежелательные помехи сглажены.

Основываясь на данные полученные в ходе эксперимента, был сделан вывод, что наиболее подходящим фильтром является *RC*-фильтр представленный на схеме 5, метод моделирования сигналов признан работоспособным и эффективным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

В ходе выполнения работы были реализованы следующие задачи:

- выполнен анализ программных продуктов схемотехнической симуляции;
- проработана специфика возникновения помех в печатных платах, а именно дана классификация вышеназванным помехам, возникающим в печатных платах радиоэлектронных средств;
- проведен анализ изменения полезных сигналов при воздействии электромагнитных помех, определена природа возникновения ЭМП. Проанализированы методы защиты печатных плат радиоэлектронной аппаратуры от электромагнитного воздействия;
- разработана методика построения компьютерной модели симуляции работы электрических схем;
- произведено моделирование схем фильтра звуковых частот, а также моделирование схем сглаживающих фильтров.

В результате разработки методики схемотехнического моделирования влияния сглаживающих фильтров на полезный сигнал, экспериментально

установлены наиболее подходящие фильтры, а также доказана работоспособность методики и актуальность её использования в процессе проектирования печатных плат.

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты внедрены в производственный процесс в ООО «БСВТ-новые технологии», а также в учебный процесс на кафедре проектирования информационно–компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс «Конструирование радиоэлектронных устройств», «Системы автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств».

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Юхновец, И.А. Анализ целостности сигналов при проектировании печатных плат в *Altium Designer* / И.А. Юхновец, А.В. Стрельцова, В.В. Щеголев, Г.А. Пискун // материалы 13-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ – 2017», Севастополь, Российская Федерация / УО «СГУ». – Севастополь, 2017. – С. 101.

2. Стрельцова, А.В. Принцип построения информационно-измерительной системы интеллектуального мобильного робота / А.В. Стрельцова, И.А. Юхновец, С.А. Грудковский, Г.А. Пискун // материалы 13-ой международной молодежной научно-технической конференции «Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций, РТ – 2017», Севастополь, Российская Федерация / УО «СГУ». – Севастополь, 2017. – С. 104.

3. Юхновец, И.А. Технологии аддитивного производства радиоэлектронных средств / И.А. Юхновец, А.В. Агеев, Г.А. Пискун // материалы 54-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 23–27 апреля 2018 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2018. – С.116–117.

4. Юхновец, И.А. Способы защиты современных защитных покрытий печатных плат устройств обработки данных / И.А. Юхновец, А.В. Агеев, Г.А. Пискун // материалы 54-ой науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Проектирование информационно–компьютерных систем», Минск, Респ. Беларусь, 23–27 апреля 2018 г. / УО «БГУИР». – Минск, 2018. – С.115.

РЭЗІЮМЭ

Юхнавец Ілья Анатольевіч

Даследаванне электрычных прынцыповых схем і аналізу цэласнасці сігналаў у праграмным комплексе Altium Designer

Ключавыя словы: электрамагнітная перашкода, мадэль

Мэта працы: павышэнне ўстойлівасці РЭА да пабойцам фактарам электрамагнітных перашкод за кошт правядзення мадэлявання электрычных схем.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: выкананы аналіз спецыфікі ўзнікнення перашкод у друкаваных поплатах, вызначана прырода іх узнікнення. Прааналізаваны метады абароны друкаваных поплатаў радыёэлектроннай апаратуры ад электрамагнітнага ўздзеяння.

Распрацавана метадыка пабудовы кампутарнай мадэлі мадэлявання электрычных схем. Праведзена мадэляванне шэрагу якія згладжваюць фільтраў, у якім былі выяўлены найбольш эфектыўныя з іх.

Ступень выкарыстання: вынікі ўкаранёны ў навучальны працэс на кафедры праектавання інфармацыйна-камп'ютэрных сістэм ўстанова адукацыі "Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт інфарматыкі і радыёэлектронікі ў навучальны курс" Фізічныя асновы праектавання радыёэлектронных сродкаў".

Вобласць ужывання: паўправадніковая прамысловасць, мікропроцэсорныя сістэмы

РЕЗЮМЕ

Юхновец Илья Анатольевич

Исследование электрических принципиальных схем и анализ целостности сигналов в программном комплексе *Altium Designer*

Ключевые слова: электромагнитная помеха, модель.

Цель работы: повышение устойчивости РЭА к поражающим факторам электромагнитных помех за счет проведения моделирования электрических схем.

Полученные результаты и их новизна: выполнен анализ специфики возникновения помех в печатных платах, определена природа их возникновения. Проанализированы методы защиты печатных плат радиоэлектронной аппаратуры от электромагнитного воздействия.

Разработана методика построения компьютерной модели симуляции электрических схем. Проведено моделирование ряда сглаживающих фильтров, в котором были выявлены наиболее эффективные из них.

Степень использования: результаты внедрены в учебный процесс на кафедре проектирования информационно–компьютерных систем учреждения образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в учебный курс “Физические основы проектирования радиоэлектронных средств”.

Область применения: полупроводниковая промышленность, микропроцессорные системы.

SUMMARY

Yukhnavets Illia Anatolievich

Study of electrical circuit diagrams and analysis of signal integrity in the software complex Altium Designer

Keywords: electromagnetic interference, model.

The object of study: increasing the stability of electronic equipment to the damaging factors of electromagnetic interference by conducting simulation of electrical circuits.

The results and novelty: the analysis of the specificity of interference in printed circuit boards, determined the nature of their occurrence. Methods of protection of printed circuit boards of radio-electronic equipment from electromagnetic influence are analyzed.

The method of construction of a computer model of simulation of electrical circuits. The modeling of a number of smoothing filters, in which the most effective of them were identified, was carried out.

Degree of use: the results implemented in the educational process at the department of design information and computer systems educational institution "Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics in the training course" Physical fundamentals of the design of radio-electronic means. "

Sphere of application: industry, MPU-sor system.