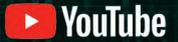


СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

2

2021



ВСЁ ЧЕРЕЗ G:
КАК НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗМЕНЯТ МИР

В номере:

**Электромагнитная
совместимость
устройств 5G**

**Практика
использования АЦП
в ПЛИС Altera MAX10**

**Методы ослабления
потока электронов
композитными
защитными экранами**

**Эдвин Армстронг –
непризнанный отец
супергетеродинного
радиоприёмника**

1G 2G 3G 4G 5G 6G



ИСПЫТАНИЯ НА ЭМС

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОЙ РАБОТЫ
РЭА И ТС В РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

ТЕСТПРИБОР

125480, г. Москва
ул. Планерная, д. 7А
тел./факс: (495) 657-87-37
testpribor@test-expert.ru
www.test-expert.ru



Юрий Широков,
главный редактор

Здравствуйте, уважаемые читатели!

У всех на слуху продолжающийся мировой дефицит поставок чипов в автомобильной промышленности. По данным института маркетинговых исследований IHS Markit, только в первом квартале 2021 года производство порядка шестисот с лишним тысяч новых автомобилей в мире будет в той или иной степени осложнено дефицитом специфических для автопрома чипов. Так что несмотря на коронавирусную пандемию, производители электронных чипов чувствуют себя вполне уверенно. А в числе пострадавших уже сегодня такие гиганты как, Volkswagen, Daimler и Audi. Узкое место в значительной степени обусловлено концентрацией производства автомобильных чипов всего на нескольких фабриках. К примеру, около 70% микросхем для автомобильной электроники производится тайваньской TSMC, чьи мощности перегружены заказами.

Потребность в высокопроизводительном телекоммуникационном оборудовании подхлестывает развитие оптических технологий. Nokia Bell labs впервые продемонстрировала оптоволоконную широкополосную пассивную оптическую сеть со скоростью передачи 100 Гбит/с. Системы с такой пропускной способностью станут коммерчески доступными и крайне востребованными уже во второй половине десятилетия, с приближением эры 6G.

Очередной качественный скачок в эволюции вычислительных систем многие связывают с квантовыми процессорами и вычислениями. Действующий квантовый компьютер вполне может быть создан в ближайшие 4 года в рамках баварской «квантовой инициативы». В общей сложности в исследования будет вложено 300 миллионов евро. В проекте принимает участие Infineon Technologies с физиками-экспериментаторами из Инсбрукского университета. В рамках проектов PIEDMONS и QUASAR специалисты создают прототип чипа в рамках проектов PIEDMONS и QUASAR. Подобными разработками занимаются также Intel и IBM.

Технологии 3D-печати из разряда забавных диковинок уверенно шагнули в лаборатории и производственные цеха. Исследователи из Сколковского института науки и технологий и Технологического института Карлсруэ в Германии использовали 3D-печать для создания датчика, способного обнаруживать небольшие количества химических веществ в воздухе и напитках. Датчик был создан путём нанесения на многоэлектродном чипе нанокристаллических слоёв толщиной 70 нм из восьми различных оксидов металлов с использованием марганца, церия, циркония, цинка, хрома, кобальта, олова и титана.

Летающие дроны – тоже уже не детские игрушки. Например, система Beyond Visual Line of Sight (BVLOS) позволит осуществлять непрерывный дистанционный контроль и мониторинг промышленных и городских объектов. Координацию в полёте рою беспилотников обеспечит искусственный интеллект на графических процессорах Nvidia.

В очередной раз удивили мир создатели SpaceX, с помощью одного носителя выведя на околоземную орбиту рекордное число (143 штуки) европейских спутников.

Тем временем Nokia и Ericsson возглавили проект Hexa-X по разработке технологий и новых стратегий для беспроводной связи поколения 6G. Своевременное начало оценки технологий и новых концепций, по мнению участников проекта, необходимо даже если некоторые из них всё ещё находятся на низком уровне готовности. О видении компанией Nokia кибер-будущего эпохи 6G читайте в этом журнале!

На YouTube-канале «Современной электроники» тоже много нового: смотрите у нас ролики-интервью на интересные темы с интересными людьми и подписывайтесь на наш канал!

Всего вам доброго!

MARKET**4 Russian Market News****MODERN TECHNOLOGIES****8 Communication in the 6G Era.****Part 1***Harish Viswanathan, Preben Mogensen***12 CCell and Vicor Collaborate to Power New Coral Reef Growth***Rory Baxter***14 Necessary – Read, Unnecessary – Don't Read***Maxim Selivanov***INSTRUMENTS AND SYSTEMS****16 Innovations in the Production of Testing of 5G Millimeter-Wave Base Stations***Norm Smith***ENGINEERING SOLUTIONS****20 High-Resolution Digital Voltmeter****Part 4. Device Configuration***Alexey Kuzminov***24 Electronic Reducer. How to Increase the Torque of an AC Brushed Motor at Low RPM.****Part 2***Alexey Kuzminov***DESIGN AND SIMULATION****30 Testing the 5G Devices for Electromagnetic Compatibility: Needs and Current Opportunities***Nikolay Lemeshko, Dmitry Bogachenkov***40 Formal Deductive Analysis of an Automaton Algorithm for Controlling an Endogas Generator Using the Rodin Platform.****Part 3. Building a Formal Theory for a Control Algorithm***Maxim Neizov***44 The Practice of Using the Built-in ADC in FPGAs of the MAX10 Family. Part 1. Reference Information on the FPGA ADC MAX10***Pavel Redkin***THEORY QUESTIONS****54 The Reverse Current in Synchronous Rectifiers***Victor Zhdankin***58 Attenuation of Electron Fluxes of the Earth's Radiation Belts by Protective Shields Based on W-Cu Composite***A.S. Yakushevich, Yu.V. Bogatyrev, S.S. Grabchikov, S.B. Lastovsky, N.A. Vasilenkov, A.E. Kozyukov, G.A. Protopopov***PAGES OF HISTORY****64 The Tragic Fate of the Brilliant Inventor Edwin Armstrong. Dedicated to the 130th Anniversary of the Birth***Vladimir Bartenev***EVENTS****68 Results of the 'Russian Week of High Technologies 2020'**

Журнал «Современная электроника»

Издаётся с 2004 года

Главный редактор Ю. В. Широков

Заместитель главного редактора Д. А. Трофимов

Редакционная коллегия А. Е. Балакирев, В. К. Жданкин,

С. А. Сорокин, Р. Х. Хакимов

Вёрстка А. М. Бабийчук

Обложка Д. В. Юсим

Распространение А. Б. Хамидова (info@soel.ru)

Реклама И. Е. Савина (advert@soel.ru)

Учредитель и издатель ООО «СТА-ПРЕСС»

Генеральный директор К. В. Седов

Адрес учредителя и издателя:

117279, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 108, пом/ком/эт I/67/тех

Почтовый адрес: 119313, Москва, а/я 26

Тел.: (495) 232-0087 • Факс: (495) 232-1653

info@soel.ru • www.soel.ru

Производственно-практический журнал

Выходит 9 раз в год. Тираж 10 000 экз. Цена свободная

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе

по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия (свидетельство ПИ № ФС77-18792 от 28 октября 2004 г.)

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОП».

Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19, бизнес-центр Вэлдан

Тел./факс: (499) 903-6952

Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции. Ответственность за содержание рекламы несут рекламодатели. Ответственность за содержание статей несут авторы. Материалы, переданные редакции, не рецензируются и не возвращаются. Мнение редакции не обязательно совпадает с мнением авторов. Все упомянутые в публикациях журнала наименования продукции и товарные знаки являются собственностью соответствующих владельцев.

© СТА-ПРЕСС, 2021

ПОДПИСКА**БЕСПЛАТНАЯ ПОДПИСКА ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ**

на электронную версию журнала. Условие сохранения такой подписки – своевременное её продление каждый год.

ПЛАТНАЯ ПОДПИСКА на печатную версию –

это гарантированное получение журнала по любому указанному вами адресу!

С УСЛОВИЯМИ ОФОРМЛЕНИЯ ПЛАТНОЙ ПОДПИСКИ
МОЖНО ОЗНАКОМИТЬСЯ НА САЙТЕ WWW.SOEL.RU

СОДЕРЖАНИЕ 2/2021

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

XP Power	7, 11
Schaefer.	21
ICAPE GROUP.	29
Delta Design.	4, 23
ТЕСТПРИБОР	2-я стр. обл, 59
Mentor	43
Rohde & Schwarz	6, 7, 4-я стр. обл.
Морион	6
LITEMAX	5, 6
Экспозлектроника	19
ChipExpo	34
Radel	39
Связь	53

Смотрите на **YouTube-канале:**



Интервью с идеологом спутниковой системы глобальной безопасности Николаем Моисеевым.

Автор рассказывает о возможностях системы, её потенциальной пользе и перспективах реализации проекта

РЫНОК

4 Новости российского рынка

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

8 Коммуникации в эпоху 6G.

Часть 1

Хариш Вишванатан, Пребен Могенсен

12 Решение для энергоснабжения системы выращивания коралловых рифов CCell и Vicor

Рори Бакстер

14 Нужное – читать, ненужное – не читать

Максим Селиванов

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

16 Инновации в производственных испытаниях базовых станций 5G миллиметрового диапазона

Норм Смит

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

20 Цифровой вольтметр с высоким разрешением

Часть 4. Настройка устройств

Алексей Кузьминов

24 Электронный редуктор. Как кардинально увеличить крутящий момент коллекторного двигателя переменного тока на низких оборотах.

Часть 2

Алексей Кузьминов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

30 Тестирование устройств 5G для обеспечения электромагнитной совместимости: потребности и современные возможности

Николай Лемешко, Дмитрий Богаченков

40 Формальный дедуктивный анализ автоматного алгоритма управления генератором эндогаза с помощью платформы Rodin.

Часть 3. Построение формальной теории для алгоритма управления

Максим Нейзов

44 Практика использования встроенного АЦП в ПЛИС семейства MAX10
Часть 1. Справочная информация по АЦП ПЛИС MAX10

Павел Редькин

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

54 Обратный ток в синхронных выпрямителях

Виктор Жданкин

58 Ослабление потоков электронов радиационных поясов земли защитными экранами на основе композита W-Cu

А.С. Якушевич, Ю.В. Богатырев, С.С. Грабчиков, С.Б. Ластовский, Н.А. Василенков, А.Е. Козюков, Г.А. Протопопов

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

64 Трагическая судьба гениального изобретателя Эдвина Армстронга. К 130-летию со дня рождения

Владимир Бартев

СОБЫТИЯ

68 Итоги «Российской недели высоких технологий-2020»

Новости российского рынка

РЫНОК

Компания ЭРЕМЕКС готова предложить достойную альтернативу зарубежным САПР электроники

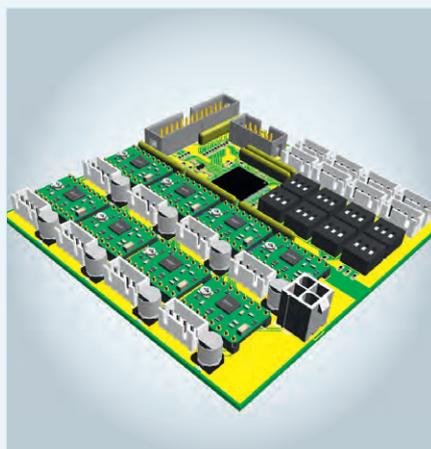
В новом году на фоне ужесточения экспортных ограничений в отношении России отечественные продукты для разработки электроники будут пользоваться повышенным интересом, считают специалисты ЭРЕМЕКС.

С середины прошлого года действуют новые торговые ограничения США на поставки товаров в Россию. В конце 2020 года был расширен список компаний, попадающих под торговые ограничения. Бюро промышленности и безопасности (BIS) министерства торговли США включило в него 45 российских организаций, в том числе предприятия, работающие по заказам ВПК: ПАО «Объединённая авиастроительная компания», «Рособоронэкспорт», «Ростех» и другие организации, включая научно-исследовательские институты. А в марте текущего года вступят в силу ограничения на поставки для структур военной разведки. Все эти события повлияют на дальнейшее развитие различных сегментов российского ИТ-рынка, включая сегмент инженерного ПО.

Список продуктов, подпадающих под обязательное дополнительное лицензирование можно найти на сайте Института правовой информации Корнельского университета (Legal Information Institute, LLI). В перечень включены материалы и установки для атомной промышленности, определенные продукты для телекоммуникаций, систем ин-

формационной безопасности, навигации, авионики и другие.

В категорию под названием «Проектирование, разработка и производство электроники» включено программное обеспечение для разработки, производства или использования электронных устройств, отвечающих ряду условий. Это, в частности, означает, что поставки определённым предприятиям не только оборонного сектора, но и работающим над задачами двойного назначения, осуществляются по новым правилам дополнительного лицензирования. Новые ограничения будут действовать и на поставки систем автоматизированного проектирования электроники.



На протяжении нескольких лет компания ЭРЕМЕКС предлагает российским разработчикам электроники САПР Delta Design, которая не только является достойным аналогом зарубежных систем автоматизи-

рованного проектирования электроники, но по ряду параметров уже превосходит и опережает их.

САПР Delta Design 3.0 от ЭРЕМЕКС отвечает современным требованиям разработчиков радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Система реализует сквозной цикл проектирования изделия с поддержкой ГОСТов. Проектные данные могут быть импортированы из других современных САПР. Delta Design оснащается библиотекой электронных компонентов, в которую входят как распространённые, так и специализированные компоненты от российских производителей. Для конечного пользователя усилия по переходу с САПР иностранного происхождения на российскую Delta Design 3.0 минимизированы. При необходимости специалисты ЭРЕМЕКС выполняют работу по интеграции новой САПР в существующую ИТ-инфраструктуру предприятия и проводят обучение пользователей.

Помимо обширного инструментария, для разработки и производства печатных плат Delta Design 3.0 интегрируется в единый комплекс управления жизненным циклом изделия (PLM-комплекс), созданный участниками консорциума ИТ-разработчиков «РазВИТие» (www.plmrussia.ru). Все совместные усилия участников консорциума «РазВИТие» направлены на локализацию и обеспечение импортонезависимости инженерного ПО с учётом реальных задач промышленности и развития критически важных отраслей.

www.eremex.ru

В библиотеку электронных компонентов Delta Design 3.0 вошли продукты АО НПО «ЭРКОН»

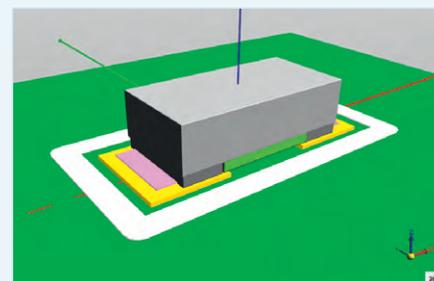
Библиотека электронных компонентов Delta ЭКБ дополнена продуктами отечественного разработчика и производителя резисторов промышленного и специального назначения АО НПО «ЭРКОН».

Сейчас библиотека содержит несколько серий СВЧ-резисторов P1-85, P1-158, P1-160, серию низкоомных резисторов P2-105 и чип-индуктивности серий КИФ и КИК. Пользователи САПР Delta Design 3.0 теперь могут применять в своих проектах все ком-

поненты библиотеки для этих резисторов: УГО, посадочное место и 3D-модель.

САПР Delta Design теперь поддерживает защищённые библиотеки, подписанные разработчиком и/или поставщиком такой библиотеки. Защищённая библиотека разрешает пользователям использовать компоненты в своих проектах без возможности внесения изменений как в саму библиотеку, так и в её компоненты.

В результате сотрудничества двух российских компаний в новый продукт компании ЭРЕМЕКС для проектирования РЭА была интегрирована электронная библиотека компонентов, разработанная са-



мом производителем – АО НПО «ЭРКОН» (www.erkon-nn.ru). Это расширяет возможности инженеров при разработке электронного оборудования на отечественной элементной базе.

www.eremex.ru

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

85" ЖК-дисплей с яркостью 2000 кд/м² и форматом изображения UHD

Компания LITEMAX Electronics Inc. предлагает 85" TFT-дисплей семейства DURAPIXEL серии DLH8500-INU-N01, снабжённый высокопроизводительной платой управления AD2796DHP, разработанной специально для поддержки промышленных приложений с высокой яркостью. Плата обеспечивает управление параметрами дисплея (яркость, контрастность, цвет, фаза, синхронизация) через экранное меню с помощью 5-кнопочной клавиатуры, и поддерживает работу с источниками видеoinформации DVI-D, HDMI, DP. Дисплей DLH8500-INU-N01 способен обеспечить яркость свечения экрана до 2000 кд/м², а драйвер светодиодной системы подсветки LID85C обеспечивает регулировку яркости в широком диапазоне.

В конструкциях дисплея применяются светофильтры с высоким коэффициентом пропускания, поляризаторами с высоким



пропусканием, что обеспечивает низкую потребляемую мощность. Дисплей предназначен для применения в информационных киосках, демонстрации рекламных роликов, пунктах продажи, конференц-залах, студийной аппаратуре.

Основные свойства:

- считывание изображения при прямом солнечном свете;
- светодиодная система подсветки;
- высокое разрешение 4K, 2K;
- высокая устойчивость к воздействию механических ударов и вибраций;

- низкая потребляемая мощность;
- высокое насыщение цвета, великолепная яркость изображения;
- длительная работа в режиме 24/7;
- элегантная низкопрофильная конструкция;
- среднее время наработки до отказа (MTBF) системы подсветки: 100 000 ч. Более детальные характеристики DLH8500-INU-N01:

- рабочее поле экрана 1872 × 1053 мм;
- яркость 2000 кд/м²;
- разрешение 3840 × 2160 пикселей (формат изображения UHD);
- контрастность 4000:1;
- шаг пикселя 0,4875 × 0,4875 мм;
- угол обзора 178° в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- время электрооптического отклика 9,5 мс;
- потребляемая мощность 827 Вт;
- входное напряжение 100...240 В переменного тока;
- габариты: 1092 × 1083 × 103,62 мм;
- вес 58 кг.

www.prochip.ru

27" ЖК-дисплей высокой яркости с проекционно-ёмкостным сенсорным экраном для применения в морской аппаратуре

Компания Litemax Electronics расширила серию NAVPIXEL™ жидкокристаллических дисплеев высокой яркости для применения в морской аппаратуре моделью NPD2706-ATA-P01 с размером диагонали 27", оснащённой проекционно-ёмкостным сенсорным экраном (прозрачность 90%). Преимущества мониторов с сенсорными экранами хорошо известны:

- взаимодействие с компьютером посредством касания упрощает работу и значительно ускоряет ввод данных;
- при наличии грамотно реализованного интерфейса, с ними может работать даже неопытный компьютерный пользователь;
- они позволяют создавать физически защищённую интерактивную систему.

Яркость изображения новой модели 1200 кд/м² обеспечивается светодиодной системой подсветки. Обеспечивается разрешение 1920 × 1080 точек (поддержка всех видео форматов высокой чёткости – Full HD). Контрастность изображения: 3600:1. Угол обзора по горизонтали и вертикали составляет 178°. Активная площадь экрана 597,6 × 336,15 мм. Время отклика



12 мс. Дисплей имеет входы: VGA (2), DVI-D (2), HDMI (1), DP (1), USB (1), композитный сигнал (1) и RS-232 (1). Степень защиты корпуса из прочного алюминиевого сплава IP65 (по передней поверхности). Дисплей NPD2706-ATA-P1 способен работать в диапазоне температур –10...+50°C, диапазон температур хранения –20...+70°C. Питание от сети постоянного напряжения с диапазоном 9...36 В. Среди достоинств новинки: длительный ресурс и низкая потребляемая мощность (62 Вт). Высокая надёжность и длительный ресурс обеспечивается применением технологии Advanced Optical Bonding

(передовое оптическое соединение): воздушное пространство между стеклом передней панели и жидкокристаллическим модулем заполняется специальным веществом, при этом обеспечивается отличное качество изображения.

Основные технические характеристики NPD2706-ATA-P01:

- размер экрана по диагонали 27";
- рабочее поле 597,6 × 336,15 мм;
- яркость 1200 кд/м²;
- контрастность 3600:1;
- разрешение 1920 × 1080 пикселей;
- шаг пикселя 0,311 × 0,311 мм;
- угол обзора 178° в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- количество отображаемых цветов 16,7 млн;
- время электрооптического отклика 5 мс;
- плата управления AD8220GDHPVR;
- степень защиты IP65 по передней панели при установке в консоль;
- установка заподлицо в панель, VESA совместимость;
- габариты алюминиевого корпуса, Ш×В×Г: 660 × 445 × 67 мм;
- вес 12,5 кг;
- напряжение питания от 9 до 36 В постоянного тока;
- потребляемая мощность 62 Вт;
- диапазон рабочих температур –10...+50°C;
- диапазон температур хранения –20...+70°C.

15,6" ЖК-дисплей с яркостью свечения 1800 кд/м² для применения в аппаратуре морской техники

Компания LITEMAX Electronics расширила семейство мониторов NAVPIXEL™, предназначенных для применения в морской технике, моделью NPD1569-ITA-P01 с размером экрана по диагонали 15,6". Монитор оснащён проекционно-ёмкостным сенсорным экраном, который управляется через порт USB. Прозрачность экрана 90%. Сенсорный экран обеспечивает прочному промышленному монитору с яркостью свечения экрана 1800 кд/м² дружелюбный интерфейс и чёткость изображения при ярком прямом свете. Низкопрофильный корпус монитора изготовлен из алюминия и выполнен фрезерованием, что обеспечивает небольшой вес и водонепроницаемость. Кроме того, высокая энергетическая эффективность и низкая рассеиваемая мощность обеспечивает стабильность и долговечность, требуемые в ответственных приложениях. Высокая надёжность и длительный ресурс обеспечивается также применением тех-



нологии Advanced Optical Bonding (передовая оптическое соединение): воздушное пространство между стеклом передней панели и ЖК-модулем заполняется специальным веществом, при этом обеспечивается отличное качество изображения. Дисплей поддерживает функцию picture-to-picture, обеспечивающую возможность отображения картинки одновременно от двух источников. Функция «ночного режима» позволяет мгновенно снизить уровень яркости до минимального значения 0,5 кд/м².

Основные технические характеристики NPD1569-ITA-P01:

- размер экрана по диагонали 15,6";
- рабочее поле экрана 344,16 × 193,59 мм;
- яркость 1800 кд/м²;
- контрастность 1200:1;
- разрешение 1920 × 1080 пикселей (формат изображения FullHD);
- шаг пикселя 0,17925 × 0,17925 мм;
- угол обзора 170° в горизонтальной и вертикальной плоскостях;
- количество отображаемых цветов 16,2 млн;
- время электрооптического отклика 25 мс;
- входы: VGA ×1, DVI-D ×1, HDMI ×1, DP×1, композитный сигнал ×1, RS232×1, USB×1;
- плата управления AD8220GDHPVR;
- степень защиты IP65 по передней панели при установке в консоль;
- установка заподлицо в панель, VESA-совместимость;
- габариты, Ш×В×Г: 393,9 × 285 × 61,2 мм;
- масса 5,2 кг;
- напряжение питания от 9 до 36 В постоянного тока;
- потребляемая мощность 32 Вт;
- диапазон рабочих температур от -30 до +80°C;
- диапазон температур хранения от -30 до +85°C.

www.prochip.ru

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Новые диодные датчики средней мощности до 67 ГГц

Компания Rohde&Schwarz представила новые диодные датчики средней мощности NRP67S с USB-интерфейсом и NRP67SN с LAN-интерфейсом для измерений мощности СВЧ-излучения в коаксиальном тракте 1,85 мм в диапазоне частот от 50 МГц до 67 ГГц. Широкий диапазон частот, диапазон измеряемых мощностей -70...+20 дБмВт, высокая скорость (до 10 тысяч измерений в секунду) и точность выгодно отличают прибор Rohde&Schwarz на фоне датчиков мощности других производителей. В насто-

ящее время диапазон частот до 60 ГГц используется в стандартах передачи данных IEEE802.11ay, 802.11ad WiGig Wireless LAN, линиях передачи миллиметрового диапазона на малые расстояния и спутниковых системах связи. Датчики мощности NRP67S/SN могут выводить данные измерений на ПК с бесплатным ПО или модуль индикации NRX. Блок индикации NRX позволяет производить высокоточные измерения отношений пиковой мощности с нескольких датчиков благодаря специальным линиям синхронизации АЦП, встроенном в каждый датчик. Также NRP67S/SN могут подключаться к ге-



нераторам сигналов SMA100В для контроля и компенсации потерь, вызванных неравномерностью АЧХ высокочастотных кабелей в диапазоне частот до 67 ГГц.

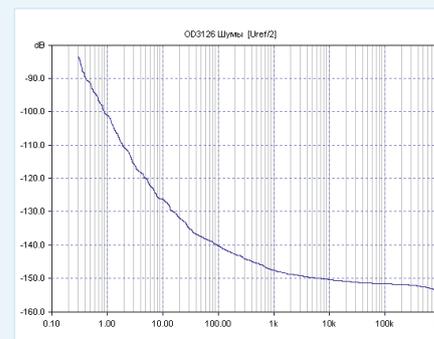
Больше информации можно найти на сайте компании www.rohde-schwarz.com

Термостатированные генераторы ГК205 от АО «Морион»

АО «Морион» серийно выпускает термостатированные генераторы ГК205 на диапазон частот 20...50 МГц, отличительной особенностью которых является использование умножения частоты кварцевого резонатора. Это позволяет получить характерные для низкочастотных генераторов жёсткие параметры долговременной и температурной стабильности частоты, а также фазовых шумов при отстройке на 1 Гц, значительно превосходящие харак-

теристики генераторов, работающих на прямой частоте резонатора. При этом обеспечивается подавление субгармоник на выходе генератора до уровней -5 дБ и более по отношению к основному сигналу.

В частности, данные генераторы на частотах 22,5792 и 24,576 МГц, а также 45,1584 и 49,152 МГц находят широкое применение в топовых моделях аудиоаппаратуры. Пример типовых фазовых шумов для генератора с умножением на четыре на частоту 49,152 МГц (12,288×4) приведён справа. Габариты генератора 27×36×12,7 мм.



Подробнее с данным генератором можно ознакомиться на сайте www.morion.com.ru

НОВЫЙ ГЕНЕРАТОР КОМПАНИИ ROHDE & SCHWARZ SMM100A

Компания Rohde&Schwarz представила новый генератор среднего класса SMM100A. До настоящего времени в среднем классе векторных генераторов компании были модели SMBV100B и SGT100A с частотным диапазоном до 3 ГГц или до 6 ГГц. Новый генератор дополняет линейку моделями до 6/7/12,75/20/31,8/44 ГГц, с полосой формируемых сигналов до 120/240/500/1000 МГц (в зависимости от опций). Сочетание высокой частоты несущей, широкой полосы сигналов и большой глубины памяти генератора произвольных сигналов (до 2 млрд отсчётов) позволяет использовать генератор SMM100A для испытаний устройств в области телекоммуникаций (в том числе устройств 5G в диапазонах частот FR1 и FR2), приёмников сигналов стандарта 802.15.4z, WLAN IEEE802.11be, модемов для спутниковой связи, радиорелейных линий. Отличительной особенностью новой модели является высокое качество формируемых цифровых сигналов – измеренное значение неравномерности АЧХ в полосе модуляции 1 ГГц на частотах несущей от 5 ГГц до 35 ГГц



не превышает 0,2 дБ, модуль вектора ошибки EVM на частоте 28 ГГц не более 0,8%, что является превосходным показателем. Данный генератор стоит в среднем на 15–20% дешевле генератора высшего класса SMW200A с аналогичным функционалом, что делает его привлекательным для использования в условиях производства. Низкий фазовый шум на уровне –134 дБн/Гц (тип) на частоте 1 ГГц при отстройке 20 кГц от несущей позволяет тестировать радарные системы тем пользователям, кто пишет свои сигналы в среде MATLAB. Наличие опции SMW-K520 наделяет генератор возможностью формировать

сигналы распространённых видов модуляций (таких как BPSK, QPSK, QAM, APSK, FSK и т.д.) в реальном времени прямо из меню прибора, не прибегая к использованию внешнего ПК. Большинство опций в генераторе открываются постоянными или временными программными ключами, что позволяет гибко планировать бюджет на контрольно-измерительное оборудование по мере необходимости. Обязательными аппаратными опциями являются только опции выбора частотного диапазона, генератора произвольных форм и фазовой когерентности. Больше информации можно узнать на сайте компании.

www.rohde-schwarz.com

ПРОГРАММИРУЕМЫЕ 1500-ВАТТНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ AC/DC ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ И ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

Компания XP Power представляет программируемые источники питания AC/DC серии PLS1500, которая является дополнением 600-ваттных источников питания серии PLS600 и предназначенные для более мощного силового оборудования в обширном ряде промышленных и лабораторных применений. Типичными применениями новых источников питания являются автомобильное и авиационно-космическое испытательное оборудование, производство полупроводников, теле- и радиовещательное, медицинское и телекоммуникационное оборудование.

Пять источников питания серии PLS1500 с выходной мощностью 1500 Вт обеспечивают выходные напряжения 30, 50, 100, 200 и 400 В. До четырёх блоков питания могут быть соединены параллельно (режим «ведущий/ведомый») для обеспечения более высокой мощности (6 кВт) и до двух блоков могут быть соединены последовательно для формирования более высокого напряжения (до 800 В) и мощности.

Цифровые поворотные элементы управления на передней панели обеспечивают



удобную регулировку выходного напряжения и тока. Так как органы управления чувствительны к скорости, медленное вращение позволяет производить точную настройку с точностью 0,1%. Встроенные 12-разрядный цифро-аналоговый и аналого-цифровой преобразователи позволяют также измерять напряжение и ток с аналогичной степенью точности. Эта возможность экономит средства и пространство для дополнительных измерительных приборов.

Установленные на задней панели порты позволяют осуществлять дистанционное управление через USB, Ethernet и аналоговые входы управления. Входы USB и Ethernet совместимы со стандартными командами для программируемых приборов (Standard Commands for Programmable Instruments, SCPI). Источники поддерживаются драйверами LabVIEW™ и IVI (Inter-

changeable Virtual Instruments). Источники питания серии PLS1500 сертифицированы также на соответствие требованиям коммуникационного стандарта LXI (LAN eXtensions for Instrumentation) для промышленной сети на базе стандартных сетей Ethernet.

Внешняя обратная связь позволяет использовать источники питания с нагрузками, которые расположены на удалении от них. Для исключения повреждений испытуемых устройств функции защиты от перенапряжений, перегрузки по току и мощности ограничивают ток и напряжение на выходе.

Все модели серии PLS1500 сертифицированы на соответствие требованиям стандартов безопасности IEC60950-1 и IEC62368-1 (EN/UL/CSA). В соответствии с требованиями к электромагнитной совместимости Directive89/336/EEC по Class A модули имеют маркировку CE.

www.prochip.ru

Коммуникации в эпоху 6G

Часть 1

Хариш Вишванатан, Пребен Могенсен (Nokia Bell Labs)

В статье рассматриваются перспективы внедрения сети 6G, при этом внимание уделяется не только технологиям, но и человеческой трансформации, которая ожидается с приходом шестого поколения связи. Такой подход помогает получить представление о требованиях к производительности и принципах проектирования 6G.

Вступление

В то время как развёртывание систем 5G идёт полным ходом, специалисты в области разработки систем коммуникации всё больше внимания уделяют будущим вызовам, связанным с 6G. Как известно, поколения сотовых систем меняются раз в 10 лет. Ожидается, что стандартизация и развёртывание связи шестого поколения произойдёт к 2030 году.

Авторы статьи попытались нарисовать картину коммуникационных потребностей и технологий во времена появления 6G. Возможно, некоторые из требований уже могут быть выполнены за счёт добавления новых технологий в структуру 5G. Для удовлетворения растущих запросов к производительности в рамках эволюции 5G ожидается введение модификаций, которые могут быть внесены обратно совместимым образом и по разумной цене. С другой стороны, модификации, являющиеся фундаментальными и несовместимыми с существующей структурой 5G, могут быть включены только ценой высоких затрат для сети или устройств.

Ожидается, что, помимо усовершенствованной мобильной широкополосной связи для потребителей, 5G

приблизит наступление четвёртой промышленной революции (индустрии 4.0) за счёт дигитализации и подключения всех устройств в одну экосистему. Цифровые двойники различных объектов, созданные в облаке, составят фундамент будущего цифрового мира. Миры физических и биологических цифровых двойников объектов станут важной платформой для новых цифровых услуг будущего. Реализация всеобъемлющего цифрового мира, который является полным и истинным представлением мира физического в каждом пространственном и временном моменте, потребует огромной пропускной способности при малой задержке.

Цифровизация также проложит путь к созданию новых виртуальных миров с цифровыми представлениями воображаемых объектов, которые могут быть в различной степени смешаны с миром цифровых «близнецов», что создаст тем самым смешанную реальность, сверхфизический мир.

Со временем умные часы и пульсометры преобразятся в пластыри для кожи, пищевые добавки, имплантаты для тела. Все биологические процессы внутри человека можно будет точно и непрерывно отслеживать. При этом информа-

ция начнёт отображаться в цифровом и виртуальном мирах, что откроет новые, сверхчеловеческие возможности.

Связь будущего – это бесшовная интеграция различных миров (см. рис. 1), призванная создать единый опыт для людей или, скажем, интернет-киборгов. При рассмотрении такого будущего в дополнение к новым коммуникационным потребностям возникает ещё несколько тем:

1. тема конечных устройств: от единичных до совокупности множества локальных сущностей, действующих как единый механизм, человеко-машинный интерфейс;
2. тема повсеместных универсальных вычислений, распределённых между несколькими локальными устройствами и облаками;
3. системы знаний, которые хранят, обрабатывают и преобразуют данные в практические знания;
4. точное определение положения и приведение в действие устройств для управления физическим миром.

Авторы статьи рассматривают уникальную и более широкую перспективу внедрения сети 6G, фокусируясь не только на технологиях, но и на человеческой трансформации. Такой подход помогает получить представление о требованиях к производительности и принципах проектирования 6G. Технологические преобразования будут охватывать и те области, в которых развивается 5G. Также преобразования могут произойти в процедурах стандартизации, необходимых для работы с открытыми платформами.

Во втором разделе статьи будет более подробно рассмотрено, каким может стать мир в 2030-х годах, и на основании этого продуманы сценарии использования 6G. В третьем разделе указаны потенциальные требования и показатели эффективности, которые будут отличать 6G от систем связи прошлых поколений. В четвёртом разделе обсуждены некоторые новые фундаментальные аспекты, которые следует учитывать при проектировании радиоинтерфейсов 6G. В пятом разделе рассматриваются технологии, которые могут лечь в основу сотовых сетей нового поколения. В шестом обсуждается взаимодей-

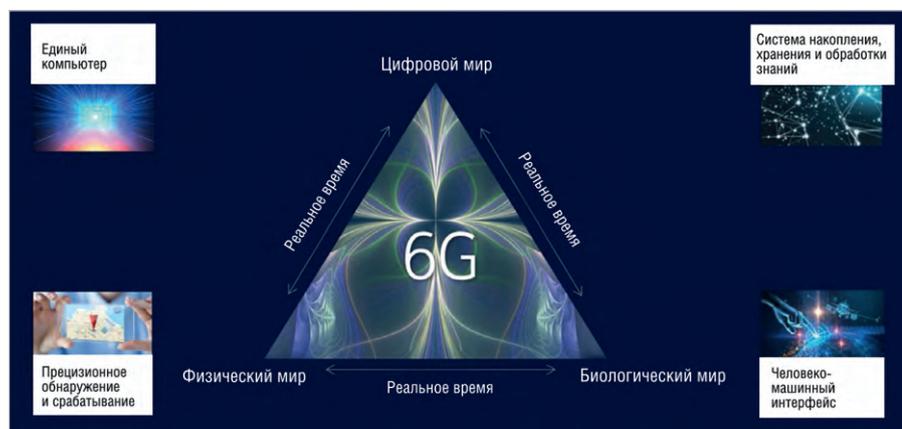


Рис. 1. 6G для взаимодействия физического, биологического и цифрового миров

ствии открытой платформы будущего и мобильных сетей, направленное на удовлетворение всё более специализированных требований для эволюции стандартизации. Шестой раздел завершается кратким резюме.

Для каких целей будет использоваться 6G

Как будет выглядеть жизнь и цифровое общество после 2030 года? Начнём с устройств, используемых для подключения к Сети. Несмотря на то что смартфоны и планшеты всё ещё будут существовать, вероятно, появятся новые, человеко-машинные интерфейсы, которые сделают получение и контроль информации гораздо более удобными. Авторы статьи ожидают, что:

- носимые устройства, такие как наушники-вкладыши и гаджеты, встроенные в одежду, умные кожные пластыри и биоимплантаты, станут обычным явлением;
- возможно, люди начнут полагаться на новые сенсоры мозга для приведения машин в действие. Появится несколько носимых устройств, легко взаимодействующих с человеком через интуитивно понятные интерфейсы. На рисунке 2 показана потенциальная эволюция устройств;
- набор текста на сенсорном экране, скорее всего, устареет. Жестикуляция и голосовой ввод станут нормой;
- устройства, используемые сегодня, будут полностью контекстно-зависимы. Сеть продолжит усложняться для более точного прогнозирования потребностей человека. Понимание устройствами контекста в сочетании с новыми человеко-машинными интерфейсами сделает взаимодействие с физическим и цифровым мирами гораздо более понятным и эффективным. Вычисления, необходимые для этих устройств, скорее всего, не все будут производиться в самих устройствах. Такое решение будет обусловлено форм-фактором и более экономичным потреблением батареи в устройствах. Скорее всего, для выполнения задач за пределами облака гаджетам придётся полагаться на вычислительные ресурсы локального компьютера. Всё это говорит о том, что сети начнут играть значительную роль в человеко-машинном интерфейсе завтрашнего дня.

Потребителей ожидает следующее:

- автомобили с автономным управлением выйдут на масс-маркет к 2030-м годам. Большую часть вре-

мени машины будут управляться без участия человека, однако в некоторых случаях всё же без удалённого водителя или пассажира за рулём не обойтись. Массовое использование автопилотов существенно увеличит время для потребления контента из Интернета: развлечений, социальных сетей и образовательных медиа. Сами автомобили также начнут потреблять значительно больше информации. Данные датчиков транспортных средств будут загружаться в Сеть в режиме реального времени, будут автоматически загружаться карты с высоким разрешением, а находящиеся рядом автомобили станут напрямую связываться друг с другом;

- в качестве датчиков будут массово использоваться беспроводные камеры. Благодаря достижениям в области искусственного интеллекта (ИИ) и машинного зрения, компьютер уже может распознавать людей и объекты (или, в более общем плане, автоматически выделять информацию из изображений и видео). Камера станет универсальным датчиком, используемым повсеместно. Проблемы конфиденциальности будут решены путём ограничения доступа к данным и анонимизации информации. Кроме того, для сбора информации об окружающей среде будет использоваться радиозондирование, а также другие методы определения положения, в частности с помощью акустики;
- в системах безопасности будут использоваться передовые методы. Комбинация различных способов восприятия будет использоваться для идентификации людей в толпе не только у входов в общественные здания. Радиозондирование окажется важным компонентом для решения этой задачи;
- цифровые деньги и ключи станут нормой, поскольку транзакции как в физическом, так и в цифровом мире станут проводиться с помощью множества устройств. Сеть будущего должна обеспечивать безопасность и конфиденциальность – эти два критерия имеют фундаментальное значение для цифровой трансформации;
- бытовых роботов станет больше, и это будут не только роботы-пылесосы и газонокосилки. Новые устройства смогут группироваться для выполнения более серьёзных задач. Роботы будут оснащены видекамерами с потоковой передачей данных для об-

работки на локальный сервер. С увеличением количества устройств повысятся требования и к пропускной способности домашних сетей;

- здравоохранение претерпит существенные изменения: круглосуточный мониторинг жизненно важных параметров как для здоровых, так и для больных людей с помощью многочисленных носимых устройств. Мониторинг состояния здоровья будет осуществляться с помощью внутренних и внешних устройств.

Переход к индустрии 4.0 и первая волна автоматизации с поддержкой беспроводной связи произойдут до 2030-х годов. Сети 5G, обеспечивающие сверхнадёжную связь с малой задержкой (URLLC), упростят для облаков обработку данных в реальном времени. Однако промышленные варианты использования, основанные на гораздо более жёстких требованиях к беспроводной связи, потребуют 6G:

- голографическое дистанционное присутствие станет нормой как для работы, так и для социального взаимодействия. Например, человек вещает из офиса, а на самом деле – из салона автомобиля. Будут созданы системы, объединяющие реальные выражения лица с виртуальным «я» в цифровом представлении любого физического мира;
- массовое использование мобильных роботов и дронов в различных отраслях: гостиничном бизнесе, здравоохранении и логистике;
- динамические цифровые двойники станут точными и будут синхронизироваться с физическим миром.

Основываясь на приведённой ранее концепции будущего, можно предположить следующие ключевые варианты использования устройств (см. таблицу).

Шесть требований и ключевых показателей эффективности 6G

Множество новых сценариев использования будут определять требования, которые должны быть учтены в 6G. Ключевые показатели производительности (KPI) 5G (скорость, пропускная способность, объём передачи данных, задержка, надёжность, масштабируемость и гибкость) будут важными показателями производительности и для 6G. Несколько новых характеристик также станут значимыми: на рисунке 2 сгруппированы требования для 6G. Всего там шесть категорий – три категории с KPI, аналогичными 5G, и три новые:

Таблица. Примеры использования 6G

Вариант использования (возможности)	5G	6G
Дополненная реальность для промышленности	Задачи низкого разрешения и высокого уровня	Высокое разрешение, мультисенсорные и подробные задачи, совместный дизайн
Телеприсутствие (ёмкость)	Высокое качество видео, ограниченный масштаб	Смешанная голографическая реальность
Наблюдение за безопасностью, обнаружение дефектов (позиционирование и зондирование)	Внешнее зондирование, ограниченная автоматизация	Интегрированное, полностью автоматизированное радиообнаружение
Распределённые вычисления, автоматизация (синхронизация времени)	Задачи микросекундного уровня	Задачи наносекундного уровня с более высокой точностью
Динамические цифровые двойники и виртуальные миры (мультисенсорное картографирование и рендеринг в реальном времени)	Нет	Да
Беспроводная связь в центре обработки данных (пиковые скорость и ёмкость)	Нет	Да
Устройства с нулевым энергопотреблением (обратное рассеяние)	Нет	Да
Группирование роботов и дронов	Может быть	Да
Искусственный интеллект и биосенсоры	Ограничено	Да



Рис. 2. Вероятная эволюция устройств



Рис. 3. Основные требования и характеристики 6G. Обнаружение объекта характеризуется числом пропущенных объектов и ложными срабатываниями

1. локализация и обнаружение с помощью сети связи окажутся важной особенностью 6G. Точность и аккуратность – главные критерии качества локализации и обнаружения. Будет достигнута точность позиционирования до сантиметра. Также точность обнаружения объекта станет измеряться с точки зрения вероятности пропуска обнаружения (missed detection – MD), ложной тревоги (false alarm – FA) и ошибок оценки параметров;

2. сети начнут проектировать с использованием искусственного интеллекта, встроенного в различные узлы. То, насколько быстро ИИ адаптируется к новым условиям в сети, является важным показателем. Сетевая автоматизация станет нормой, и поэтому другим важным критерием станет то, насколько близка сеть к полной автоматизации, для которой вообще не требуется человеческое вмешательство;

3. настоящая революция с приходом 6G произойдёт в конечных устройствах. Во многих сценариях они начнут развиваться как сеть устройств или подсеть, осуществляющая соединение нескольких частей одной машины. Появится гораздо более интуитивно понятный интерфейс с управлением посредством жестов, а не набора текста. Также, вероятно, активно начнут продвигаться на рынок устройства с очень низким энергопотреблением и даже, возможно, без батарей, поскольку для питания устройства будет использоваться сеть.

Шесть основных аспектов проектирования сетей 6G

Как и до появления 5G, три основных параметра (измерение спектра, спектральная эффективность и пространственное повторное использование) задавали путь наращивания пропускной способности (см. рис. 3). Тенденция продолжится и с развёртыванием 6G. Радиочастотные технологии будут продвигаться к экономичному использованию спектра на ещё более высоких частотах. Есть возможность как минимум десятикратного увеличения спектра за счёт перехода в терагерцовые диапазоны частот.

Спектральная эффективность улучшится путём использования массивного многопользовательского многоканального обмена данными (MIMO) не только в сантиметровых (cmWave), но и в миллиметровых (mmWave) диапазонах по мере перехода от аналогового к гибриднему/цифровому формированию луча в нижних диапазонах. Поскольку стоимость массового MIMO падает, для дальнейшего повышения спектральной эффективности могут быть развёрнуты ещё более крупные массивы.

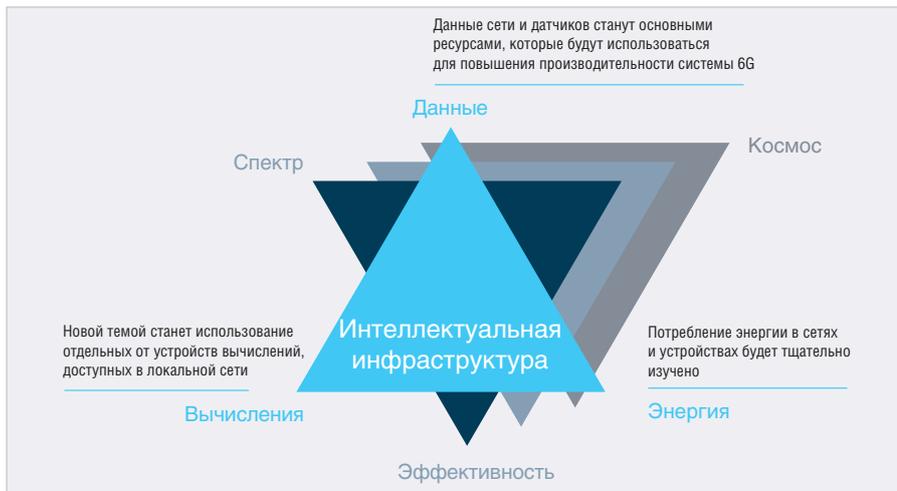


Рис. 4. Три новых фундаментальных аспекта проектирования системы

Уплотнение сети, несомненно, продолжится не только ради пропускной способности. Уплотнение необходимо для обеспечения большего покрытия в более высоких частотных диапазонах, с более высокими скоростями передачи данных и большей надёжностью. Кроме того, расширится и доступ к частотному спектру. Совместное использование операторами лицензированного спектра на основе программно-определяемого радио (SDR), ИИ и машинного обучения (МО) позволит многократно использовать спектр частот. Эффективное повторное использование спектра особенно важно в нижних диапазонах, поскольку последние обладают хорошими характеристиками распространения вне зоны прямой видимости (NLOS). Ресурсы спектра в этих диапазонах ограничены.

Шестое поколение связи будет коренным образом отличаться от предыдущих поколений тем, что в дополнение к упомянутым трём традиционным измерениям появятся ещё три (голубой треугольник на рис. 3). Эти измерения представляют собой фундаментальные ресурсы данных, вычислений и энергии.

Методы ИИ и машинного обучения основаны на обработке данных. Тот, кто имеет доступ к большим объёмам предметно-ориентированных данных, будет успешнее применять эти методы. Фундаментальное значение в проектировании систем 6G будут иметь ИИ и МО. Сетевые и сенсорные данные станут базовыми ресурсами, используемыми для повышения производительности системы.

Хотя вычислительная мощность всегда была важным параметром для сотовых систем, два тренда указывают на то, что вычислительная мощность как ресурс постепенно ограничивается. Первая тенденция – это растущее коли-

чество транзисторов, которые можно упаковать в единицу объёма, что ограничивает вычислительную мощность устройств. Вторая тенденция: для расширения возможностей восприятия человека будет использовано множество гаджетов, таких как очки, наушники и другие носимые устройства, имеющие очень малые форм-факторы и, следовательно, ограниченные по вычислительным возможностям.

Текущий подход к вычислениям, производимым в облаке, вряд ли будет достаточным для удовлетворения потребностей в синхронных вычислениях на различных устройствах. Использование локально доступных, но отдельных от устройств вычислений станет новой темой. Вычисления должны рассматриваться как ещё одно важное измерение, определяющее дизайн новой системы связи.

Энергоёмкость каждого элемента сети будет определять производительность. У некоторых типов устройств затраты энергии будут близки к нулю: на базовых радиостанциях будут выставлены ограничения по энергопотреблению, а также ограничения по мощности в центрах обработки данных.

К 2030-м годам предметом пристального внимания станут решения в области изменения климата, растущее энергопотребление сетей и устройств. Энергоэффективность становится ещё одним важным аспектом при разработке 6G. Качество связи шестого поколения будет оцениваться шестью фундаментальными параметрами. Именно эти параметры необходимо изучить исследователям для достижения целевых показателей эффективности (см. рис. 4).

В продолжении статьи мы расскажем о шести ключевых технологиях, на которых будет базироваться 6G. ☺



Компактные высоковольтные преобразователи напряжения



ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЕ И СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ

Технические параметры

- Входное напряжение 5, 12, 24 В
- Выходные напряжения от 2 до 10 кВ
- Мощность от 2 мВт до 15 Вт
- Диапазон температур от -55 до +70°C
- Длительный ресурс

Применение

- Медицинская диагностика
- Научное оборудование
- Авиационно-космическая техника

ProCHIP
POWERED BY PROSOFT



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 232-2522 • INFO@PROCHIPRU • WWW.PROCHIPRU

Решение для энергоснабжения системы выращивания коралловых рифов CCell и Vicor

Рори Бакстер (Vicor Corporation)

В статье рассказывается об инновационном способе энергосбережения в системе, которая помогает восстанавливать коралловые рифы для сохранения береговой линии и защиты проживающих на ней людей.

По последним данным, более 70% береговых линий на планете разрушаются в результате эрозии, при этом жизнь 200 миллионов человек во всём мире зависит от защиты, создаваемой коралловыми рифами. Есть мнение, что 99% существующих рифов исчезнут к 2040 году. Это создаёт серьёзные риски для проживания и благополучия людей в Мексике, Индонезии и множестве мелких островных поселений во всём мире.

Цель проекта CCell Renewables – борьба с береговой эрозией и развитие морских экосистем путём восстановления повреждённых коралловых рифов и выращивания новых.

Доктор Вольф Гильберц изобрёл революционную методику, основанную на электролизе морской воды. Методика позволяет всего за 5 лет создать невероятно прочную известняковую скалу, на формирование которой в обычных условиях потребовались бы сотни лет. Гильберц выращивал небольшие рифы, а CCell сегодня создаёт намного более крупные структуры, которые окажут значительное положительное влияние на прибрежную экосистему.

Исследования показывают, что общая энергия волн растёт на 0,4% в год из-за потепления океанических вод. Если сократить энергию волн на 5–8%, восстанавливая и создавая рифы, то можно снизить ударное воздействие волн на берег до уровня примерно 20-летней давности и полностью остановить береговую эрозию.

Для этого следует предоставить известняковую основу без посторонних примесей, на которой растут кораллы. Она должна иметь прочную молекулярную структуру и быстро расти. Процессу электролиза требуется точность, и он не должен идти слишком быстро или медленно. Если слишком медленно – ничего не вырастет, слишком быстро – известняк не удастся заселить.

Точность и энергетические трудности

Масштабное выращивание устойчивых коралловых рифов вдалеке от развитой инфраструктуры и в нескольких сотнях метров от берега связано со множеством трудностей. Однако инженерам CCell удалось разработать для такой задачи инновационное решение.

Ещё одна цель CCell – использовать для энергоснабжения систем выращивания рифов возобновляемые источники энергии, такие как солнце, ветер и волны. Выбор источника обычно определяется расстоянием от рифа до береговой линии. Для эффективной борьбы с эрозией океанские волны должны рассеиваться примерно за 300 м до берега.

Для выращивания 360 м² кораллового рифа требуется около 2 кВт энергии. Теоретически волновые энергетические установки (см. рис. 1) могут быть дороже солнечных панелей, однако чем дальше от берега они располагаются, тем выше эффективность преобразования энергии волн. В нескольких проектах, над которыми сейчас работает CCell, преобразователи располагаются на рифах дальше 700 м от берега. Помимо использования своей системы для восстановления повреждённых участков рифов, компания обсуждает устройство трёхсотметрового рифа всего в 70 м от берега. Эта система будет питаться солнечной и волновой энергией.

Все возобновляемые источники энергии имеют одно общее свойство: при выработке электроэнергии выходное напряжение крайне нестабильно из-за постоянно меняющихся окружающих условий.

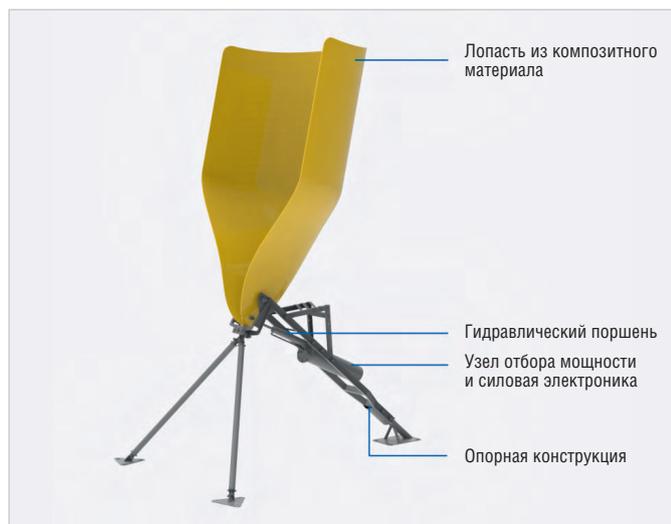


Рис. 1. Главный силовой генератор CCell, основанный на преобразователе волновой энергии компании Vicor



Рис. 2. Сеть энергоснабжения CCell

Главный силовой генератор CCell основан на инновационном преобразователе волновой энергии, в котором прочная лопасть приводит в движение элементы гидравлической системы и вырабатывает электричество. Эта установка требует точной регулировки для выращивания коралла.

Помимо необходимости в нормализации широких колебаний входного напряжения, в процессе электролиза нужно учитывать состав морской воды, температуру и скорость потока через электроды (анод и катод), которые образуются стальной рамой. Все эти переменные нужно внимательно отслеживать, измерять и контролировать, чтобы разность потенциалов между анодами и катодами обеспечивала точно рассчитанный ток сквозь морскую воду. Это нужно, чтобы оптимизировать процесс электролиза и гарантировать рост прочных и устойчивых известняковых отложений (из карбоната кальция) из растворённых в морской воде минералов.

Рост рифов управляется за счёт точного контроля разности потенциалов электрического поля между электродами в пределах «обитаемой зоны», которая для системы CCell составляет от 1,2 до 4 В в зависимости от упомянутых условий окружающей среды.

Сеть энергоснабжения

Для выращивания 360 м^2 кораллового рифа требуется около 2 кВт энергии. Преобразователи волновой энергии, из которых состоит морская электростанция, размещаются в местах максимального выхода энергии вблизи береговой линии. Выходное напряжение преобразователей меняется в диапазоне от 35 до 70 В.

Сеть энергоснабжения (см. рис. 2) строится по следующему принципу: на первом этапе происходит преобразование, за которым следует регулирование в точке снятия мощности для систем мониторинга и управляющей электроники. Энергия передаётся по длинному кабелю к системе электролиза, размещающейся очень близко к стальной раме на дне океана, где восстанавливается или создаётся риф.

При мощности 2 кВт и разности потенциалов между электродами в зоне оптимальных значений (1,2...4 В) система питания электролитической установки должна выдавать ток до 1666 А на нижней границе диапазона напряжений. Эти условия привели разработ-

чиков сети энергоснабжения к нескольким проблемам:

1. входное напряжение, меняющееся в диапазоне от 30 до 70 В, преобразовывается и регулируется для управляющей системы на берегу, а электролитическая установка находится на рифе;
2. обеспечение передачи электроэнергии высокой мощности (2 кВт) на морскую электролитическую установку, находящуюся на расстоянии до 700 м от берега;
3. передача высокого тока (примерно до 1700 А) и поддержание напряжения на нужном уровне. Напряжение между электродами стальной сетки должно находиться в диапазоне 1,2...4 В, а система энергоснабжения должна уметь быстро корректировать напряжение и ток при постоянно меняющихся условиях.

Компания Vicor порекомендовала свою проверенную факторизованную архитектуру электропитания (FPA), поскольку полностью была уверена, что та соответствует всем требованиям и может обеспечить высокую плотность тока для минимизации размеров системы энергоснабжения, развёрнутой в океане. FPA включает мультипликатор тока, который также характеризуется способностью быстро реагировать на переходные процессы.

Факторизованная система электропитания

Стандартный преобразователь DC-DC выполняет две функции, реализованные в одном устройстве: преобразование и регулирование. Разработка Vicor факторизует (разделяет) функцию преобразователя DC-DC на два отдельных модуля: регулятор PRM и мультипликатор тока VTM. Архитектура и топология каждого устройства идеально подходят для нетривиальных задач энергоснабжения, стоящих перед CCell.

Во-первых, регулятор напряжения PRM способен повышать и понижать стабилизируемое напряжение в широком диапазоне изменений напряжения на входе. Благодаря топологии, при которой переключение силовых транзисторов происходит при нулевом напряжении (ZVS), регулятор обладает очень высокими КПД и удельной мощностью, а также позволяет легко создавать параллельные массивы для энергоснабжения большей мощности. Передача энергии до рифа осуществляется на

большое расстояние, поэтому требуемая мощность составляет почти 2 кВт, однако повышенное напряжение помогает уменьшить сечение кабеля и таким образом экономить энергию. Регулятор PRM не только работает в широком диапазоне входных напряжений, но и оптимизирован для передачи более высоких регулируемых напряжений и последующего преобразования модулем VTM.

VTM представляет собой резонансный высокочастотный нерегулируемый преобразователь напряжения, выходное напряжение которого равно входному напряжению, умноженному на постоянный коэффициент. Коэффициент преобразования называется К-коэффициентом. VTM работает как трансформатор DC-DC: если К-коэффициент равен 1:8, то выходное напряжение составляет 1/8 от входного, а усиление по току становится восьмикратным. Два модуля работают вместе: PRM точно регулирует напряжение для рифа, а VTM преобразует и передаёт ток на электроды.

PRM будет регулировать входное напряжение в диапазоне 36...70 В с учётом измеренных падений напряжения в силовых кабелях до рифа. Получаемое от преобразователя волновой энергии напряжение преобразовывается и подаётся на вход модулей VTM мощностью 9,6...32 В, которые с К-коэффициентом 1:8 выдают напряжение 1,2...4 В. В зависимости от постоянно меняющихся условий окружающей среды PRM регулирует подачу напряжения на модули VTM, чтобы на выходе получалось напряжение заданного уровня.

Выверенная подача электроэнергии на стальную раму обеспечивает извлечение из морской воды минералов, которые осаждаются на раме и формируют прочную известняковую структуру. После ручного засеивания кораллов на известняк, CCell может ускорить рост коралла на известняковой скале так, что коралл будет расти в 3 раза быстрее, чем в природных условиях.

Сегодня CCell создаёт в Мексике новый риф, размер которого составит $200 \times 6 \text{ м}$. Процесс выращивания хорошо проходит в регионах с тёплой водой, таких как Мексиканский залив и Карибское море, там известняк в сочетании с карбонатом кальция растворяется медленнее. В будущем предстоит решить аналогичную задачу для более холодных вод.



Нужное – читать, ненужное – не читать

Максим Селиванов (smv@siltech.ru)

В статье рассказывается о наиболее распространённых в России RFID-терминалах сбора данных (ридерах и считывателях), а также об их основных характеристиках.

Локации применения

Считыватели RFID делятся на две принципиальные категории: стационарные и мобильные. Стационарные постоянно находятся на одном месте и идентифицируют движущиеся объекты.

В свою очередь, стационарные считыватели можно разделить на два типа: те, которые соответствуют климатическим условиям улицы и другим сложным условиям; и те, которые соответствуют офисным, складским, цеховым и прочим условиям, характерным для внутренних помещений.

Также стационарные считыватели различаются по классу защиты от пыли и влаги IP (Ingress Protection Rating – степень защиты оболочки). Для помещений в основном используются стационарные ридеры, соответствующие классу IP54 (первая цифра – индекс степени защиты от твёрдых частиц, вто-

рая – от влаги). Для эксплуатации на открытых пространствах нужны ридеры с IP67 или 68. В России представлены модели считывателей для помещений торговых марок Zebra (см. рис. 1), Impinj и др., для улицы – SICK, Hopeland, Feig. Это производители, имеющие представительства в России, что важно по многим причинам.

Всё оборудование для ввоза в Россию должно быть сертифицировано. Обычно сертификацией занимается представительство компании или дистрибьюторы. Терминалы являются активным оборудованием, излучающим радиосигнал. Уличные терминалы и терминалы для помещений используют разные частоты, к каждому терминалу радиочастотный комитет предъявляет особые требования. Используемые частоты указываются в разрешительных документах.

Мобильные терминалы сбора данных применяются для идентификации различных объектов (как движущихся, так и неподвижных) и классифицируются по условиям эксплуатации. Мобильные терминалы гораздо лучше защищены от воды и брызг дождя. Например, если рассматривать вторую цифру в IP мобильных терминалов:

- «4» – это защита от конденсата и непрямого попадания;
- «7» – полная защита от влаги и воды: оборудование может быть погружено в воду, на него может воздействовать струя из брандспойта;
- «9» – стойкость к воде под давлением: нахождение под водой на глубине 1 м в течение часа в рабочем состоянии. Кстати, в защитных параметрах мобильных ридеров учтены особенности использования в условиях морского порта, где воздействие оказывает ещё и соляной туман.

Обязательное условие, предъявляемое к мобильным терминалам, – стойкость к падению и ударам. Терминалы этого типа должны не только не разбиваться, но и исправно выполнять свои функции после многократных падений. Более того, в российском климате важным фактором является стабильная работа считывающего оборудования при отрицательных температурах. Совмещение этих, прямо скажем, не самых приятных воздействий не должно сказываться на считывающих свойствах терминала.

Например, оборудование от Zebra можно неоднократно ронять при температуре –20°C, и при этом оно останется работоспособным; устройство сделано с большим запасом прочности и стойкости к перепадам температур. «Силтэк» проводил эксперимент: замораживал терминал Zebra до –60°C. При этом оборудование оставалось в

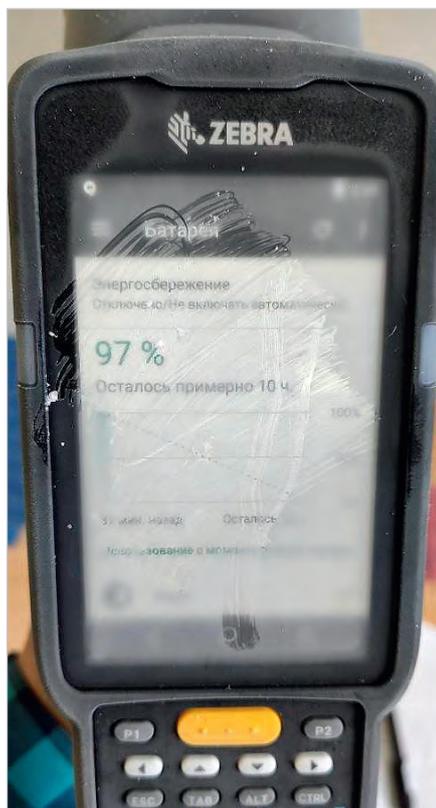


Рис. 1. ТСД после 10 минут при температуре –60°C



Рис 2. Стационарный считыватель Zebra FX9600



Рис. 3. Мобильный терминал Chainway C71

рабочем состоянии достаточное время для кратковременного сканирования (см. рис. 2). При работе на морозе было выделено несколько слабых мест устройства: экран, аккумулятор и перезарядка аккумулятора. Наиболее оптимально этот вопрос решён у моделей Zebra MC3390R и MC3330. После нажатия двух защёлок аккумулятор вытаскивается, так же легко вставить новый. Все настройки и данные при этом никуда не исчезают, терминал продолжает работать с той же самой точки, на которой остановился, практически мгновенно. Никакой перезагрузки данных не требуется. Внутренняя бэкап-батарея позволит сохранить сеанс в рабочем состоянии на время перезарядки аккумулятора.

Антенна, мощность, дальность

Размер антенны и излучаемая ею мощность имеют большое влияние на потребительские характеристики терминалов. При этом мощность должна строго соответствовать предписаниям действующего законодательства.

Мобильные терминалы имеют мощность в несколько раз ниже, чем стационарные. Исходя из этого, они считывают метки на более близком расстоянии. В мобильных ридерах используются антенны различных размеров. Например, у Zebra MC3390R одна из самых дальнобойных антенн, имеющая форму ковша и работающая чувствительно и направленно.

У терминала Chainway C71 (см. рис. 3) – одна из самых компактных антенн, благодаря которой терминал имеет небольшой размер и его можно носить в нагрудном кармане. Кроме

перечисленных марок на российском рынке есть достойные модели компаний Nordic и Cloud. Терминалы могут не только считывать метки, но и программировать их. Главное, чтобы этот функционал был заложен в программном обеспечении.

Стационарные ридеры всегда работают в компьютерной сети предприятия и взаимодействуют с сервером. Антенны могут встраиваться и являются частью моноблока (Nordic, SICK, Hopeland). Или, как вариант, ридеры могут иметь 24 антенных выхода. На рынке также представлены стационарные ридеры отечественных производителей, например устройства ОКБ «Планета» концерна РТИ.

К ридерам Zebra антенны всегда подсоединяются отдельно, с помощью коаксиальных кабелей длиной от 1 до 9 м и диаметром 5 мм. Если стационарные считыватели не соединены со своей антенной, они имеют выходы для внешних антенн. Кроме того, в стационарных терминалах применяются множители сигнала, тогда используется 4 порта выходов на антенну и можно дополнительно подключить коммутаторы. Такое решение позволяет получить суммарно 16 или даже 32 антенны. Каждый ридер работает на определённой операционной системе. На данный момент самыми популярными являются Linux-подобные системы. Но бывают и модели из прошлого на базе Windows CE. Или, наоборот, прорыв в будущее: ридер Chainway URA8 (см. рис. 4), который работает на OS Android 9.0 и к которому можно подключить через порт HDMI монитор.

От компактности антенны и излучаемой мощности зависит дальность счи-

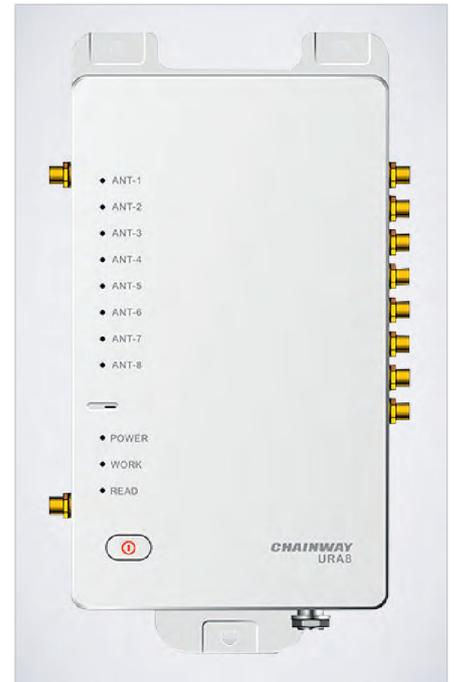


Рис. 4. Стационарный считыватель Chainway URA8

тывания. Ридеры с маленькими антеннами считывают метки на расстоянии 0,5...1,5 м. Мощные большие антенны «добивают» на 15...20 м. Так, мобильный терминал Zebra RFD8500 считывает метку на расстоянии 16 м в обычных офисных условиях. В среднем все RFID-метки создаются с параметрами, позволяющими «видеть» их на дистанции 5...8 м. Этого достаточно для 90% логистических операций.

Считывать метки на расстоянии 20 м зачастую не имеет смысла, потому что в поле ридера попадёт очень большое количество меток. Такое происходит, например, на складе. Многие думают, что нужно выбирать самую мощную антенну и самую чувствительную метку, чтобы с их помощью налаживать эффективный процесс инвентаризации. Однако когда ридеру одновременно «ответят» 10 тыс. меток со всех углов склада, коллапса не избежать. Подобные системы, работающие на дальние расстояния, хорошо использовать в режиме поиска какого-то маркированного актива. Мобильному ридеру задаётся номер, далее с помощью мощной антенны определяется направление, в котором находится товар на складе. Для инвентаризации, наоборот, уменьшают мощность ридеров, и считывают только то, что лежит в зоне осмотра.

Читать нужное и не читать ненужное – самая главная задача всех терминалов.



Инновации в производственных испытаниях базовых станций 5G миллиметрового диапазона

Норм Смит (Keysight Technologies)

В статье рассказывается об инновациях в выносных радиомодулях миллиметрового диапазона, а также об ужесточении требований к характеристикам систем тестирования базовых станций.

Вступление

Пандемия COVID-19 нарушила глобальные рынки сбыта, что предсказуемо повлияло на производственные цепи оборудования 5G. Это привело к тому, что некоторые страны объявили о задержках в своих планах по развёртыванию сетей 5G.

Несмотря на сложную глобальную экономическую ситуацию, вызванную пандемией, производители сетевого оборудования (NEM) и сетевые операторы реализуют план по наращиванию производства и развёртыванию сетей. Первое установленное оборудование 5G в основном было рассчитано на работу в диапазоне FR1 (от 410 МГц до 7,125 ГГц). На следующем этапе будет внедряться оборудование диапазона FR2 (от 24,25 до 52,6 ГГц), а точнее – 24,25...43,5 ГГц.

В связи с этим внимание акцентируется на проблемах увеличения объёмов производства высокопроизводительных базовых станций 5G NR и развёртывания малых сот миллиметрового диапазона.

Ужесточение требований к характеристикам систем тестирования базовых станций

Специалисты по производству ВЧ сетевого оборудования знают, что тестирование базовых станций в диапазоне FR2 (см. рис. 1) предъявляет повышенные требования к приборам для измерения таких радиочастотных характеристик, как модуль вектора ошибки (EVM) и относительный уровень мощности в соседнем канале (ACLR) в миллиметровом диапазоне.

На высоких частотах наблюдается неизбежное увеличение шума полупроводниковых приборов и гармонических искажений в ВЧ компонентах и подсистемах базовой станции. Это значительно усложняет выполнение требований к высокой производительности систем 5G. Например, выполнение требования относительно сверхмалой задержки требует значительно меньшей ошибки фазы и более точной синхронизации на гораздо более высоких частотах, чем у предыдущих базовых

станций LTE четвёртого поколения, которые работали в диапазонах ниже 6 ГГц.

Кроме того, из-за компактной конструкции и отсутствия доступа к элементам антенны базовой станции для оценки соответствия высокочастотных характеристик стандартам 3GPP требуется тестирование по радиоэфиру. Оно выполняется в безэховой камере, такой как CATR от Keysight Technologies (см. рис. 2).

Требование выполнять тестирование по радиоэфиру означает, что интерфейсом взаимодействия с тестируемым устройством теперь является измерительная антенна внутри безэховой камеры, которая может быть расположена в нескольких метрах от контрольно-измерительного оборудования. От контрольно-измерительного оборудования требуются более высокие выходная мощность и чувствительность для компенсации потерь при прохождении сигнала миллиметрового диапазона в свободном пространстве по кабелю.

Поскольку несущие 5G NR диапазона FR2 могут иметь полосы 50, 100, 200 или 400 МГц, то следующую проблему представляет собой измерение EVM и ACLR для более широкополосных сигналов. Это особенно актуально при использовании агрегирования несущих, что



Рис. 1. Пример базовой станции 5G-диапазона FR2



Рис. 2. Безэховая камера Keysight CATR430



Рис. 3. Система тестирования базовых станций Keysight S9130A-TR1

увеличивает требования к полосе пропускания контрольно-измерительного оборудования.

Выполнение измерений по радиоэффиру связано с большими потерями в радиоканале. Эти потери заставляют использовать даже самые высокопроизводительные лабораторные измерительные приборы вне оптимального диапазона мощности, что ухудшает точность измерений ACLR и EVM. Кроме того, в схему измерений по радиоэффиру требуется вводить внешние компоненты, такие как усилители мощности и малошумящие усилители. Также необходимы антенные коммутаторы для переключения сигналов между антеннами с горизонтальной и вертикальной поляризацией с различными приборами при тестировании приёмника и передатчика. Калибровка различных трактов и компонентов в таких системах тестирования, собранных из традиционных лабораторных приборов миллиметрового диапазона, может занять очень много времени. Кроме того, количество таких систем сложно увеличивать при наращивании объёмов производства. Всё это приводит к удорожанию стендов для производственных испытаний оборудования миллиметрового диапазона и увеличению производственных площадей. Это происходит из-за необходимости использовать большие безэховые камеры для тестирования в диапазоне FR2. В целом по сравнению с измерениями в радиоканале, которые обычно выполняются в диапазоне FR1, вся среда тестирования по радиоэффиру в FR2 является более комплексной и труднее масштабируется.

Инновации в выносных радиомодулях миллиметрового диапазона

В отличие от традиционных систем тестирования, показанный на рис. 3 высокопроизводительный многодиапазонный векторный трансивер (S9130A-TR1) использует современный выносной радиомодуль для повышающего преобразования частоты с ПЧ (до 12 ГГц) в частоту диапазона FR2 (24,25–43,5 ГГц). Благодаря выносному радиомодулю в системе устраняются большие потери в ПЧ кабеле между безэховой камерой и контрольно-измерительным оборудованием. Значительное уменьшение потерь достигается за счёт того, что выносной радиомодуль располагается вблизи безэховой



Рис. 4. Результаты измерения ACLR сигнала 8CC на частоте 28 ГГц с помощью S9130A-TR1Keysight S9130A-TR1

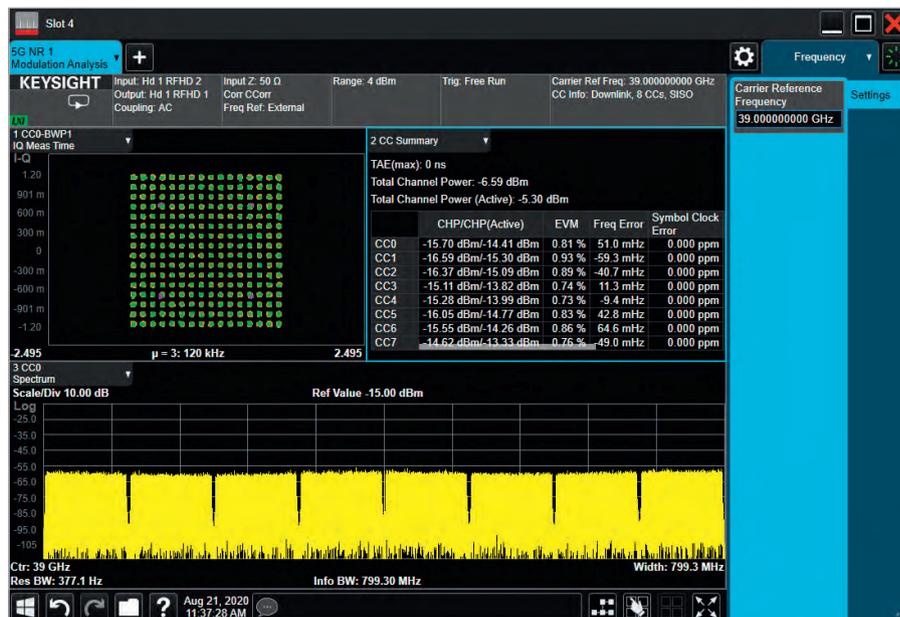


Рис. 5. Результаты измерения EVM сигнала 8CC на частоте 39 ГГц с помощью S9130A-TR1

камеры и соединяется с ней коротким кабелем.

Благодаря двум двунаправленным портам миллиметрового диапазона и регулируемому коэффициенту усиления в выносном радиомодуле, трансивер S9130A-TR1 может выполнять измерение отправляемых и принимаемых сигналов с горизонтальной и вертикальной поляризацией в широком диапазоне мощностей, чему способствуют минимальные потери в соединительном кабеле. Выносной радиомодуль объединяет несколько трактов и внешние компоненты, используемые в типовой лабораторной системе тестирования по радио-

эффиру, что позволяет сэкономить время на калибровку и значительно уменьшить сложность измерительной схемы.

Лучшие в своём классе возможности измерения ACLR и EVM в S9130A-TR1 теперь можно использовать для оценки характеристик базовых станций. Благодаря уникальному источнику сигнала в трансивере S9130A приёмник базовой станции можно тестировать столь же эффективно, как и передатчик.

На рис. 4 показаны результаты типового измерения ACLR сигнала 8CC 5G NR на частоте 28 ГГц с помощью S9130A в режиме тестирования по кольцу. На рис. 5 показаны результаты измере-



Рис. 6. Высокопроизводительный векторный трансивер M9415A VXT является основой нового решения S9130A

ния EVM сигнала 8CC 5G NR на частоте 39 ГГц.

Сколько стоит тестирование?

Все, кто занимаются производственными испытаниями, знают, что их стоимость имеет большое значение, особенно когда дело доходит до тестирования с помощью традиционных лабораторных приборов. К счастью, благодаря инновациям в M9415A – новом модуле VXT формата PXIe, шириной три слота (см. рис. 6), с диапазоном частот до 12 ГГц для FR1, а также обеспечивающим тестирование на ПЧ – система S9130A (см. рис. 3) может работать в обоих диапазонах, FR1 и FR2.

Это решение значительно снижает стоимость оборудования за счёт устранения дорогостоящих компонентов миллиметрового диапазона, обеспечивающих непрерывность исследуемого диапазона частот, что не нужно в среде производственного тестирования.

Тестирование на всех этапах разработки

Желая значительно снизить затраты за счёт отказа от традиционных лабораторных приборов, заказчики обнаруживают, что эти типы полосовых миллиметровых систем также хорошо подходят для высокоэффективного тестирования малых сот диапазона FR2 или макросот в ходе НИОКР, проверки разработок и испытаний на соответствие стандартам. Дополнительная информация об этом есть на сайте Keysight Technologies [1].

Литература

1. 5G NR Base Station Test Solutions. URL: www.keysight.com/find/basestationtest.



НОВОСТИ МИРА

Промышленный лидар за \$100

Миниатюрный лидарный датчик с широким полем обзора для ближнего зондирования стоимостью менее \$100 для массового автомобильного и промышленного применения выпустила компания Cepton Technologies.

Лидарный датчик Nova за \$100 имеет размеры 3,5 × 3,5 × 7,5 см и весит менее 350 г, что делает его самым маленьким лидарным датчиком с широким полем зрения (FOV) в мире для приложений ближнего радиуса действия. Устройство, по словам компании, предназначено для устранения серьёзных недостатков в обнаружении объектов на расстоянии с помощью современных сенсорных технологий. В настоящее время потребительские автомобили ограничены технологиями, которые не могут обеспечить истинную автономию уровня 3 или уровня 4 для массового рынка. Радары, камеры и ультразвуковые датчики подвержены большому количеству ложных срабатываний и ложных отрицаний. Вращающиеся лидары не встраиваются, что делает их непрактичными для потребительских автомобилей. Импульсные лидары со ближнего действия либо не имеют широкого поля зрения, либо не соответствуют требованиям к мощности и размеру для установки по всему автомобилю. Nova представляет собой лидарную инновацию для автомобильной промышленности, поскольку она обеспечивает непревзойдённый уровень производительности для такого небольшого форм-фактора.



Nova обеспечивает трёхмерное изображение высокого разрешения с широким полем зрения 90...120° (горизонталь) и 60...90° (вертикаль), в зависимости от конфигурации. Оснащённый технологией Micro Motion Technology (MMT), невращающийся, беззеркальный и не имеющий движущихся частей лидар Nova можно размещать по периметру транспортного средства, чтобы обеспечить полный обзор его непосредственного окружения на 360°. Устройство имеет угловое разрешение до 0,3° с максимальным радиусом действия до 30 м и идеально подходит для автомобильных систем Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) и автономных транспортных средств (AV). Лидар может обнаруживать слепые зоны и небольшие объекты, оказывать автоматическую помощь при парковке и оценивать свободное пространство вокруг автомобиля. Для транспортных средств может быть применена архитектура с несколькими лидарами,

создающая круговую виртуальную зону безопасности при минимальном ущербе эстетике конструкции транспортного средства.

Nova идеально подходит для точного обнаружения объектов поблизости, таких как маленькие дети, дорожные объекты, края дороги, неподвижные объекты и многое другое. По заявлению компании, с таким уровнем возможностей и сверхкомпактным дизайном Nova может поддерживать не только приложения ADAS и AV, но также автономные наземные транспортные средства (AGV) и интеллектуальные промышленные приложения.

Модульная конструкция и легкодоступные компоненты делают лидар легко производимым в больших объёмах при очень низкой стоимости. Он предлагается как первый лидар ближнего радиуса действия с высоким полем обзора по цене менее \$100 США.

www.cepton.com



**EXPO
ELECTRONICA**

23-я Международная выставка
электронных компонентов, модулей
и комплектующих

expoelectronica.ru



**ELECTRON
TECHEXPO**

18-я Международная выставка
технологий, оборудования и материалов
для производства изделий электронной
и электротехнической промышленности

electrontechexpo.ru

13–15 апреля 2021

Москва, Крокус Экспо

Получите Ваш
бесплатный билет
по промокоду **ee21print**



Реклама



Цифровой вольтметр с высоким разрешением

Часть 4. Настройка устройств

Алексей Кузьминов (compmicrosys@mail.ru)

Статья посвящена цифровому вольтметру с разрешением 6 десятичных разрядов на базе микроконтроллера EFM8LB12, оснащённому 14-разрядным SAR АЦП. Высокое разрешение прибора получено в результате использования известного метода передискретизации и осреднения, позволяющего существенно поднять разрешающую способность АЦП.

В предыдущих частях были представлены принципиальные схемы устройств и программные средства. Отдельно было уделено внимание разводке и изготовлению печатных плат. Заключительная часть посвящена настройке прибора.

Настройка приборов заключается в проведении процедур калибровки нуля и полной шкалы, а также в настройке аттенюатора (делителя входного напряжения) подстроечными резисторами R4 и R6 (см. рис. 1, 4). Но прежде чем описывать эти процедуры, стоит уделить некоторое внимание сути калибровки нуля и полной шкалы.

На рисунке 24 приведён график зависимости показаний АЦП (ось y) от входного напряжения (ось x), построенный в безразмерных координатах. Это означает, что показания АЦП и входное напряжение отнесены к значению опорного напряжения, составляющему в данном случае 3 В, но оно может быть и любым другим. Чёрным цветом показана идеальная прямая передаточной функции АЦП, уравнение которой: $y = x$ (или $y = Kx + B$, где $K = 1$, а $B = 0$). Коэффициент K – это тангенс угла

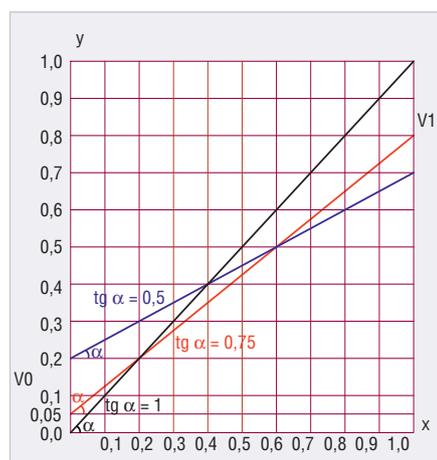


Рис. 24. График зависимости показаний АЦП от входного напряжения в безразмерных координатах

наклона прямой, а B – смещение. На графике приведены две реальные передаточные функции (синяя и красная прямые), имеющие разный наклон и смещение. Тот факт, что это именно прямые, а не кривые, будет обоснован далее. Синяя прямая, как можно заметить, пересекает ось y при $x = 0,2$ ($B = 0,2$). Обозначим это смещение V_0 и будем называть его смещением нуля. Тангенс угла наклона K этой прямой равен $0,5$. Как скорректировать показания АЦП, если они соответствуют синей прямой? Например, при $x = 0,6$ показания АЦП, очевидно, будут $0,5$, а в идеальном случае (чёрная прямая) – $0,6$. Чтобы скорректировать показания АЦП, необходимо, во-первых, устранить смещение V_0 и, во-вторых, скорректировать коэффициент наклона прямой. Пусть показания АЦП равны V (например, $V=0,5$ при $x=0,6$). Для коррекции, очевидно, вначале нужно из показания V вычесть смещение V_0 , затем найти реальный тангенс угла наклона или реальный коэффициент k_p : $k_p = (V_1 - V_0)/1$. Далее следует определить, во сколько раз реальный коэффициент k_p меньше идеального (равного 1): $1/k_p = 1/(V_1 - V_0)$. Обозначим $1/k_p = k$ и назовём k коэффициентом коррекции. Если теперь умножить разность $(V - V_0)$ на коэффициент коррекции k , то мы полу-

чим скорректированное (правильное) значение показаний $V_k = k(V - V_0)$. Проверим полученную формулу. Имеем: $k = 1/(0,7 - 0,2) = 1/0,5 = 2$; $V - V_0 = 0,5 - 0,2 = 0,3$; $V_k = k(V - V_0) = 2 \times 0,3 = 0,6$. Это как раз и есть правильное значение при $x = 0,6$.

Таким образом, для нахождения правильного значения измеренного АЦП напряжения V сначала необходимо определить коэффициент $k = 1/(V_1 - V_0)$, затем вычислить разность $V - V_0$ и умножить её на k : $V_k = k(V - V_0)$.

Для нахождения V_0 , очевидно, требуется подать на вход АЦП нулевой потенциал, т.е. соединить сигнал CALV с «землёй» в разъёме XC1 (см. рис. 1, 4). Для этого между контактами 2 и 3 потребуется установить перемычку. Назовём эту процедуру калибровкой нуля. Для того чтобы «сообщить» микроконтроллеру о том, что требуется произвести калибровку нуля (т.е. запустить подпрограмму калибровки нуля), в разъёме XC2 (рис. 1, 4) потребуется заземлить сигнал CAL0, т.е. подать на него низкий уровень напряжения (лог. 0). Для этого необходимо соединить контакты 1 и 2 разъёма XC2. Кроме того, потребуется снять с разъёма XD (рис. 1, 4) ответную часть XD1 (см. рис. 2б, 5г), соединяющую его с переключателем диапазона измерений, или, другими словами, отключить аттенюатор, чтобы он не мешал калибровке. Таким образом, процедура калибровки нуля заключается в следующем:

1. перед включением питания соединить джамперами контакты 2, 3 в разъёме XC1 и контакты 1 и 2 в разъёме XC2;
2. снять с разъёма XD ответную часть XD1;
3. включить питание.

«Обнаружив», что требуется выполнить калибровку нуля, микроконтрол-

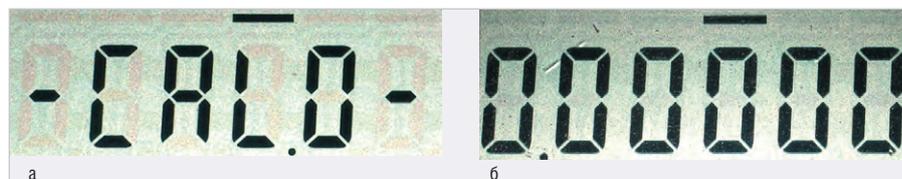


Рис. 25. Калибровка нуля: а) индикация процесса калибровки; б) результат калибровки

лер запустит соответствующую подпрограмму. При этом будет измерено напряжение V_0 и записано во флеш-память. Процесс калибровки нуля длится 3–4 с. Перед началом калибровки на экран выведется сообщение, что процесс начался: «CAL.0» (см. рис. 25а). После окончания калибровки на экран ЖКИ выведется скорректированное напряжение, т.е. из измеренного входного напряжения вычтется V_0 и выведется на экран ЖКИ (см. рис. 25б). При правильной калибровке нуля это напряжение должно строго равняться нулю. Дополнительно о том, что производится калибровка нуля, сообщит чёрточка над 4-й цифрой. Далее питание следует выключить и произвести калибровку полной шкалы, описанную далее.

При калибровке полной шкалы потребуется подать на вход АЦП напряжение ИОН (3 В), т.е. соединить сигнал CALV (2-й вывод разъёма XC1, см. рис. 1, 4) с сигналом V_{ref} (1-й вывод XC1). Кроме того, чтобы запустилась подпрограмма калибровки полной шкалы, потребуется подать низкий уровень напряжения (лог. 0) на вход

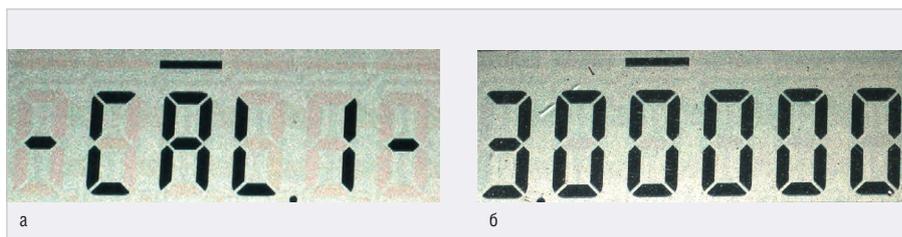


Рис. 26. Калибровка полной шкалы: а) индикация процесса калибровки; б) результат калибровки

CAL1 микроконтроллера. Для этого в разъёме XC2 (см. рис. 1, 4) необходимо соединить сигнал CAL1 (3-й вывод) с «землёй» (2-й вывод). Также потребуется снять с разъёма XD (см. рис. 1, 4) ответную часть XD1 (см. рис. 2б, 5г), соединяющую его с переключателем диапазона измерений. При калибровке полной шкалы программа вначале прочитает из флеш-памяти записанный в неё в результате калибровки нуля коэффициент (V_0). После получения коэффициента калибровки полной шкалы он будет записан во флеш-память. Далее будет произведено измерение входного напряжения АЦП, и с учётом этого коэффициента, а также коэффициента калибровки нуля (V_0) будет рассчитано реаль-

ное напряжение по приведённой ранее формуле. Это напряжение далее будет умножено на 3 (т.е. на значение опорного напряжения) и выведено на экран ЖКИ. Таким образом, процедура калибровки полной шкалы состоит в следующем:

1. перед включением питания соединить контакты 1 и 2 разъёма XC1 и контакты 3 и 2 разъёма XC2;
2. снять с разъёма XD ответную часть XD1;
3. включить питание.

Начало процесса калибровки полной шкалы отразится на экране сообщением «CAL.1» (см. рис. 26а). После окончания калибровки на экран выведется результат (см. рис. 26б), при этом над 3-й цифрой появится



SCHAEFER

Источники питания AC/DC

- Вход: однофазная и трехфазная сеть переменного тока
- Мощность от 100 Вт до 500 кВт
- Выход: от 5 до 800 В постоянного тока
- Диапазон рабочих температур от -40 до $+75^{\circ}\text{C}$

Источники питания DC/DC

- Вход: от 10 до 800 В постоянного тока
- Разнообразные конструктивные исполнения

DC/AC-инверторы

- Вход: от 20 до 800 В
- Выходы: однофазное и трехфазное напряжение
- Частота выходного напряжения от 40 до 800 Гц с подстройкой

AC/AC-преобразователи

- Преобразование переменного напряжения в однофазное и трехфазное с частотой от 40 до 800 Гц

Области применения

- Промышленная автоматизация
- Железнодорожный транспорт
- Испытательное оборудование
- Энергетика
- Нефтегазовая промышленность
- Ответственные применения

PROSOFT®

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU





Рис. 27. Измерение напряжения: а) щелочной батарейки AA; б) батареи «Крона»

чёрточка, дополнительно показывающая, что производится калибровка полной шкалы. Результат должен строго равняться «3,00000». После окончания калибровки с разъёмов XC1 и XC2 необходимо снять обе перемычки.

Далее следует произвести настройку аттенуатора подстроечными резисторами R4 и R6 (см. рис. 1, 4). Для этого потребуется перемычка, с помощью которой необходимо подать опорное напряжение (сигнал Vref) с разъёма XC1 (1-й контакт) на вход прибора – сигнал Vx+ разъёма XUvx (2-й контакт). Такую перемычку можно изготовить из одножильного провода (например, МГТФ-0,2) длиной около 5 см. На один конец провода нужно припаять ответное для разъёма XUvx цанговое гнездо, а на второй – гнездо, ответное для штыря с шагом 1,27 мм для разъёма XC1. Перед включением питания необходимо установить эту перемычку, а также подключить разъём от кабеля для переключателя диапазона к разъёму XD. Диапазон измерений следует установить 0...60 В. После включения питания резистором R6 настроить показание ЖКИ, равным по возможности 3,0000 В. Далее (можно, не выключая питания) переключить диапазон на 0...6 В и настроить резистором R4 показание ЖКИ, равным 3,00000 В. После этого питание следует выключить, а перемычку снять. На этом настройка прибора заканчивается.

Здесь следует добавить следующее. В справочном листке на микроконтроллер EFM8LB12 указаны четы-

ре вида погрешностей, из которых максимальная – погрешность наклона. В нашем случае это погрешность полной шкалы. Погрешность смещения нуля на несколько битов меньше; ещё на несколько битов меньше интегральная нелинейность. И последняя погрешность – дифференциальная нелинейность. Она ещё на несколько битов меньше. Прямое измерение напряжения показало, что погрешность смещения нуля (V0) практически равна нулю (по крайней мере, при том методе измерения напряжения и его осреднения по 65536 значениям). Другими словами, 5-й знак после запятой в диапазоне 0...6 В нулевой. В связи с этим, в принципе, калибровка нуля практически ничего существенного не даёт, и её вполне можно исключить. Однако этот факт, а также то, что погрешность интегральной нелинейности на несколько битов меньше погрешности смещения нуля, означает, что погрешность интегральной нелинейности ничтожно мала, и её учитывать не имеет практического смысла. То же самое касается и дифференциальной нелинейности. А раз так, то с достаточно большой точностью можно констатировать, что красная и синяя линии, приведённые на рисунке 25 для примера, – это прямые (а не кривые), и все рассуждения по поводу формулы получения реального напряжения с учётом погрешностей смещения нуля и полной шкалы вполне логичны. Кстати, прямое измерение показало также, что погрешность полной шкалы является относительно малой величиной.

Корректирующий коэффициент полной шкалы, по результатам проведённых измерений, варьировался от 1,01 до 1,015, т.е. погрешность составляет всего от 1 до 1,5%.

Примеры работы вольтметра

Измерение вольтметром напряжения новой батарейки AA (см. рис. 27а) показывает, что её напряжение существенно выше 1,5 В. В то же время измерение напряжения батареи типа «Крона», которая проработала более 4 лет (см. рис. 27б), показывает, что её напряжение уже несколько меньше номинального значения 9 В.

Заключение

За высокое разрешение вольтметра неизбежно приходится платить: прибор не имеет защиты ни от переполюсовки, ни от превышения измеряемого напряжения максимальных значений на использованных диапазонах. Однако в ситуациях, когда требуется произвести всего два–три относительно точных измерения напряжения, чтобы удостовериться в полученных результатах, покупка дорогостоящего прибора является нецелесообразной. Вот в таких случаях описанный прибор и может оказать неоценимую помощь. Применённый метод передискретизации и осреднения, позволяющий существенно поднять разрешающую способность АЦП, можно использовать не только в других микроконтроллерах со встроенными АЦП, но и в отдельных относительно скоростных АЦП, сопряжённых с микроконтроллером. Подобную конструкцию устройства и программные средства можно применить не только для измерения напряжения, но и в более широких областях. Если оборудовать подобное устройство различными датчиками физических величин (например, датчиками давления, температуры, силы, влажности и т.п.), то можно получить достаточно точные автономные измерители этих величин (манометры, барометры, термометры, динамометры, влагомеры и т.п.) с цифровой индикацией. Даже описанный в данной статье прибор можно использовать для относительно точного измерения сопротивления, для этого необходим только прецизионный резистор. Таким образом, область применения описанного устройства, на взгляд автора, довольно широка.





Свобода проектирования

 **DeltaDesign**

В состав Delta Design, обеспечивающей сквозной цикл проектирования печатных плат, входят модули:

- Менеджер библиотек
- Схемотехнический редактор
- Схемотехническое моделирование
- HDL-симулятор
- Редактор правил
- Редактор печатных плат
- Топологический редактор плат TopoR
- Коллективная работа для предприятий

Электронный редуктор. Как кардинально увеличить крутящий момент коллекторного двигателя переменного тока на низких оборотах

Часть 2

Алексей Кузьминов (compmicrosys@mail.ru)

В статье приведены принципиальные схемы, разводка плат и фотографии устройств регуляторов-стабилизаторов скорости вращения мини-дрелей на базе микросхем U2010B/U2008B. Стабилизация скорости вращения коллекторных двигателей переменного тока, применённых в этих дрелях, дала возможность в разы увеличить крутящий момент, что позволило существенно расширить сферу применения подобных дрелей и использовать в таких режимах работы, которые ранее были недоступны (сверление отверстий, распиловка, заточка). Показаны примеры применения сконструированных устройств.

Принципиальная схема устройства регулятора-стабилизатора скорости на базе микросхемы U2008B

Микросхема U2008B – упрощённая версия U2010B, поэтому схема устройства на её основе (см. рис. 2) более проста. Хотя наиболее предпочтительным рабочим напряжением для дрели SKRAB 56000 оказалось напряжение 190 В, было решено использовать для этой цели сетевое напряжение 220 В. Это было сделано по двум причинам. Во-первых, напряжение 220 В ненамного отличается от 190 В и не требует трансформатора 220 В/190 В, что существенно упрощает конструкцию всего устройства. Во-вторых, на основе дрели SKRAB 56000 была сконструирована циркулярная пила и точило, скорости работы которых почти на порядок больше скоростей при сверлении. Поэтому максимальная и минимальная скорости вращения дрели были выбраны

2000 об/мин и 10000 об/мин соответственно. При минимальной скорости 2000 об/мин даже при работе от напряжения 220 В, как было выявлено из эксперимента, «слепая зона» отсутствует, поскольку при такой скорости вращения ток, потребляемый дрелью вполне достаточен для «захвата» петлёр компенсации нагрузки в микросхеме U2008B.

Здесь следует отметить, что минимальная и максимальная скорости вращения дрелей TUNGFULL 1806B (300...2000 об/мин) и SKRAB 56000 (2000...10000 об/мин) были измерены автором достаточно точным способом с помощью головки для поверки газовых счётчиков, оснащённой крыльчаткой (звёздочкой), инфракрасным светодиодом и фототранзистором, между которыми она вращается. Для измерения частоты вращения был использован частотомер. Более подробно о подобном способе изме-

рения скорости вращения написано в статье автора [1].

Для получения напряжения питания микросхемы также используется гасящий резистор R1 номиналом 22 К мощностью 5 Вт (цементный резистор SQP-5), т.к. при рекомендованной в справочном листке мощности 2 Вт его нагрев составлял более 60°C, тогда как при мощности 5 Вт – только около 40°C. Диод SM4007 (VD1) используется для однополупериодного выпрямления погашенного R1 напряжения, а конденсатор C1, включённый между напряжением питания –Vs (5-й вывод DA1) и «землёй» (4-й вывод DA1), как сглаживающий. Напряжение питания через подстроечный резистор R8 и последовательно включённый с ним резистор R8_1 подаётся на вход R_φ (6-й вывод DA1), предназначенный для начальной установки угла φ открытия симистора BTA24-600CW (VD2). Таким образом, сумма номиналов резисторов R8 и R8_1 определяет номинал R_φ: R8 + R8_1 = R_φ, который совместно с конденсатором C3 (C_φ), подключённым к выводу C_φ (2-й вывод DA1), образует RC-цепочку R_φC_φ. Постоянная времени данной цепочки и определяет начальный угол φ открытия симистора VD2. Резистор R2 включён между сетевым напряжением 220 В переменного тока и входом V_{sync} (7-й вывод DA1) и служит для синхронизации с сетевым напряжением. Импульсы для открытия симистора VD2 поступают на его УЭ с выхода Out (8-й вывод DA1) через резистор R3. Мотор M с помощью двухконтактной сетевой вилки X2 подключён к двухконтактной розетке X1 устройства. Как видно из схемы, мотор M оказывается включённым между сетевым напряжением 220 В переменного тока и силовым электродом A2 симистора VD2, второй силовой электрод A1 которого через токоизмерительный резистор номиналом 0,1 Ом (R6) подключён к «земле». При максимальном токе 2,5 А (см. выше) максимальное напряжение на R6, как нетрудно подсчитать, состав-

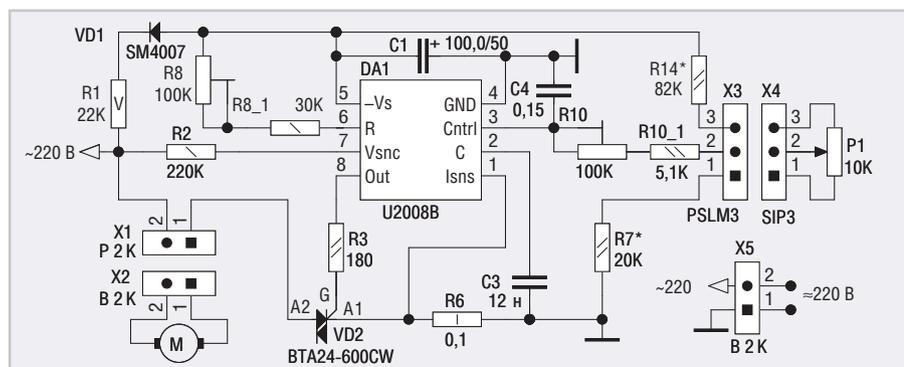


Рис. 2. Принципиальная схема стабилизатора скорости вращения электродвигателя мощностью 480 Вт на базе микросхемы U2008B

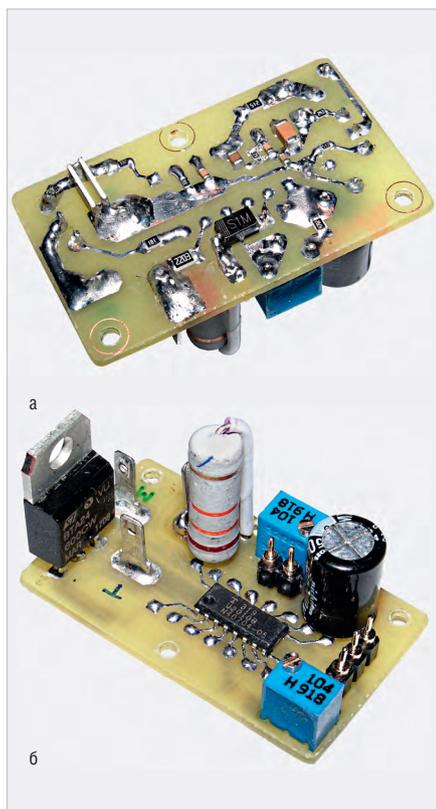


Рис. 5. Фотография платы на базе U2010B:
а) со стороны SMD-компонентов;
б) со стороны навесных компонентов

Разводка плат и фотографии устройств

Разводка плат выполнена в программе SprintLayout 6.0. Обе платы имеют двустороннюю разводку (см. рис. 3 и 4). О разводке и изготовлении подобных плат и фотошаблонов подробно рассказано в статьях [2, 3]. Файл разводки обеих плат в формате *.laub приведён в дополнительных материалах к статье на сайте журнала.

На платах для подключения высоких напряжений («земля», «мотор», «150 В» и «220 В») используются ножевые клеммы (штыри шириной 2,8 мм), впаянные

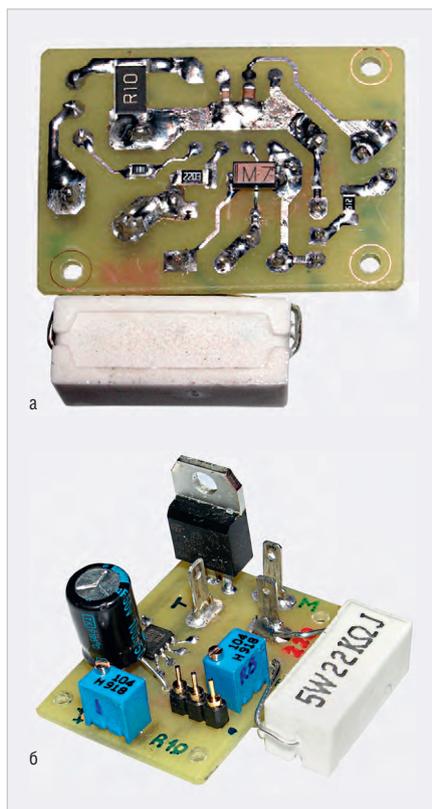


Рис. 6. Фотография платы на базе U2008B:
а) со стороны SMD-компонентов;
б) со стороны навесных компонентов

в плату (см. фото на рис. 5б, 6б). На них надеваются ответные клеммы, припаянные к соответствующим проводам (МГТФ-1,0). На эти клеммы надета термоусадочная трубка соответствующего размера. Эти клеммы можно заметить на фотографиях плат в корпусах размером 30×46×70 мм (см. рис. 7 слева и рис. 8 слева). Платы прикручены винтами M2 к днищу корпуса с помощью пластиковых стоек с внутренней резьбой M2. Сетевой провод прикручен к днищу корпуса металлическим зажимом, а двухконтактная розетка для подключения дрели прикручена к торце-

вой грани корпуса винтом M3 вплой и гайкой. На днище и боковых гранях корпусов просверлены отверстия для доступа воздуха с целью конвективного охлаждения мощных балластных резисторов. Светодиод и потенциометр укреплены на лицевой поверхности корпуса устройства на базе U2010B (см. рис. 7 справа). На лицевой поверхности корпуса устройства на базе U2008B закреплён только потенциометр (см. рис. 8 справа). На штоках потенциометров установлены карболитовые ручки. Конструкцией корпусов предусмотрено защёлкивание крышки без каких-либо винтов. К днищу корпусов приклеены резиновые ножки, во-первых, для доступа воздуха к вентиляционным отверстиям и, во-вторых, для предотвращения скольжения во время регулировки скорости потенциометром. Нагрев симистора ВТА24-600CW довольно слаб, поэтому он используется без радиатора. Индекс «С» означает, что ток управления по выводу УЭ не превышает 35 мА (в стандартной конфигурации – 50 мА), а индекс «W» – что симистор является «бесснабберным», т.е. для его работы не требуется снабберная RC-цепочка. Это существенно снижает потери и, соответственно, нагрев симистора.

Сверлильный станок на базе стойки для дрелей SKRAB 25519 и TUNGFULL 1806B

Фотография станка показана на рисунке 9. В стойку для дрели были внесены некоторые усовершенствования, заключающиеся в следующем.

Во-первых, имбусовый болт с головкой под шестигранник со стандартной резьбой M8×1,5, установленный в зажимающий дрель хомут, был заменён на усиленный и имеющий мелкую резь-

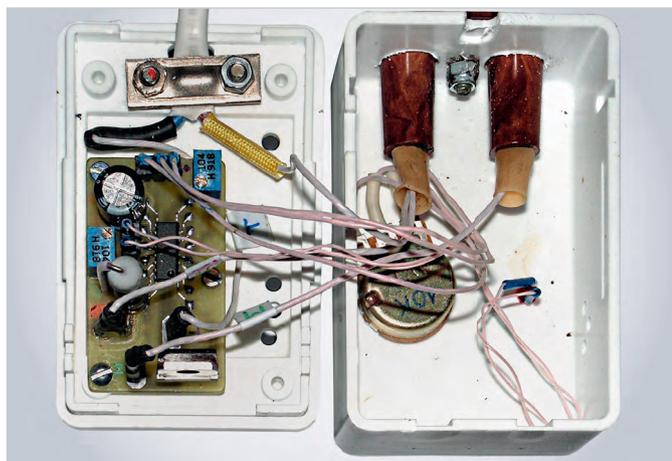


Рис. 7. Фотография устройства на базе U2010B

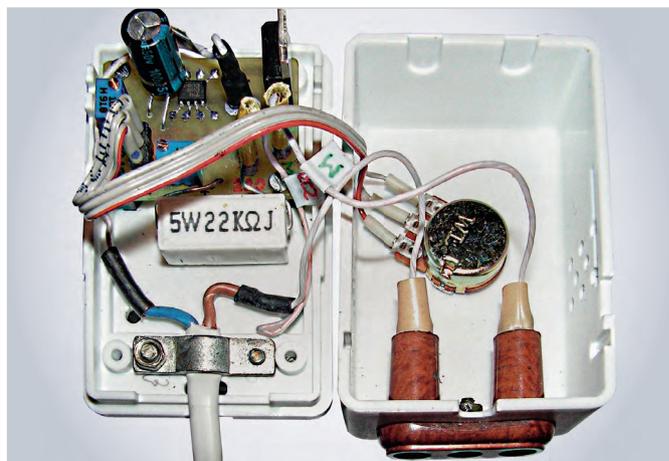


Рис. 8. Фотография устройства на базе U2008B

бу М8×1,0. Это позволило надёжно затягивать болт шестигранным ключом с меньшим усилием.

Во-вторых, два имбусовых болта М6, закрепляющие перемещающий дрель по вертикали механизм на штанге, были заменены на новые, более качественные, т.к. из старых при затягивании ключ часто выскакивал.

В-третьих, сама штанга, удерживающая дрель и механизм её перемещения, довольно тонкостенная. Она крепится в отверстии чугунной станины двумя шпильками с резьбой М8 с углублением (на торце) под шестигранник. При затягивании этих шпилек с достаточным усилием штанга может легко деформироваться. Поэтому в нижнюю часть штанги с большим натягом была установлена толстостенная труба длиной около 6 см, препятствующая деформированию штанги (эта труба хорошо заметна на рисунке 10а).

В-четвёртых, пружина, удерживающая дрель вместе с механизмом её перемещения от самопроизвольного опускания вниз (т.е. уравновешивающая дрель), выбрана менее жёсткая, поскольку дрель TUNGFULL 1806В весит не более 1 кг. Установленную пружину меньшего диаметра можно увидеть на рисунке 10б (для сравнения: штатная пружина показана справа).

И наконец, в-пятых, штатный рычаг с шариком, установленный на цилиндрической части механизма перемещения дрели и служащий для её вертикального перемещения, был выкручен и заменён на обычную дверную ручку. Эта ручка крепится к фланцу, предназначенному для закрепления труб диаметром 25 мм, тремя саморезами. А сам фланец крепится к цилиндрической части механизма перемещения дрели двумя шпильками с резьбой М4 с углублением под шестигранник (2,5 мм). Для этого во фланце просверлено

ещё одно отверстие и нарезана резьба М4. Кроме того, во фланце просверлено отверстие, через которое можно вкрутить рычаг. Это отверстие и одна из крепёжных шпилек хорошо видны на рисунке 10в. Для того чтобы шпильки не скользили по цилиндрической части механизма перемещения, в ней просверлено два углубления, в которые входят шпильки. Кистевое усилие, прилагаемое к ручке, существенно лучше дозируется по сравнению с локтевым усилием, прилагаемым к рычагу. Этого кистевого усилия вполне достаточно для сверления отверстий диаметром 4,5 мм, например в стальной пластине толщиной 2,5 мм. Если требуется сверление стали большим диаметром сверла (например, 6...9 мм), то в стойку необходима уже установка обычной ручной дрели. В этом случае рычаг можно вкрутить на место (см. рис. 10в).

Мини-дрель TUNGFULL 1806В для своего закрепления в стойке имеет достаточно качественно изготовленную цилиндрическую поверхность размером $d \times h = 37 \times 27$ мм (см. рис. 11а). Внутренний диаметр хомута (в стойке) для закрепления дрели составляет 43 мм (стандартный диаметр для закрепления ручной дрели). Поэтому для закрепления дрели TUNGFULL 1806В использовано алюминиевое разрезное переходное (проставочное) кольцо размером $d \times D \times h = 36 \times 43 \times 24$ мм (см. рис. 11б). Поскольку внешний диаметр кольца от расширения немного увеличится, оно с небольшим натягом вставляется в хомут стойки и надёжно затягивается имбусовым болтом М8, упомянутым выше. На фотографии на рисунке 9 можно также заметить устройство регулятора-стабилизатора оборотов на базе микросхемы U2010В в белом корпусе с ручкой и светодиодом на лицевой поверхности.



Рис. 9. Фотография стойки SKRAB 25519 с мини-дрелью TUNGFULL 1806В и устройством на базе U2010В в сборе

Циркулярная пила и точильный станок на базе мини-дрели SKRAB 56000

Как видно из фотографии на рисунке 12, циркулярная пила на базе мини-дрели SKRAB 56000 собрана из готовых z-образных и обычных стальных оцинкованных уголков. На четырёх уголках дрель закреплена тремя хомутами-держателями 1,5-дюймовых пластмассовых труб для водоотведения. Два других z-образных уголка используются для крепления стеклотекстолитовой пластины толщиной 4 мм с прорезью для пильных дисков.

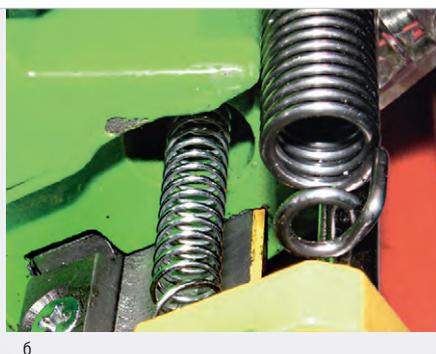
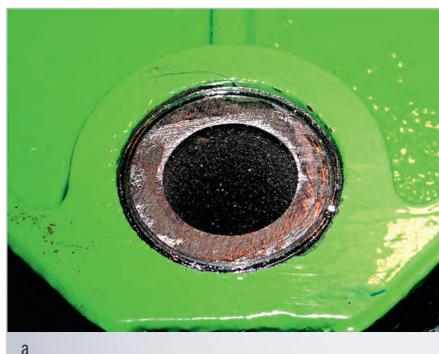


Рис. 10. Фотографии дополнительных приспособлений к стойке для дрели: а) толстостенная труба; б) новая пружина; в) ручка, установленная взамен штатного рычага



Рис. 11. Фотография цилиндрической части корпуса: а) мини-дрели; б) установленного переходного кольца

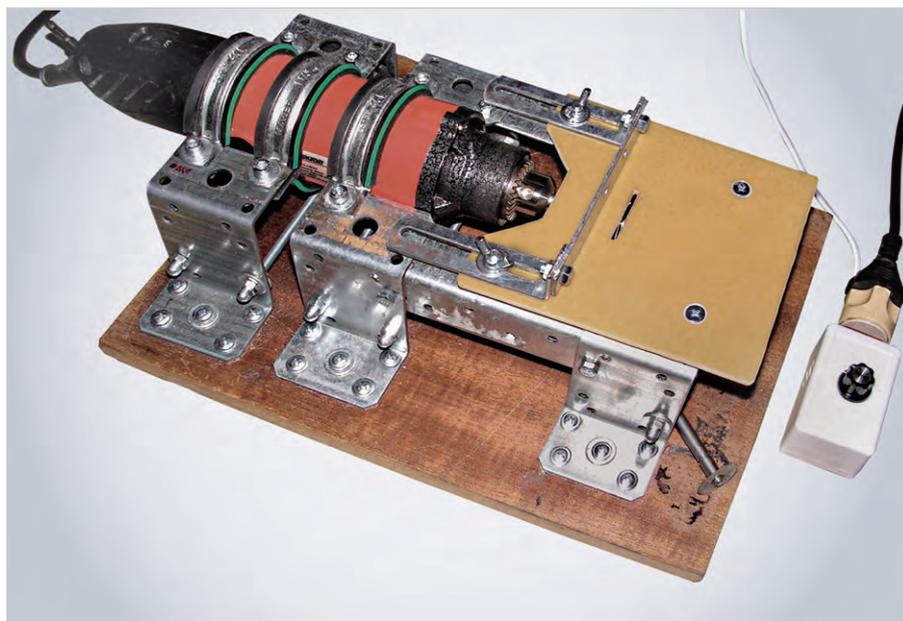


Рис. 12. Фотография циркулярной пилы с мини-дрелью SKRAB 56000 и устройством на базе U2008B в сборе

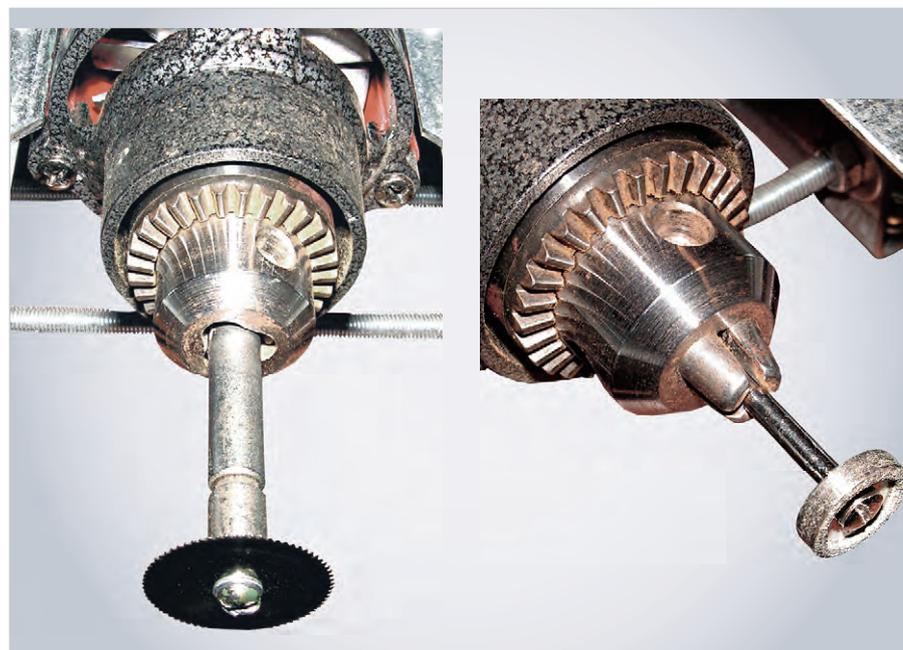


Рис. 13. Фотография насадок для мини-дрели SKRAB 56000: а) стальной пильный диск; б) алмазный диск для заточки свёрл

Для крепежа использованы винты М5 с гайками. Сами z-образные уголки прикручены к ДСП саморезами. Для упрочнения z-образные уголки внизу дополнительно укреплены шпильками М5 и гайками. В правую часть стеклотекстолитовой пластины вкручены два винта М5 впотай, которые крепятся снизу к z-образным уголкам барашковыми гайками М5, а левая её часть вместе со стальной пластиной, служащей как направляющая, установлена на уголках с прорезью, прикрученных барашковыми гайками М5 с шайбами к винтам, установленным на дополнительных обычных уголках. Таким образом, расстояние от направляющей до пильного диска может легко регулироваться. Поскольку стеклотекстолитовая пластина вместе с направляющей может легко сниматься, циркулярная пила очень просто превращается в точильный станок. На рисунке 13а показан вал (с установленным пильным диском), зажатый в патроне дрели, а на рисунке 13б – патрон дрели с зажатым алмазным кругом, на котором, например, можно затачивать обычные и победитовые свёрла.

Изначально в стойку SKRAB 25519 предполагалось установить мини-дрель SKRAB 56000. Однако её поверхность, предназначенная для закрепления в хомуте стойки, во-первых, окрашена и имеет довольно крупную текстуру, а во-вторых, представляет собой не совсем цилиндрическую форму, обладая довольно заметной конусностью. Однако по своим электрическим параметрам дрель SKRAB 56000 (мощность 480 Вт и максимальная скорость 30000 об/мин) вполне подходит для описанных ранее функций.

К розетке устройства регулятора-стабилизатора скорости на базе микросхемы U2008B (показана на рис. 12 справа в белом корпусе) дрель подключена своей вилкой. Само же устройство подключено к сети 220 В белым проводом с вилкой. Для работы дрели с устройством стабилизатора-регулятора переключатель скоростей дрели необходимо установить на максимум. В этом случае двигатель дрели напрямую подключается к контактам своей вилки, и встроенный регулятор скорости на базе симистора отключается.

Результаты работы устройств

Для сверления отверстия диаметром 4,5 мм в стальной пластине толщиной

2,5 мм с помощью дрели TUNGFULL 1806B и устройства регулятора-стабилизатора скорости на базе микросхемы U2010B (см. рис. 9) сначала было использовано сверло 2 мм, а затем свёрла 3 и 4,5 мм. При сверлении отверстия диаметром 4,5 мм дрель ни разу не остановилась, правда, на конечном этапе сверления на некоторое время замигал светодиод, который погас после окончания сверления, дрель продолжала работать. Что касается более мягких материалов (дюраль, алюминий, стеклотекстолит, текстолит, пластик и, наконец, дерево), то они легко сверлятся свёрлами и большего диаметра. Например, автор легко просверлил алюминиевый радиатор толщиной около 7 мм сверлом 3,3 мм. Кроме того, относительно простое позиционирование сверла, а также лёгкое дозирование усилия с помощью ручки дрели позволяют без проблем просверлить стальную пластину, например сверлом диаметром 1 мм (при сверлении обычной ручной дрелью тонкое сверло часто ломается). Такая дрель также позволяет сверлить печатные платы твёрдосплавными свёрлами.

Например, легко были просверлены несколько предварительно накернённых отверстий в печатной плате из стеклотекстолита толщиной 1,5 мм сверлом диаметром 0,7 мм с хвостовиком диаметром 2 мм. Сверло ни разу не сломалось.

Что касается циркулярной пилы, то с её помощью легко разрезается стеклотекстолит толщиной до 4 мм. Причём без устройства регулятора-стабилизатора скорости с большим трудом разрезался стеклотекстолит толщиной 1,5 мм (дрель на малых скоростях останавливалась, а на более высоких стеклотекстолит просто обугливался). Автор также без проблем разрезал алюминиевую пластину толщиной 1,5 мм. С помощью точильного диска легко затачиваются обычные и победитовые свёрла. Во всех описанных экспериментах (циркулярная пила, точило) дрель ни разу не остановилась.

Заключение

Применение микросхем U2010B/U2008B и современной элементной базы позволяет конструировать регуляторы-стабилизаторы скорости вра-

щения лёгких и компактных мини-дрелей, значительно увеличивая крутящий момент и позволяя эксплуатировать их в режимах работы, которые были невозможны без механического редуктора. Это, в свою очередь, придаёт таким дрелям новые динамико-кинематические свойства, что позволяет применять их в новых приложениях (сверление отверстий, распиловка, заточка и т.п.), использование в которых ранее было сопряжено с существенными проблемами или вообще невозможно.

Литература

1. Кузьминов А. Изготовление устройств на печатных платах с высоким разрешением в домашних условиях. Технологии в электронной промышленности. 2011. № 1.
2. Кузьминов А. Как использовать фольгу обратной стороны односторонней печатной платы в качестве общего провода. Радио. 2019. № 2.
3. Кузьминов А. Технология изготовления печатных плат с высоким разрешением в любительских условиях. Радио. 2017. № 10.



ICAPE GROUP YOUR EXPERT SERVICES PROVIDER IN CHINA

НАШ ГЛОБАЛЬНЫЙ ОТВЕТ
ВАШИМ ПОТРЕБНОСТЯМ В ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ И
ТЕХНИЧЕСКИХ ДЕТАЛЯХ

ЭКСПЕРТЫ К ВАШИМ УСЛУГАМ!



ЦЕНА

Лучшее соотношение цена - качество для ваших нужд. Наш глобальный объем закупок даёт возможность предложить вам конкурентные цены.



СКОРОСТЬ

Доставка к вашей двери всего за 5 дней! Два онлайн магазина работают без перерывов и выходных. 98% поставок вовремя.



КАЧЕСТВО

Член МПК и сертификат ISO 9001:2015. Наши поставщики: ISO 14001, ISO TS 16949, ISO 13485 и AS9100.

Реклама

ООО "АЙКЕП РУС"
115035, г. Москва,
ул. Садовническая набережная, 71

www.icape-group.com
 www.icapeshop.com
www.cipemshop.com

+7 495 668 11 33
 order@icaperussia.com



Тестирование устройств 5G для обеспечения электромагнитной совместимости: потребности и современные возможности

Николай Лемешко (nlem83@mail.ru),
 Дмитрий Богаченков (dmitry.bogachenkov@rohde-schwarz.com)

В статье рассматривается проблема проведения измерений в обеспечение ЭМС для сетей 5G NR. Анализируются особенности предусмотренного для новой радиотехнологии частотного плана и её физического уровня, из которых следуют важнейшие аспекты проведения измерений на ЭМС. Рассмотрены контрольно-измерительные решения компании Rohde&Schwarz, применимые для реализации такого тестирования в несигнальном и сигнальном режимах, в частности тестовая система R&S TS8996, специально предназначенная для тестирования устройств 5G.

Введение

Развитие общества, повышение качества жизни людей и научно-технический прогресс всегда были связаны с увеличением объёмов передаваемой информации. К настоящему времени потребность в автоматизации производственных и транспортных процессов, а также в информационном обмене между индивидуальными абонентскими терминалами (АТ) привели к настоятельной необходимости внедрения сетей беспроводного доступа пятого поколения 5G, которые, обладая некоторыми сходствами с 4G в части кодовых конструкций, в то же время имеют значительные отличия на физическом уровне. Именно по этой причине в литературе, например [1], новую технологию связи обозначают как New Radio (NR), подчёркивая тем самым её революционный характер.

Сферы применения сетей 5G во многом определяются уровнем технического развития конкретных государств, и чем он выше, тем больший охват сети могут иметь. На текущий момент в этом

смысле принято выделять три основных направления (см. рис. 1):

1. расширенный широкополосный мобильный доступ (eMBB) предполагается реализовывать в соответствии с действующими стандартами мобильной связи. Это применение ориентировано на потребителей мультимедийного контента и телекоммуникационных услуг, в том числе в виде передачи больших объёмов данных;

2. обеспечение массового взаимодействия между человеком и техническими средствами, а также между техническими средствами без участия людей (mMTC) направлено на реализацию концепции Интернета вещей (IoT) [2];

3. сверхнадёжная связь с минимальной задержкой (URLCC) предназначена для управления средствами промышленной, транспортной и медицинской автоматизации, узлами информационных сетей.

В сетях 5G будут передаваться беспрецедентно большие объёмы данных при одновременно возрастающей их важности и критичности. При этом частотные планы, разработанные при внедрении 4G в отдельных регионах мира, оказываются несостоятельными, т.к. не предусматривают выделение достаточного для всех названных приложений частотного ресурса. Выходом здесь могло бы стать использование цифровой модуляции высоких порядков, однако такое решение требует заметного повышения мощности передатчиков базовых станций и АТ при одновременном ухудшении электромагнитной обстановки [2]. Это определило переход к активному использованию миллиметрового диапазона

с достаточным частотным ресурсом, которое сопровождается проявлением новых радиофизических эффектов, не свойственных дециметровому и метровому диапазонам длин волн.

Многодиапазонность работы устройств 5G, а также их предполагаемая массовость определяют потребность в развитии методов и средств тестирования, которые отвечали бы современному уровню автоматизации и технического прогресса. В настоящей работе будут рассмотрены решения компании Rohde&Schwarz, предназначенные для проведения такого тестирования для целей обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС).

Особенности частотного плана сетей 5G

Наиболее важные в части частотного планирования отличия сетей 5G от предыдущего поколения цифровой подвижной связи заключаются в широте охвата и количестве потенциальных абонентов, а также в необходимой пропускной способности. Эти особенности привели к невозможности простого заимствования частот у более ранних радиотехнологий, например 3G/4G, и предопределили переход 5G в сантиметровый и миллиметровый диапазоны волн, где имеются свободные полосы частот шириной до нескольких гигагерц. Поэтому уже в первых редакциях спецификации консорциум 3GPP, развивающий технологию 5G, принял решение о поддержке диапазона от 1 до 52,6 ГГц [3]. Использование миллиметрового диапазона сопровождается следующими проблемами:

- затруднено использование широконаправленных антенн из-за значительного увеличения потерь на распространение электромагнитных волн; в ряде случаев требуется применение антенных решёток для формирования диаграмм направленности с узким лучом;
- для частот выше 50 ГГц наличие гидрометеоров, в т.ч. тумана, увеличивает потери на распространение электромагнитных волн на десятки децибел;



Рис.1. Основные направления концепции 5G

- частоты в интервале 55...65 ГГц характеризуются высоким поглощением радионизлучений молекулярным кислородом в составе воздуха с максимумом потерь до 15 дБ/км на частоте 60 ГГц [4];
- радиооборудование миллиметрового диапазона длин волн имеет более высокие фазовые шумы и более низкую выходную мощность;
- использование базовых станций миллиметрового диапазона ограничено вблизи некоторых объектов, например станций спутниковой связи, из-за проблем ЭМС.

Консорциум 3GPP предусматривает гибкое использование полос частот в зависимости от плотности распределения абонентов и их потребностей в трафике. Работа сетей 5G на частотах ниже 6 ГГц, как предполагается, будет использоваться для «низкоскоростной» гарантированной связи, в то время как миллиметровый диапазон будет задействован преимущественно для обеспечения высоких скоростей передачи.

На рисунке 2 графически представлена информация о распределении частотного ресурса для сетей 5G в глобальном масштабе и на региональном уровне. Полоса 3,3...3,6 ГГц была определена МСЭ-R в качестве глобальной. В зависимости от региона мира, в диапазоне частот ниже 6 ГГц для работы сетей 5G дополнительно рассматриваются полосы частот 3,3...4,2 ГГц (США, Япония, Южная Корея, Китай) и 4,4...5,0 ГГц (Китай, Япония и другие страны Азиатско-Тихоокеанского региона). Для первичной отработки технологии 5G многие страны планируют использовать (либо уже используют) полосу 0,6...0,7 ГГц, которая в дальнейшем может быть задействована для обеспечения связи 5G с подвижными объектами.

По результатам обсуждения на Всемирной конференции радиосвязи МСЭ-R оценил минимальную потребность в частотном ресурсе для 5G на уровне 20 ГГц [5]. Однако в настоящее время выделить такую полосу, в особенности по всему миру, невозможно из-за действующего распределения частот между радиослужбами, в первую очередь в области фиксированной спутниковой связи. По этой причине для сетей 5G на частотах выше 6 ГГц предполагается выделение нескольких полос частот, причём для каждой из них необходимо использовать индивидуальные приёмо-передающие

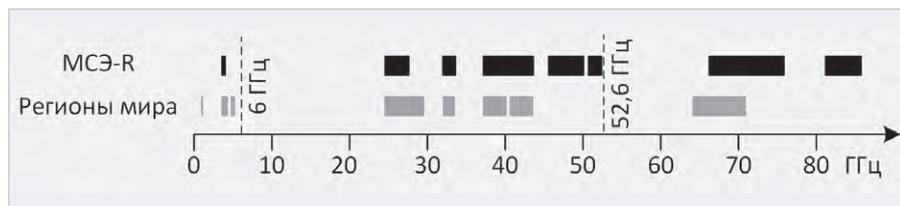


Рис. 2. Глобальное и региональное распределение частотного ресурса для сетей 5G

Таблица 1. Характеристики OFDM-модуляции для 5G (3GPP, rel.15)

Разнос несущих, кГц	15	30	60	120
Диапазон частот, ГГц	0,45...6	0,45...6	0,45...6 24...52,6	24...52,6
Длительность передачи OFDM-символа, мкс	66,67	33,33	16,67	8,33
Длительность циклического префикса, мкс	4,69	2,34	1,17	0,59
Длительность передачи OFDM-символа с циклическим префиксом, мкс	71,35	35,68	17,84	8,91
Максимальная полоса сигнала, МГц	50	100	200	400

устройства. Ввиду того, что загруженность спектра в значительной степени зависит от региона мира и даже от государства, в дополнение к глобальным частотам 5G, выделенным МСЭ-R, некоторые страны рассматривают использование дополнительных полос частот 26,5...29,5 ГГц (США, Южная Корея, Канада), 37...40 ГГц (США, Канада); 64...71 ГГц (Канада). В Европе для сетей 5G планируется использовать диапазоны 31,8...33,4 и 40,5...43,5 ГГц.

Из представленной информации о частотных планах 5G следует, что базовые станции и АТ сетей пятого поколения в перспективе будут работать в существенно отличающихся диапазонах частот, для каждого из которых, возможно, потребуются использовать собственные нормы ЭМС, в т.ч. регионального охвата, в зависимости от характера совмещаемых радиослужб.

В Российской Федерации выделение частот для радиослужб осуществляется Государственной комиссией по радиочастотам. Совсем недавно ГКРЧ принято решение № 20-54-02 [6], согласно которому полосы частот 0,694...0,790; 2,3...2,4; 2,57...2,62; 4,4...4,99; 24,25...27,5 ГГц являются перспективными для построения сетей связи стандарта 5G. При этом для развёртывания сетей 5G в РФ будут использоваться частоты 4,4...4,99 и 24,25...24,65 ГГц, однако приоритет отдаётся последней из них, что идёт в разрез с порядком внедрения 5G в других странах. Использование полосы частот 3,3...4,2 ГГц, применяемой во многих странах на начальном этапе развёртывания, признано ГКРЧ невозможным из-за занятости данного диапазона радиотехническими системами военного назначения и спутниковой

связью. По мнению специалистов, в будущем это может значительно замедлить развёртывание сетей 5G в нашей стране, т.к. для них придётся проектировать специальное оборудование. Дополнительной проблемой является необходимость работ по конверсии спектра для обеспечения всех пользователей радиочастотным ресурсом.

Физический уровень сетей 5G

Ключевыми аспектами физического уровня сетей 5G являются принципы модуляции, организация передачи и приёма в восходящем и нисходящем каналах, а также многоантенная передача и приём. В конечном счёте все они и определяют критерии обеспечения межсистемной ЭМС с другими радиослужбами. Технология 5G во многом повторяет способы передачи информации сетей 4G, но с учётом необходимого их нелинейного масштабирования, а также изменений, определяемых переходом в миллиметровый диапазон.

В сетях 5G планируется использовать сигналы с OFDM-модуляцией, а для несущих будет поддерживаться QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM, как и в сетях 4G. В восходящих каналах будет поддерживаться $\pi/2$ -BPSK-модуляция для уменьшения отношения пиковой мощности к средней, что повышает эффективность работы усилителей. В будущем номенклатура поддерживаемых схем модуляции может быть расширена для более рационального использования спектра, например, рассматривается вариант применения модуляции 1024QAM для связи между неподвижными точками. Характеристики OFDM-модуляции для 5G в зависимости от диапазона частот представлены в таблице 1.

С учётом значительного влияния многолучёвости, в сетях 5G используется циклический префикс (CP-OFDM) как в восходящих, так и в нисходящих каналах, по крайней мере до частоты 52,6 ГГц, в то время как в технологии 4G циклический префикс используется только для передач по нисходящей линии, а для передачи в обратном направлении применяется модуляция DFTS-OFDM [1]. Как предполагается, после отработки технологии 5G на опытных сетях базовые станции смогут задавать тип передачи данных — CP-OFDM или DFTS-OFDM в зависимости от формируемого пространством канала распространения радиоволн, соответственно, АТ должны поддерживать оба этих варианта. На физическом уровне несущие OFDM передаются группами с объединением по 12 шт., что соответствует одному физическому ресурсному блоку и учитывается при подготовке данных к передаче. Далее ресурсные блоки объединяются в субкадры с длительностью передачи 1 мс, включающие, например, 14 символов OFDM при разносе несущих 15 кГц.

Как следует из таблицы 1, в сетях 5G может применяться модуляция с минимальным разносом несущих, равным 15 кГц, что соответствует стандарту 4G. Масштабирование реализуется с коэффициентом $2n$, где $n = 1, 2$ или 3 в зависимости от диапазона частот. Загрузка циклическим префиксом составляет 7% от физической пропускной способности. Максимальное количество несущих в одном канале для сетей 5G составляет 3300. В перспективе дополнительное повышение пропускной способности может быть достигнуто агрегацией до 16 таких каналов, как это предусматривает 15-е издание спецификации NR.

Для решения проблем межсистемной ЭМС для сетей 4G и 5G предусмотрены некоторые ограничения по использованию крайних несущих сигналов CP-OFDM. Если в первом случае допускается использование до 90% спектрального ресурса каналов, то для 5G, как ожидается, оно составит от 94 до 99% за счёт применения новых, более эффективных технологий фильтрации.

Значительные отличия между 4G и 5G имеются в части использования для приёма и передачи нескольких антенн. Это предусматривалось и в 4G, но для 5G оно имеет фундаментальное значение, поскольку концепция NR раз-

рабатывалась с учётом использования направленного излучения и приёма для достижения приемлемого размера зон покрытия, а также для достижения требуемой пропускной способности с учётом значительного расширения спектра. Использование направленного излучения и приёма позволяет значительно уменьшить необходимую мощность передающих устройств при прочих равных условиях, компенсируя и повышенные потери на распространение радиоволн. При этом управление угловым положением максимума диаграммы направленности должно осуществляться как базовыми станциями, так и абонентскими терминалами, для чего в 5G реализуется передача информации о состоянии канала (CSI, Channel State Information). По этому же принципу передаются широкополосные сообщения, и выполняется первичная идентификация в радиосети. Использование направленного излучения и приёма играет важнейшую роль и в обеспечении ЭМС за счёт ограничения эмиссии по незадействованным направлениям в соответствии с уровнем боковых лепестков, а также уменьшении вероятности дуэльных ситуаций между узлами радиосети.

Использование мультиантенного приёма и передачи (MIMO, Multiple Input Multiple Output) в технологии 4G предусматривалось для повышения спектральной эффективности радиосетей и соответствующего повышения пропускной способности при исчерпании спектра в обычном режиме при большой нагрузке. Учитывая крайнюю ограниченность частотных присвоений в диапазоне ниже 6 ГГц, для 5G технология MIMO сохранена, и во многом этому способствовало развитие цифровых способов управления многоэлементами фазированными антенными решётками с большим количеством элементов [7].

Радиосети 5G предполагают использование кодирования с низкой плотностью контроля чётности, для реализации которого в настоящее время разработаны аппаратные решения на программируемых логических схемах для работы со скоростью до нескольких гигабит в секунду. Для управления физическими каналами используется полярное кодирование, наиболее подходящее для передачи малых объёмов служебной информации. Также технология NR предусматривает сочетание различных видов кодирования для

достижения компромисса между производительностью и достоверностью передачи данных.

Для упрощения установления и поддержания связи между узлами в сетях 5G часть частотно-временного ресурса выделяется для передачи данных так называемых физических каналов, включающих в себя опорные сигналы и другую информацию. В нисходящих и восходящих линиях в сетях 5G реализуются следующие физические каналы:

- нисходящий канал передачи данных (PDSCH);
- канал управления нисходящей линией связи (PDCCH);
- широкополосный канал передачи информации для получения АТ доступа к сети (PBCH);
- восходящий канал передачи данных (PUSCH);
- канал управления восходящей линией связи (PUCCH);
- канал произвольного доступа (PRACH), при помощи которого АТ запрашивают установку соединения с базовыми станциями (БС).

Частотно-временной ресурс, соответствующий физическому уровню 5G, но используемый для передачи информации физических каналов, обычно называют опорными физическими сигналами [1]. Они применяются для обеспечения демодуляции сигналов восходящего и нисходящего направления, для синхронизации и оценки состояния канала передачи. В нисходящей линии 5G используются опорные сигналы демодуляции (DM-RS), отслеживания фазы (PT-RS), информации о состоянии канала (CSI-RS), а также сигналы первичной и вторичной синхронизации (PSS, SSS). Для восходящей линии применяются опорные сигналы демодуляции, отслеживания фазы и зондирующий опорный сигнал (SRS).

Для обеспечения дуплексного режима связи сети 5G поддерживают режимы с временным (TDD) и частотным (FDD) разделением. Принцип реализации дуплексной схемы обычно зависит от диапазона частот, причём на более низких частотах обычно используется FDD, а на более высоких частотах — TDD. Дополнительно NR поддерживает динамическое временное разделение, при котором в случае необходимости изменяется время, отводимое на передачу в восходящей и нисходящей линиях. В этом заключается одно из ключе-

вых улучшений 4G, которое полезно в сценариях с быстрыми изменениями трафика.

Проблема межсистемной ЭМС для сетей 5G и совмещаемые радиослужбы

В классической трактовке проблема межсистемной ЭМС состоит в нежелательном взаимодействии двух и более радиослужб, работающих с использованием излучений электромагнитных волн в эфир. Для каждой конкретной радиослужбы используются специально разработанные критерии сохранения допустимого качества функционирования, которые обычно формулируются в категориях защитных отношений, частотного или пространственного разнесения [3]. Обеспечение межсистемной ЭМС при нежелательном действии помех от устройств 5G для радиоэлектронных средств других радиослужб будет построено на выполнении таких критериев.

Вместе с тем обострению проблем межсистемной ЭМС для сетей 5G способствуют следующие факторы:

1. технология 5G предполагает использование излучения с подвижной диаграммой направленности. Это приводит к формированию нестационарной электромагнитной обстановки и ограничивает использование для её прогнозирования метода гарантированных диаграмм направленности, широко применяемого при частотно-территориальном планировании. Одновременно меняется во времени помехоустойчивость и уровень излучений, формируемых устройствами 5G;

2. за счёт перехода в миллиметровый диапазон размеры зон обслуживания для одиночных базовых станций (БС) будут уменьшаться, а их количество – увеличиваться. С учётом использования широкополосных сигналов, а также того, что БС, обслуживающие соседние зоны, обычно работают с использованием отличающихся частотных присвоений, типы и количество электромагнитно совмещаемых с сетями 5G радиоэлектронных средств будут существенно отличаться от зоны к зоне. Ввиду этого присвоение частот не получится реализовать простым периодическим повторением для охвата заданной области, оно должно быть проработано на основе более глубоко частного анализа.

Таблица 2. Радиослужбы, совмещаемые с радиосредствами сетей 5G

Диапазон частот 5G, ГГц	Совмещаемая радиослужба	Диапазон частот совмещаемой радиослужбы, ГГц
0,694...0,79	Радиовещательная	0,694...0,79
	Воздушная радионавигационная	0,726...0,79
2,3...2,4	Подвижная	2,3...2,45
	Радиолокационная	
	Фиксированная	
2,57...2,62	Подвижная	2,52...2,67
	Радиолокационная	
	Радиовещательная	
	Спутниковая	
4,4...4,99	Подвижная	4,4...4,99
	Фиксированная	4,5...4,8
	Фиксированная спутниковая	
24,25...27,5	Фиксированная	25,25...27,5
	Подвижная	25,5...27
	Космических исследований	

3. для полноценной работы сетей 5G необходима беспрецедентно широкая полоса частот – до нескольких гигагерц. Учитывая территориальную неоднородность использования радиочастотного ресурса, по-видимому, в некоторых случаях новая технология связи будет внедряться на когнитивной основе. Это требует разработки особых критериев обеспечения межсистемной ЭМС для радиоэлектронных средств, совместно использующих одни и те же полосы частот.

Как отмечалось выше, для внедрения радиотехнологии 5G в Российской Федерации ГКРЧ установлены полосы 0,694...0,790; 2,3...2,4; 2,57...2,62; 4,4...4,99 и 24,25...27,5 ГГц. В настоящее время в этих диапазонах возможна работа ряда радиослужб (см. табл. 2), причём почти все они относятся к категории совместного использования радиоэлектронными средствами гражданского и специального назначения либо используются радиосредствами правительственной принадлежности [8]. Межспутниковая радиослужба в таблицу не внесена.

Выработка критериев обеспечения межсистемной ЭМС для радиоэлектронных средств сетей 5G и других радиослужб является одной из первоочередных задач при внедрении новой радиотехнологии. Обычно критерии вначале обосновываются теоретически, а затем уточняются с применением технических средств, например путём измерений в опытных зонах. И для тестирования узлов сетей 5G, и для выработки названных критериев в части воздействия радиопомех на устройства 5G должны использоваться специально предназначенные для этого средства измерений.

Номенклатура и условия измерений параметров, подлежащих контролю в сетях 5G в обеспечение межсистемной ЭМС

Кратко рассмотренные особенности передачи сигналов в сетях 5G позволяют установить необходимость расширения принципов тестирования по ЭМС, применяемых для БС и АТ сетей 4G. В особенности это касается внедрения многоантенных технологий, без которых работа радиосетей в миллиметровом диапазоне, за редкими исключениями, блокируется замираниями. Значительная предельная полоса радиоканалов 5G не позволяет считать передаваемые сигналы узкополосными в привычном для большинства применений понимании и приводит к необходимости применения средств тестирования, в которых эта особенность учтена многопортовой калибровкой. Лучшим вариантом здесь является имитация реальных условий эксплуатации и целостного, а не фрагментарного тестирования. Этой концепции наилучшим образом удовлетворяют специально разработанные измерительные установки.

Классические подходы к обеспечению межсистемной ЭМС предусматривают использование двух разновидностей радиоизмерений, отличающихся по ожидаемому результату и назначению. Первая из них относится к испытаниям АТ и БС, в ходе которых оценивается совокупность характеристик для сопоставления с выработанными нормами, соблюдение которых в совокупности является комплексным критерием обеспечения ЭМС [9]. Вторая разновидность радиоизмерений реали-

зуются в ходе эксплуатации радиосетей при проведении радиоконтроля полномоченными организациями и охватывает те характеристики излучений базовых станций, которые позволяют проверить соблюдение разрешений на использование радиоэлектронных средств. Согласно справочнику по радиоконтролю [7], в типовом случае по излучениям радиопередающих объектов оцениваются напряжённость электромагнитного поля, центральная частота и занимаемая полоса. При этом используются классические подходы к испытаниям, которые должны быть дополнены обеспечением требуемых режимов работы тестируемого узла радиосети. Однако такие понятия, как центральная частота и занимаемая полоса, должны применяться с осторожностью к излучениям 5G, отличающимся высокой нестационарностью спектрального состава.

Совокупность названных спектральных параметров, очевидно, недостаточна для оценки соблюдения ЭМС в сетях 5G, и для её расширения целесообразно обратиться к документам 3GPP, определяющим содержание соответствующих испытаний для БС и АТ. Спецификация [10], действие которой распространяется на БС сетей 5G и работающее совместно с ними вспомогательное оборудование, рассматривает эти технические средства как объекты многопортового подключения. Для них выделяют порты питания постоянного и переменного тока, порты контроля и управления, антенные порты, порты заземления и корпуса. Последний, в соответствии с принятыми в иностранной литературе подходами, определяет помехоустойчивость к электромагнитным полям и их эмиссию в строгом отделении от аналогичных свойств антенных портов. В рамках межсистемной ЭМС испытания БС проводятся на антенных и телекоммуникационных портах.

При тестировании БС конфигурируются для работы в заданном частотном диапазоне и заданной полосе. Для БС формируется особая испытательная среда, включающая канал связи с некоторым ответным устройством, а также измерительные средства, позволяющие оценить качество работы БС, например телекоммуникационные тестеры. Дополнительно создаются условия для предотвращения действия посторонних радиопомех на объект испытаний, и для этого могут использоваться

безэховые камеры, в т.ч. настольного исполнения. В среду испытаний также встраивается источник электромагнитных воздействий, для которых оценивается помехоустойчивость БС.

В качестве мешающих воздействий спецификация [11] предусматривает использование только узкополосных сигналов (с полосой, много меньшей ширины канала). При этом считается допустимым появление узкополосных откликов, проявляющихся в снижении выходных показателей работы БС ниже установленных значений. Их сохранение при отстройке в интервале до удвоенной полосы рабочего канала считается широкополосным откликом, что является недопустимым для БС.

Большая часть испытаний БС проводится при номинальной выходной мощности. Для уменьшения количества варьируемых параметров и упрощения тестовой процедуры спецификация [11] определяет, что БС 5G, предназначенные для работы в одноканальном режиме, испытываются при наиболее узкой рабочей полосе и минимальном разноразносе несущих; при этом оценивается помехоустойчивость и помехоэмиссия БС в сечении, соответствующем антенным портам. Станции, способные работать одновременно в нескольких каналах, тестируются с разным частотным разноразносом несущих. Дополнительно условия тестирования БС по ЭМС конкретизируются спецификациями [10, 12]. Для исключения влияния особенностей передаваемых в канале связи данных на повторяемость и воспроизводимость результатов тестирования их состав устанавливается спецификацией [13].

В качестве критерия обеспечения ЭМС при воздействии помех на антенные порты БС спецификация [11] устанавливает снижение пропускной способности БС не более чем на 5% от значения, соответствующего отсутствию помех в среде передачи. Данный критерий применяется для всех сочетаний полос частот канала, всех разноразносов несущих OFDM, а также частотных диапазонов работы сетей 5G. Если БС тестируется в связке с АТ, то допускается двукратное снижение пропускной способности. Для проверки соблюдения этого критерия сигналы, передаваемые в испытательной среде, необходимо обрабатывать с демодуляцией и выделением каналов физического уровня, для чего применяются радиокоммуникационные тестеры как сред-

ство наиболее глубокого сигнального анализа.

Таким образом, для БС определяющим условием межсистемной ЭМС, вне зависимости от возможных источников её нарушения, является минимальное ухудшение пропускной способности канала и отсутствие разрывов связи с абонентскими терминалами. При этом важно подчеркнуть, что сложность организации протокола передачи данных в сетях 5G не позволяет осуществить однозначную трансформацию этого критерия в категории частотного, пространственного или временного разноразноса [9]. Традиционное понятие защитных отношений здесь также малоприменимо.

Методы испытаний в части межсистемной ЭМС для АТ сетей 5G устанавливаются спецификацией [14] и принципиально не отличаются от аналогичных испытаний для БС. При наличии технической возможности испытательная среда локализуется в коаксиальном либо ином закрытом тракте, и здесь в большей степени целесообразно применение настольных безэховых камер, если учитывать небольшие размеры АТ. Ответное устройство, взаимодействующее при испытаниях с АТ, должно полностью эмулировать функции БС или, по крайней мере, обеспечивать вызов АТ и другие важнейшие функции. В отличие от спецификации [11] на БС, здесь отсутствует явное указание на критерий обеспечения межсистемной ЭМС при наличии внешних помех. Однако допускаемое в [14] распределение снижения производительности при тестировании БС в паре с АТ предполагает сходные критерии обеспечения межсистемной ЭМС. Таким образом, для определения условия сохранения ЭМС при наличии внешних помех, в т.ч. от других радиослужб, следует ориентироваться на снижение скорости обмена между БС и АТ.

Содержание измерений в обеспечении межсистемной ЭМС, проводимых для БС и АТ 5G, определяет предъявляемые к средствам измерений требования, одним из которых является системный уровень тестирования с возможностью оценки качества передачи данных. Второе требование состоит в максимальной автоматизации, не только ускоряющей измерения, но и позволяющей исключить грубые ошибки со стороны пользователей.

Одним из лидеров в части разработки и производства средств измерений

19-я МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ

ChipEXPO-2021

КОМПОНЕНТЫ | ОБОРУДОВАНИЕ | ТЕХНОЛОГИИ

ВЫСТАВКА ПРОЙДЕТ



14-16.09

В ТЕХНОПАРКЕ ИННОВАЦИОННОГО ЦЕНТРА



СКОЛКОВО



ТЕМАТИЧЕСКИЕ ЭКСПОЗИЦИИ:

- Экспозиция Департамента радиоэлектронной промышленности Минпромторга России, включая:
 - экспозицию предприятий, являющихся изготовителями изделий, включенных в единый реестр российской радиоэлектронной продукции (Постановление Правительства РФ №878)
 - экспозицию разработок, созданных в рамках государственной программы «Развитие электронной и радиоэлектронной промышленности на 2013-2025 годы» (Постановление Правительства РФ №109)
 - экспозицию разработок, обеспечивающих выполнение приоритетных национальных проектов.
- Дивизионы кластера «Радиоэлектроника» ГК «Ростех»
- Стартапы в электронике
- Квалифицированные поставщики ЭКБ
- Консорциумы и дизайн-центры по электронике
- Участники конкурса «Золотой Чип»
- Корпорация развития Зеленограда

ОФИЦИАЛЬНАЯ ПОДДЕРЖКА:



ОРГАНИЗАТОРЫ:

ЗАО «ЧипЭКСПО» Москва, 121351, ул. Ярцевская, д.4. Тел.: +7 (495) 221-50-15
E-mail: info@chipexpo.ru <http://www.chipexpo.ru>

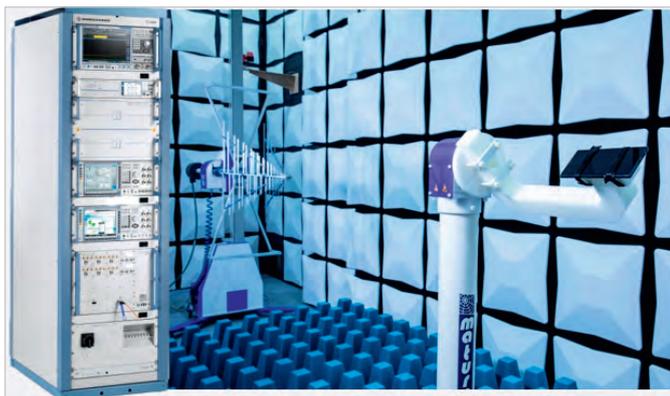


Рис. 3. Внешний вид тестовой системы R&S TS8996, обеспечивающей проведение испытаний устройств 2G/3G/4G/5G/WLAN/BT

и систем для тестирования БС и АТ 5G, отвечающих этим требованиям, является компания Rohde&Schwarz.

Измерительные средства и установки компании Rohde&Schwarz для тестирования устройств 5G по требованиям ЭМС

Среди технических средств, предназначенных для тестирования элементов радиосетей, можно выделить ориентированные на несигнальный и сигнальный (системный) режимы. В несигнальном режиме обычно проверяются качество модуляции, фазовые соотношения для режима MIMO, линейные тракты базовых станций.

Тестирование в несигнальном режиме обычно реализуется в профильных лабораториях для БС с применением универсальных средств измерений, дополненных необходимыми опциями. На системном уровне устройства тестируются целиком в составе эмулированной сети в соответствии с алгоритмами её работы. Компания Rohde&Schwarz разработала ряд контрольно-измерительных решений для обоих уровней.

Тестирование в несигнальном режиме в диапазоне частот FR1 (410...7125 МГц [14]) может быть реализовано с применением осциллографов R&S RTP (полоса до 16 ГГц [15]), в т.ч. в режиме MIMO. В этом случае осциллограф выполняет функции по захвату сигналов, а их анализ осуществляется при помощи программного обеспечения Vector Signal Analyzer, реализующего векторный анализ сигналов 5G на уровне модуляции несущих OFDM (опция R&S VSE-K146 [16]). Результатом такого анализа будут показатели качества модуляции, например MER, дисбаланс сигнального созвездия, смещение по частоте и т.д. Наличие проблем ЭМС также можно

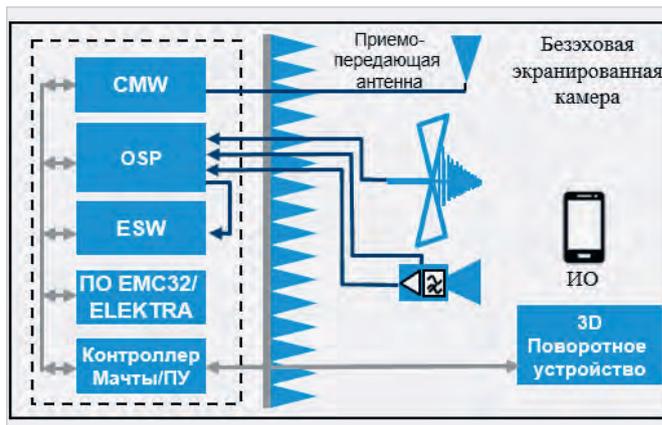


Рис. 4. Структурная схема тестовой системы R&S TS8996

анализировать в несигнальном режиме – они будут проявляться в ухудшении показателей качества модуляции. Аналогичное решение несигнального уровня опционально реализовано на аппаратно-программной платформе анализаторов спектра и сигналов серии R&S FSW [17].

Несмотря на то что универсальные лабораторные средства измерений дают ряд преимуществ при решении типовых измерительных задач, для отладки и тестирования элементов сетей 5G на системном уровне необходимо использовать специализированные автоматизированные тестовые системы (ТС), например R&S TS8996 [18] (см. рис. 3, 4). Основное назначение использования ТС состоит в снижении времени тестирования единичного устройства при одновременном максимальном приближении к условиям эксплуатации испытуемых объектов. В основе такой функциональности системы R&S TS8996 лежит использование измерительных приёмников и радиокommunikационных тестеров передового уровня.

Система R&S TS8996 предназначена для тестирования устройств беспроводной передачи данных в части как обеспечения межсистемной ЭМС, так и эмиссии излучаемых радиопомех (исключая штатные излучения для обеспечения работы радиосети), в т.ч. различных АТ и устройств IoT. Для тестирования устройств 5G в диапазоне FR1 было использовано выработанное для сетей 4G решение с расширением диапазона частот до 7,125 ГГц. В состав ТС (см. рис. 4) входит измерительный приёмник высшего класса R&S ESW44 с опцией R&S ESW-B21, непосредственно используемый для оценки эмиссии в диапазоне частот до 200 ГГц. Поскольку анализ паразитной помехоэмиссии

при сканировании в широком диапазоне частот занимает немало времени (в особенности для полосы от 9 кГц до 1 ГГц при использовании квазипикового детектора), то для R&S ESW разработан специальный режим Fast TDS, отличающийся снижением времени сканирования с использованием квазипикового детектора и одновременно обеспечивающий регистрацию импульсных помех с пониженной частотой повторения – до 10 Гц. При необходимости, измерения такого рода могут быть выполнены в режиме Automatic TDS, при котором настройки сканирования оптимизируются в зависимости от характера помехоэмиссии, и сохраняется соответствие измерительной установки требованиям стандартов группы CISPR 16-1, устанавливающих порядок и условия измерения радиопомех.

Отличительной чертой сетей 5G является фактически глобальный широкий охват диапазонов сантиметровых и миллиметровых волн, что предъявляет особые требования как к измерительному приёмнику, так и к применяемым антеннам. Для перекрытия диапазона FR2 и частот вплоть до 200 ГГц используются специальные приёмные блоки R&S TC-RSE, реализующие перенос сигналов на промежуточную частоту. Тестирование на сигнальном уровне реализуется с применением радиокommunikационного тестера R&S CMX500. При этом для создания сигналов радиосети 5G применяется блок формирования R&S TS-PRE, который обеспечивает регулировку выходной мощности в диапазоне, необходимом для тестирования БС и АТ. Передающие модули R&S TC-MX, а также векторный генератор R&S SMW200A с полосой рабочих частот до 40 ГГц используются для формирования помеховых воздействий.

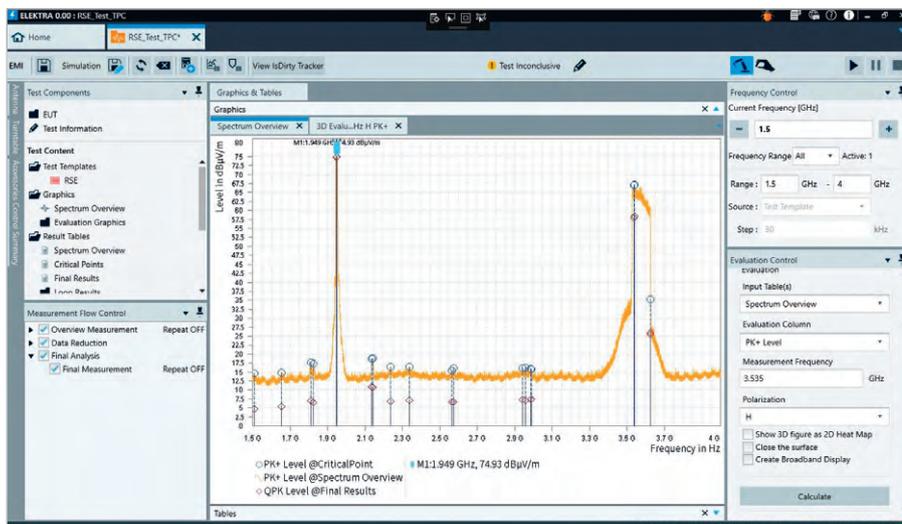


Рис. 5. Интерфейс программной платформы R&S ELEKTRA для управления испытаниями и проведения измерений эмиссии излучаемых радиопомех

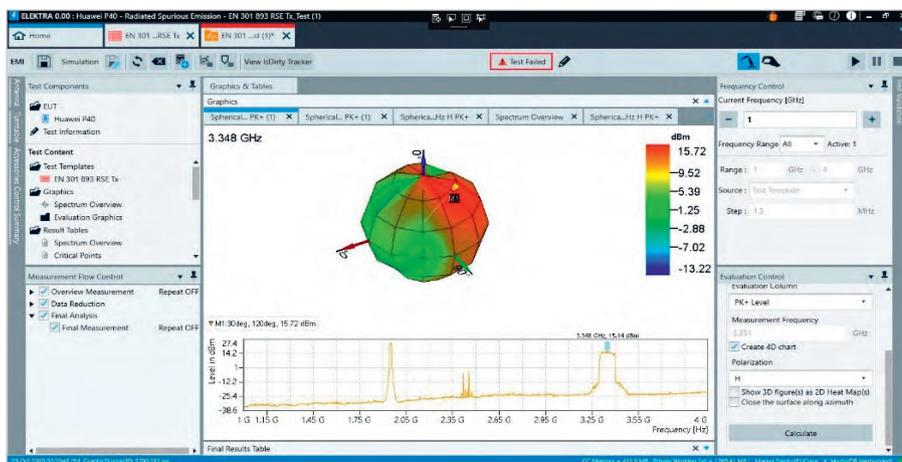


Рис. 6. Форма графического представления результатов измерений диаграмм направленности

При необходимости реализуется перенос сигналов на более высокие частоты – вплоть до 200 ГГц.

В схеме измерительной установки, представленной на рисунке 4, в зависимости от текущих задач измерений используются разные конфигурации радиочастотного тракта. Для осуществления переключения радиочастотного тракта предусмотрено использование блока управления R&S OSP220 в комплекте с коммутационными модулями R&S OSB-B153. Специально для тестирования устройств 5G в диапазоне FR1 разработан блок коммутации сигналов повышенной мощности R&S OSP-B155G. Путём замены входящих в состав TC R&S TS8996 модулей она может быть легко модернизирована с увеличением максимальной частоты тестирования.

Проведение испытаний устройств 5G в части обеспечения ЭМС с применением ручного управления исключается их объёмом и сопутствующими затратами

времени. Ввиду этого все технические средства TC R&S TS8996 функционируют под управлением специализированного программного обеспечения R&S ELEKTRA, являющегося одним из наиболее функциональных средств автоматизации проведения стандартизованных и пользовательских испытаний по ЭМС. Для проведения испытаний в описанном выше составе необходимы модули ELEM1-EAS, ELEM1-RSE и ELEM1-5GS (см. рис. 5).

Как отмечалось выше, в сетях 5G предусмотрена реализация управления диаграммами направленности антенн, что необходимо как для компенсации потерь на распространение в свободном пространстве, так и для уменьшения нежелательного взаимодействия через эфир. Для измерений 2D/3D диаграмм направленности, а также различных их сечений применяется модуль ПО ELEKTRA ELEM1-3D (см. рис. 6). Такие измерения доступны во всём частотном диапазоне рабо-

ты тестовой системы. Задача измерения формы диаграмм направленности особо актуальна для устройств 5G миллиметрового диапазона [19, 20].

Отдельным вопросом является тестирование устройств 5G в диапазоне FR2, для работы в котором обычно применяются интегрированные антенны. В этом случае для создания испытательной среды могут быть использованы экранированные камеры настольного исполнения, например R&S CMQ200, дополненные радиокommunikационным тестером R&S CMP200 и выносным модулем R&S CMPHEAD30 [21], специально предназначенным для реализации беспроводного подключения, а также другие решения [22, 23].

Заключение

Внедрение технологии радиосвязи 5G NR имеет кардинальные отличия от сетей предыдущего поколения. В первую очередь это определяется потребностью в выделении крайне значительного спектрального ресурса, обусловленного сферами планируемого применения новой технологии и определяющего использование миллиметрового диапазона.

Важной особенностью тестирования в обеспечение ЭМС сетей 5G является необходимость создания тестовой среды, которая качественно имитировала бы реальные условия эксплуатации и не оказывала значимого влияния на передачу радиоволн. Решения компании Rohde&Schwarz с применением безэховых экранированных камер, ориентированные в первую очередь на диапазон частот FR2, позволяют создать закрытые тракты для работы с устройствами 5G без разъемов для подключения антенн, одновременно имитирующие условия свободного пространства.

Что касается межсистемной ЭМС, то, как это следует из обзора спецификаций [10, 16], для БС и АТ критерий ЭМС при воздействии внешних помех состоит в снижении пропускной способности до уровня не ниже 95% от базового значения. По-видимому, в ходе развертывания сетей 5G, в т.ч. и в Российской Федерации, будут сформулированы дополнительные критерии ЭМС в отношении радиоэлектронных средств конкретных радиослужб, что необходимо для частотного планирования и выдачи разрешений на передающие средства 5G. Проведение измерений для оценки соответствия устройств 5G этому и любому другому критерию, сформу-

лированному в таких же или близких категориях, на несигнальном уровне невозможно и требует использования радиокоммуникационных тестеров, например R&S CMX500 и R&S CMW500.

Наиболее перспективным решением для тестирования сетей 5G являются комплексные измерительные системы на базе комбинации измерительных приёмников и радиокоммуникационных тестеров, обеспечивающих проведение комплексного тестирования как по помехоэмиссии, так и с эмуляцией работы сети для оценки её производительности. Такая структура ТС является оптимальной с точки зрения задействования модулей переноса по частоте и других элементов радиотракта и позволяет выполнять оба вида испытаний в едином цикле, что ускоряет и упрощает их проведение. При этом функция управления средствами измерений и конфигурирования установки для конкретных видов измерений реализуется модулями ПО R&S ELEKTRA наряду с необходимыми калибровочными процедурами.

Литература

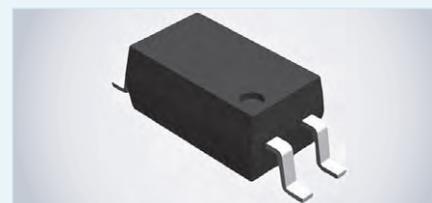
1. *Zaidi A., Athley F., Medbo J.* 5G Physical Layer. Principles, Models and Technology Components. — Academic Press, 2018. — 302 p.
2. *Гингард С.* Интернет вещей: будущее уже здесь. — М.: Альпина Пабlisher, 2016. — 180 с.
3. *Parkvall S., Dahlman E., Furuskar A., Frenne M.*, NR: the new 5G radio access technology. - IEEE Communications Standards Magazine (2017, Dec.). — Интернет-ресурс <https://ieeexplore.ieee.org/document/8258595> (дата обращения 07.09.2020).
4. *Бартнев В.А., Болотов Г.В., Быков В.Л. и др.* Спутниковая связь и вещание. 2-е изд. — Под ред. Кантора Л.Я. — М.: Радио и связь, 1997. — 528 с.
5. ITU-R, Liaison statement to task group 5/1-spectrum needs and characteristics for the terrestrial component of IMT in the frequency range between 24.25 GHz and 86 GHz. — ITU-R, WP 5D, Doc. TG5.1/36, 2017. — Интернет-ресурс <https://www.itu.int/md/R15-TG5.1-C-0036/es> (дата обращения 07.09.2020).
6. Решение ГКРЧ № 20-54-02 «Об определении диапазонов радиочастот для создания сетей связи стандарта 5G/IMT-2020 на территории Российской Федерации». — Протокол заседания № 20-54дсп от 14.04.2020. — Интернет-ресурс <https://digital.gov.ru/documents/7154> (дата обращения 21.07.20).
7. Справочник по управлению использованием спектра на национальном уровне. — Бюро радиосвязи МСЭ, 2002. — Интернет-ресурс https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-21-2005-PDF-R.pdf (дата обращения 07.09.2020).
8. Постановление правительства РФ от 21.12.2011 № 1049-34 «Об утверждении таблицы распределения полос радиочастот между радиослужбами РФ и признании утратившими силу некоторых постановлений правительства РФ».
9. *Бузов А.Л., Быховский М.А., Васехо Н.В. и др.* Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем. — Под ред. Быховского М.А. — М.: Эко-Трендз, 2006. — 376 с.
10. TS 38.141-1 «3GPP. NR; Base Station (BS) conformance testing Part 1: Conducted conformance testing». — Интернет-ресурс <http://www.3gpp.org> (дата обращения 07.09.2020).
11. TS 38.113 «3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; NR; Base Station (BS) ElectroMagnetic Compatibility (EMC). Rel. 15». — Интернет-ресурс <http://www.3gpp.org> (дата обращения 06.09.2020).
12. TS 38.141-2 «3GPP NR; Base Station (BS) conformance testing Part 2: Radiated conformance testing». — Интернет-ресурс <http://www.3gpp.org> (дата обращения 07.09.2020).
13. TS 38.104 «3GPP. NR; Base Station (BS) radio transmission and reception». — Интернет-ресурс <http://www.3gpp.org> (дата обращения 07.09.2020).
14. TS 38.124 «3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; NR; ElectroMagnetic Compatibility (EMC) requirements for mobile terminals and ancillary equipment. Rel. 15». — Интернет-ресурс <http://www.3gpp.org> (дата обращения 06.09.2020).
15. Осциллографы цифровые R&S RTP. Руководство по эксплуатации. v.01. — 1337.9952.02 — 856 с.
16. R&S VSE Vector Signal Explorer Software. Desktop signal analysis. Product Brochure, ver. 09.00. — 3607.1371.12. — 18 p.
17. R&S FSW Signal and Spectrum Analyzer. User Manual. — 1173.9411.02-19. — 1163 p.
18. *Gross T., Kausch J.* EMC test solution on the cutting EDGE. — White paper, Version 01.00. — PD 3608.6902.52. — 11 p.
19. *Young J., Viksted J.* 5G Millimeter Wave Devices: The Impact on EMC Compliance Tests. — TESTING & MEASUREMENT, 2019. — P. 67–72.
20. 5G New Radio - Fundamentals, Procedures, Testing aspects by Meik Kottkamp. — Интернет ресурс <https://gloris.rohde-schwarz.com/ebooks/5G> (дата обращения 16.12.2020).
21. Каталог контрольно-измерительного оборудования компании R&S. — Интернет-ресурс <https://info.rohde-schwarz.ru> (дата обращения 08.09.2020).
22. *Константинов А. С., Пивак А. В.* Решения компании Rohde&Schwarz для тестирования радиочастотного оборудования 5G NR FR1 & FR2 // Компоненты и технологии, 2020. № 10. — С. 94–99.
23. *Константинов А. С., Пивак А. В.* Анализ процедуры тестирования базовых станций на соответствие стандарту 5G NR. Беспроводные технологии, 2020. №2. — С. 40–43. ©

НОВОСТИ МИРА

Мощное фотореле в DIP-корпусе

Toshiba представила фотореле TLP241B в DIP-корпусе, которое может коммутировать токи до 2 А при напряжениях до 100 В. Реле предназначено для замены электромеханических реле промышленного применения. Компания видит применение реле в программируемых логических контроллерах (ПЛК), а также в системах автоматизации зданий, таких

как HVAC (отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха). Это первое фотореле на рынке, которое может иметь состояние выхода off-state во всём диапазоне напряжений от 40 до 100 В. В результате оно способно заменить крупногабаритные электромеханические реле. Возможна импульсная работа при токах до 6 А, а также работа при температуре от –40 до +110°C (с понижением напря-



жения). Прибор обеспечивает гальваническую изоляцию 5 кВ.

toshiba.semicon-storage.com



ПАТРОНАЖ ТПП РФ

21-23

СЕНТЯБРЯ 2020

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»

Radel

XX МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА РАДИОЭЛЕКТРОНИКА & ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ
- ПЕЧАТНЫЕ ПЛАТЫ И ДРУГИЕ НОСИТЕЛИ СХЕМ
- СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
- РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ
- РОБОТОТЕХНИКА
- КОНСТРУКТИВЫ
- МАТЕРИАЛЫ
- ТЕХНОЛОГИИ
- ПРОМЫШЛЕННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ИНСТРУМЕНТЫ
- КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ЛАБОРАТОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ



Реклама

ОРГАНИЗАТОР ВЫСТАВКИ:



radelexpo.ru (812) 777-04-07

Формальный дедуктивный анализ автоматного алгоритма управления генератором эндогаза с помощью платформы Rodin

Часть 3. Построение формальной теории для алгоритма управления

Максим Нейзов (neyzov.max@gmail.com)

Формальный дедуктивный анализ представляет собой строгий математический подход к верификации алгоритмов: алгоритм описывается с помощью аксиом, а требуемые свойства доказываются как теоремы. Цель представленного анализа – доказать соответствие алгоритма управления предъявляемым требованиям надежности и безопасности. В статье выполнено построение формальной теории для алгоритма управления: проведена аксиоматизация алгоритма, формализованы требования, продемонстрировано доказательство теоремы с помощью платформы Rodin.

Введение

В предыдущих частях статьи были определены требования надёжности и безопасности [1], предъявляемые к алгоритму, рассмотрены автоматный алгоритм управления и платформа Rodin [2]. В настоящей работе для верификации алгоритма выполняется формальный дедуктивный анализ, который состоит в построении формальной аксиоматической теории. Для этого алгоритм описывается с помощью аксиом, выполняется формализация требований и проводится автоматизированное доказательство теорем с помощью платформы Rodin.

Аксиоматика автоматов

Автоматы A и B [2] задаются с помощью аксиом в контексте (см. листинг 1

и 2 соответственно). Назначение аксиом представлено в таблице 1. Если аксиоматика противоречива, то модель не может быть запущена на исполнение.

Динамическая модель алгоритма и окружения

Аксиомы контекста задают статическую часть модели, машина задает динамическую часть [2]. Машина моделирует поведение СВА. В машине объявлены переменные и событие *iter* (см. листинг 3), изменяющее состояние машины. Событие может возникнуть с любыми параметрами $x_1...x_5$, удовлетворяющими охранным условиям $grd1...grd7$. Охранные условия $grd1...grd7$ моделируют поведение окружения автоматов. Условия $grd1...grd5$ ограничивают

тип параметров $x_1...x_5$. СВА имеет пять входов булевого типа. Условия $grd6, grd7$ ограничивают значения параметров x_2, x_3 . Данные ограничения обусловлены работой блоков f_RzG и f_RzK2 . Событие *iter* изменяет состояние машины, выполняя действия $act1...act20$. Действие $act1$ изменяет переменную a – текущее состояние автомата A, вызывая его функцию переходов dta . Действия $act2...act5$ изменяют выходы автомата A, вызывая его функции выходов $LA_y1...LA_y4$. Действие $act6$ изменяет переменную b – текущее состояние автомата B, вызывая его функцию переходов dtb . Действия $act7...act15$ изменяют выходы автомата B, вызывая его функции выходов $LB_y1...LB_y9$. Действия $act16...act20$ сохраняют значения параметров $x_1...x_5$ в соответствующие им переменные.

Формализация требований

Требования надёжности и безопасности $REQ1...REQ16$ [1] в виде математических утверждений $T1...T16$ записываются в разделе инвариантов машины (см. листинг 4) и должны быть доказаны как теоремы.

Теоремы $T1...T5$ утверждают, что указанные клапаны никогда не открыты одновременно ($REQ1...REQ5$).

Теорема $T6$ утверждает, что для любого клапана v , принадлежащего множеству клапанов $Valve = \{v_i | i=1...10\}$, при снятии сигнала Run клапан v закрывается ($REQ6$).

Теоремы $T7, T8$ утверждают, что компрессоры работают только при наличии соответствующих разрешений ($REQ7, REQ8$).

Теорема $T9$ утверждает, что при работе компрессора K2 клапан V2 всегда закрыт – это гарантирует, что воздушный компрессор K2 перекачивает только воздух ($REQ9$).

Теорема $T10$ утверждает, что при работе компрессора K1 всегда открыт только один из клапанов V1 или V2 – это гарантирует, что компрессор K1

Листинг 1

```
axm1: partition(A, {A1}, {A2}, {A3}, {A4})
axm2: InA = (BOOL × BOOL × BOOL)
axm3: a_1_2 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=TRUE ∧ x2=TRUE ∧ x3=TRUE}
axm4: a_2_3 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=TRUE ∧ x2=TRUE ∧ x3=FALSE}
axm5: a_2_4 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=TRUE ∧ x2=FALSE ∧ x3=TRUE}
axm6: a_234_1 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | (x1=FALSE ∧ x2∈BOOL ∧ x3∈BOOL) ∨ (x1∈BOOL ∧ x2=FALSE ∧ x3=FALSE)}
axm7: a_1_1 = InA \ (a_1_2)
axm8: a_2_2 = InA \ (a_2_3 ∪ a_2_4 ∪ a_234_1)
axm9: a_3_3 = InA \ (a_234_1)
axm10: a_4_4 = InA \ (a_234_1)
axm11: dta ∈ (A × InA) → A
axm12: ∀s, i. ((s=A1 ∧ i∈a_1_1) ∨ (s∈{A2, A3, A4} ∧ i∈a_234_1)) ⇔ dta(s ↦ i) = A1
axm13: ∀s, i. ((s=A1 ∧ i∈a_1_2) ∨ (s=A2 ∧ i∈a_2_2)) ⇔ dta(s ↦ i) = A2
axm14: ∀s, i. ((s=A2 ∧ i∈a_2_3) ∨ (s=A3 ∧ i∈a_3_3)) ⇔ dta(s ↦ i) = A3
axm15: ∀s, i. ((s=A2 ∧ i∈a_2_4) ∨ (s=A4 ∧ i∈a_4_4)) ⇔ dta(s ↦ i) = A4
axm16: LA_y1 ∈ A → BOOL
axm17: LA_y2 ∈ A → BOOL
axm18: LA_y3 ∈ A → BOOL
axm19: LA_y4 ∈ A → BOOL
axm20: ∀s. (s=A2 ∨ s=A3) ⇔ LA_y1(s) = TRUE
axm21: ∀s. (s=A2 ∨ s=A4) ⇔ LA_y2(s) = TRUE
axm22: ∀s. (s=A2) ⇔ LA_y3(s) = TRUE
axm23: ∀s. (s=A3) ⇔ LA_y4(s) = TRUE
```

перекачивает или газ, или воздух, но не их вместе (REQ10).

Теорема T11 утверждает, что если компрессоры K1 и K2 работают, то клапан V2 закрыт – это гарантирует, что компрессоры никогда не перекачивают одно и то же вещество (REQ11).

Теорема T12 утверждает, что снятие сигнала Run отключает компрессоры K1 и K2 (REQ12).

Теорема T13 утверждает, что клапаны V7 и V8 никогда не открыты одновременно – это гарантирует, что эндогаз не может подаваться в холодильник из двух реторт одновременно (REQ13).

Теорема T14_1 утверждает, что для реторты R1 никогда не открыт ни один из воздушных трактов к коллектору. Существует всего три тракта: тракт 1 – при открытии клапанов V7 и V9, тракт 2 – при открытии клапанов V7 и V4, тракт 3 – при открытии клапанов V7, V3, V2. Теорема T14_2 содержит аналогичное утверждение для реторты R2. Вместе теоремы T14_1 и T14_2 гарантируют, что в линии L3 никогда нет воздуха (REQ14).

Теорема T15 утверждает, что при подаче газа (работает компрессор K1 и открыт клапан V1) обязательно открыт газовый тракт через реторту (REQ15). Газовый тракт через реторту R1 возникает при открытии клапана V3 вместе с одним из клапанов V7, V9, через реторту R2 – при открытии клапана V5 вместе с одним из клапанов V8, V10.

Теорема T16 утверждает, что газ подаётся (открыт клапан V1 и работает компрессор K1) на две реторты (открыты клапаны V3 и V5) и одна из них работает на холодильник (открыт клапан V7 или V8) тогда и только тогда, когда одна реторта находится в рабочем режиме, а вторая в режиме продувки газом (автомат В находится в состоянии B6 или B8). Теорема T16 гарантирует выполнение требования REQ16.

Доказательство теорем

Теоремы T1...T16 были доказаны в интерактивном режиме. Дерево доказательства теоремы T16 представлено на рисунке 1. Основные леммы теоремы T16 представлены в таблице 2. Доказательство имеет следующую стратегию: эквиваленция теоремы разбивается на две импликации lem1 и lem2 (T16 = lem1 ∧ lem2). Левая часть импликации леммы lem1 добавляется к гипотезам и доказывает её правая часть: что функция dtb при принятых гипотезах возвраща-

Листинг 2

```
axm24: partition(B, {B1}, {B2}, {B3}, {B4}, {B5}, {B6}, {B7}, {B8}, {B9})
axm25: InB = (A × BOOL × BOOL)
axm26: b_1_4 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=A2 ∧ x2=TRUE ∧ x3∈BOOL}
axm27: b_9_8 = b_1_4
axm28: b_1_5 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=A2 ∧ x2=FALSE ∧ x3∈BOOL}
axm29: b_7_6 = b_1_5
axm30: b_4_7 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=A2 ∧ x2∈BOOL ∧ x3=TRUE}
axm31: b_5_9 = b_4_7
axm32: b_6_9 = b_4_7
axm33: b_8_7 = b_4_7
axm34: b_x_1 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=A1 ∧ x2∈BOOL ∧ x3∈BOOL}
axm35: b_x_2 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=A3 ∧ x2∈BOOL ∧ x3∈BOOL}
axm36: b_x_3 = {x1 ↦ x2 ↦ x3 | x1=A4 ∧ x2∈BOOL ∧ x3∈BOOL}
axm37: b_1_1 = InB\ (b_1_4 ∪ b_1_5)
axm38: b_2_2 = InB\ (b_x_1)
axm39: b_3_3 = InB\ (b_x_1)
axm40: b_4_4 = InB\ (b_x_1 ∪ b_x_2 ∪ b_x_3 ∪ b_4_7)
axm41: b_5_5 = InB\ (b_x_1 ∪ b_x_2 ∪ b_x_3 ∪ b_5_9)
axm42: b_6_6 = InB\ (b_x_1 ∪ b_x_2 ∪ b_x_3 ∪ b_6_9)
axm43: b_7_7 = InB\ (b_x_1 ∪ b_x_2 ∪ b_x_3 ∪ b_7_6)
axm44: b_8_8 = InB\ (b_x_1 ∪ b_x_2 ∪ b_x_3 ∪ b_8_7)
axm45: b_9_9 = InB\ (b_x_1 ∪ b_x_2 ∪ b_x_3 ∪ b_9_8)
axm46: dtb ∈ (B × InB) → B
axm47: ∀s,i • ((s=B1 ∧ i∈b_1_1) ∨ (s∈B\{B1} ∧ i∈b_x_1)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B1
axm48: ∀s,i • ((s=B2 ∧ i∈b_2_2) ∨ (s∈B\{B1,B2,B3} ∧ i∈b_x_2)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B2
axm49: ∀s,i • ((s=B3 ∧ i∈b_3_3) ∨ (s∈B\{B1,B2,B3} ∧ i∈b_x_3)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B3
axm50: ∀s,i • ((s=B4 ∧ i∈b_4_4) ∨ (s=B1 ∧ i∈b_1_4)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B4
axm51: ∀s,i • ((s=B5 ∧ i∈b_5_5) ∨ (s=B1 ∧ i∈b_1_5)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B5
axm52: ∀s,i • ((s=B6 ∧ i∈b_6_6) ∨ (s=B7 ∧ i∈b_7_6)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B6
axm53: ∀s,i • ((s=B7 ∧ i∈b_7_7) ∨ (s=B4 ∧ i∈b_4_7) ∨ (s=B8 ∧ i∈b_8_7)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B7
axm54: ∀s,i • ((s=B8 ∧ i∈b_8_8) ∨ (s=B9 ∧ i∈b_9_8)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B8
axm55: ∀s,i • ((s=B9 ∧ i∈b_9_9) ∨ (s=B5 ∧ i∈b_5_9) ∨ (s=B6 ∧ i∈b_6_9)) ⇔ dtb(s ↦ i) = B9
axm56: LB_y1 ∈ B → BOOL
axm57: LB_y2 ∈ B → BOOL
axm58: LB_y3 ∈ B → BOOL
axm59: LB_y4 ∈ B → BOOL
axm60: LB_y5 ∈ B → BOOL
axm61: LB_y6 ∈ B → BOOL
axm62: LB_y7 ∈ B → BOOL
axm63: LB_y8 ∈ B → BOOL
axm64: LB_y9 ∈ B → BOOL
axm65: ∀s•s∈{B2,B4,B6,B7,B8} ⇔ LB_y1(s) = TRUE
axm66: ∀s•s∈{B3,B5,B9} ⇔ LB_y2(s) = TRUE
axm67: ∀s•s∈{B2,B5,B6,B8,B9} ⇔ LB_y3(s) = TRUE
axm68: ∀s•s∈{B3,B4,B7} ⇔ LB_y4(s) = TRUE
axm69: ∀s•s∈{B6,B7} ⇔ LB_y5(s) = TRUE
axm70: ∀s•s∈{B8,B9} ⇔ LB_y6(s) = TRUE
axm71: ∀s•s∈{B2,B3,B4,B5,B8,B9} ⇔ LB_y7(s) = TRUE
axm72: ∀s•s∈{B2,B3,B4,B5,B6,B7} ⇔ LB_y8(s) = TRUE
axm73: ∀s•s∈{B4,B5,B6,B8} ⇔ LB_y9(s) = TRUE
```

Таблица 1. Назначение аксиом

Аксиома	Назначение (что определяет аксиома)
axm1	A – множество состояний автомата A
axm2	InA – множество всех векторов входных сигналов автомата A
axm3... axm10	a_i_j – множество векторов входных сигналов автомата A для перехода из состояния i в состояние j
axm11	Тип функции переходов автомата A
axm12... axm15	dta – функция переходов автомата A
axm16... axm19	Тип функции выходов автомата A
axm20... axm23	LA – функция выходов автомата A
axm24	B – множество состояний автомата B
axm25	InB – множество всех векторов входных сигналов автомата B
axm26... axm45	b_i_j – множество векторов входных сигналов автомата B для перехода из состояния i в состояние j
axm46	Тип функции переходов автомата B
axm47... axm55	dtb – функция переходов автомата B
axm56... axm64	Тип функции выходов автомата B
axm65... axm73	LB – функция выходов автомата B

ет значение B6 или B8. Лемма lem1.1 используется для доказательства леммы lem1. Лемма lem1.1 утверждает, что функция dtb при принятых гипотезах никогда не возвращает значения B1, B2, B3, B4, B5, B7, B9. В итоге из всех возможных значений функции dtb остаётся только два: B6 или B8, что и требовалось доказать в лемме lem1.

Левая часть импликации леммы lem2 добавляется к гипотезам, и доказывает её правая часть: что указанные функции выходов при принятых гипотезах имеют значения TRUE. Доказательство леммы lem2 разбивается на доказательство ряда лемм: lem2.1...lem2.5.

Лемма lem2.1 утверждает, что функция выходов LA_y3 имеет значение TRUE. Лемма lem2.1.1 используется для

Листинг 3

```

iter
ANY
x1
x2
x3
x4
x5
WHERE
grd1: x1 ∈ BOOL
grd2: x2 ∈ BOOL
grd3: x3 ∈ BOOL
grd4: x4 ∈ BOOL
grd5: x5 ∈ BOOL
grd6: (a = A3) ⇒ (x2 = TRUE ∧ x3 = FALSE)
grd7: (a = A4) ⇒ (x2 = FALSE ∧ x3 = TRUE)
THEN
act1: a := dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3))
act2: K1 := LA_y1(dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)))
act3: K2 := LA_y2(dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)))
act4: V1 := LA_y3(dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)))
act5: V2 := LA_y4(dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)))
act6: b := dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5))
act7: V3 := LB_y1(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act8: V4 := LB_y2(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act9: V5 := LB_y3(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act10: V6 := LB_y4(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act11: V7 := LB_y5(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act12: V8 := LB_y6(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act13: V9 := LB_y7(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act14: V10 := LB_y8(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act15: tmrQ := LB_y9(dtb(b ↦ (dta(a ↦ (x1 ↦ x2 ↦ x3)) ↦ x4 ↦ x5)))
act16: Run := x1
act17: RzG := x2
act18: RzK2 := x3
act19: sw1 := x4
act20: tmrI := x5
END
    
```

Листинг 4

```

INVARIANTS
T1: ¬(V1=TRUE ∧ V2=TRUE)
T2: ¬(V3=TRUE ∧ V4=TRUE)
T3: ¬(V5=TRUE ∧ V6=TRUE)
T4: ¬(V7=TRUE ∧ V9=TRUE)
T5: ¬(V8=TRUE ∧ V10=TRUE)
T6: ∀v•(v∈Valve ∧ Run=FALSE) ⇒ closed(v)=TRUE
T7: K1=TRUE ⇒ RzG=TRUE
T8: K2=TRUE ⇒ RzK2=TRUE
T9: K2=TRUE ⇒ V2=FALSE
T10: K1=TRUE ⇒ ((V1=TRUE ∧ V2=FALSE) ∨ (V2=TRUE ∧ V1=FALSE))
T11: (K1=TRUE ∧ K2=TRUE) ⇒ V2=FALSE
T12: (Run=FALSE) ⇒ (K1=FALSE ∧ K2=FALSE)
T13: ¬(V7=TRUE ∧ V8=TRUE)
T14_1: ¬((V7=TRUE ∧ V9=TRUE) ∨ (V7=TRUE ∧ V4=TRUE) ∨ (V7=TRUE ∧ V3=TRUE ∧ V2=TRUE))
T14_2: ¬((V8=TRUE ∧ V10=TRUE) ∨ (V8=TRUE ∧ V6=TRUE) ∨ (V8=TRUE ∧ V5=TRUE ∧ V2=TRUE))
T15: (K1=TRUE ∧ V1=TRUE) ⇒ ((V3=TRUE ∧ (V7=TRUE ∨ V9=TRUE)) ∨ (V5=TRUE ∧ (V8=TRUE ∨ V10=TRUE)))
T16: (V1=TRUE ∧ K1=TRUE ∧ V3=TRUE ∧ V5=TRUE ∧ (V7=TRUE ∨ V8=TRUE)) ⇔ (b=B6 ∨ b=B8)
    
```

доказательства леммы *lem2.1*. Лемма *lem2.1.1* утверждает, что функция *dta* при принятых гипотезах всегда возвращает значение *A2*. Доказательство леммы *lem2.1.1* основывается на том, что если функция *dtb* возвращает значение *B6* или *B8*, то функция *dta* не может вернуть ничего кроме *A2*. Если автомат *A* находится в состоянии *A2*, то *LA_y3* имеет значение *TRUE* (согласно аксиоме *axm22*), что и требовалось доказать в лемме *lem2.1*.

Лемма *lem2.2* утверждает, что функция выходов *LA_y1* имеет значение *TRUE*. Для доказательства этой леммы используется уже доказанная лемма *lem2.1.1* и аксиома *axm20*.

Лемма *lem2.3* утверждает, что функция выходов *LB_y1* имеет значение *TRUE*. Лемма *lem2.3.1* используется для доказательства леммы *lem2.3*. Лемма *lem2.3.1* утверждает, что функ-

ция *dtb* при принятых гипотезах всегда возвращает значения, принадлежащие множеству {*B2*, *B4*, *B6*, *B7*, *B8*}. Если автомат *B* находится в одном из перечисленных состояний, то *LB_y1* имеет значение *TRUE* (согласно аксиоме *axm65*), что и требовалось доказать в лемме *lem2.3*. Лемма *lem2.4* имеет аналогичное доказательство.

Лемма *lem2.5* утверждает, что функция выходов *LB_y5* или *LB_y6* имеет значение *TRUE*. В ветке доказательства леммы *lem2* принята следующая гипотеза: функция *dtb* возвращает значение *B6* или *B8*. Если функция *dtb* возвращает значение *B6*, то функция *LB_y5* имеет значение *TRUE* (согласно аксиоме *axm69*), если функция *dtb* возвращает значение *B8*, то функция *LB_y6* имеет значение *TRUE* (согласно аксиоме *axm70*), что и требовалось доказать

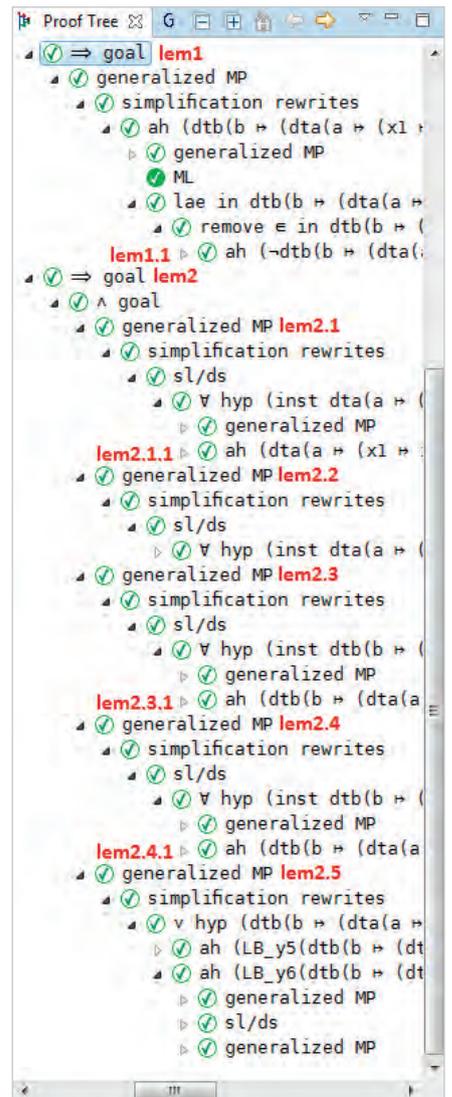


Рис. 1. Дерево доказательства теоремы T16

в лемме *lem2.5*. Таким образом, доказательство всех перечисленных лемм доказывает теорему *T16*. Леммы *lem1.1*, *lem2.1.1*, *lem2.3.1*, *lem2.4.1* были добавлены в дерево доказательства вручную, остальные леммы таблицы 2 были сгенерированы программой-прувером автоматически.

Заключение

В статье рассмотрен алгоритм управления генератором эндогаза, спроектированный как СВА. Для обеспечения надёжности и безопасности технологического процесса алгоритм должен гарантированно соответствовать ряду требований. Для доказательства соответствия требованиям выполняется формальный дедуктивный анализ. С помощью платформы *Rodin* строится математическая модель алгоритма и его окружения. Требования подлежат формализации. Каждое требование задаётся как инвариант машины,

Таблица 2. Основные леммы теоремы T16

Лемма	Утверждение
lem1	$LA_y3(dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)))=TRUE \wedge$ $LA_y1(dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)))=TRUE \wedge$ $LB_y1(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE \wedge$ $LB_y3(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE \wedge$ $(LB_y5(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE \vee$ $LB_y6(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE)$ \Rightarrow $(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5))=B6 \vee$ $dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5))=B8)$ Интерпретация: $V1=TRUE \wedge K1=TRUE \wedge V3=TRUE \wedge V5=TRUE \wedge (V7=TRUE \vee$ $V8=TRUE) \Rightarrow (b=B6 \vee b=B8)$
lem1.1	$\neg dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)) \in \{B1, B2, B3, B4, B5, B7, B9\}$
lem2	$(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5))=B6 \vee$ $dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5))=B8)$ \Rightarrow $LA_y3(dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)))=TRUE \wedge$ $LA_y1(dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)))=TRUE \wedge$ $LB_y1(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE \wedge$ $LB_y3(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE \wedge$ $(LB_y5(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE \vee$ $LB_y6(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE)$ Интерпретация: $(b=B6 \vee b=B8) \Rightarrow V1=TRUE \wedge K1=TRUE \wedge V3=TRUE \wedge V5=TRUE \wedge (V7=TRUE \vee V8=TRUE)$
lem2.1	$LA_y3(dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)))=TRUE$ Интерпретация: $V1=TRUE$
lem2.1.1	$dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3))=A2$
lem2.2	$LA_y1(dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)))=TRUE$ Интерпретация: $K1=TRUE$
lem2.3	$LB_y1(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE$ Интерпретация: $V3=TRUE$
lem2.3.1	$dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)) \in \{B2, B4, B6, B7, B8\}$
lem2.4	$LB_y3(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE$ Интерпретация: $V5=TRUE$
lem2.4.1	$dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)) \in \{B2, B5, B6, B8, B9\}$
lem2.5	$(LB_y5(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE \vee$ $LB_y6(dtb(b \mapsto (dta(a \mapsto (x1 \mapsto x2 \mapsto x3)) \mapsto x4 \mapsto x5)))=TRUE)$ Интерпретация: $(V7=TRUE \vee V8=TRUE)$

моделирующей поведение. Инварианты доказываются как теоремы. Доказательство теорем гарантирует соответствие требованиям. Платформа Rodin ускоряет и упрощает доказательства теорем, а также исключает их ошибочность.

Формальный дедуктивный анализ хорошо сочетается с автоматным проектированием алгоритмов: для формализации алгоритма не требуется дополнительных преобразований, так как автоматы уже представляют собой математические объекты.

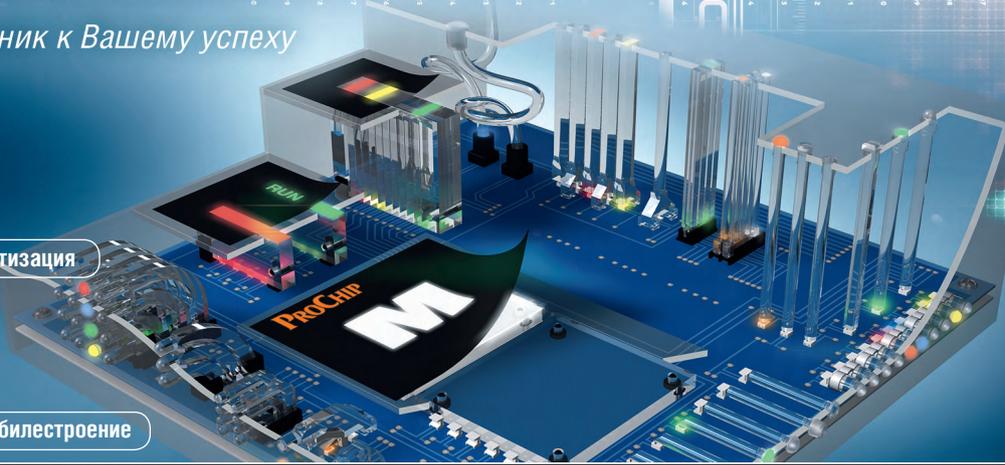
Литература

1. Нейзов М. Формальный дедуктивный анализ автоматного алгоритма управления генератором эндогаза с помощью платформы Rodin. Часть 1. Определение требований надежности и безопасности работы генератора эндогаза. Современная электроника. 2020. № 9.
2. Нейзов М. Формальный дедуктивный анализ автоматного алгоритма управления генератором эндогаза с помощью платформы Rodin. Часть 2. Алгоритм управления и платформа Rodin. Современная электроника. 2021. № 1.





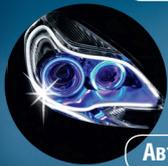
Светопроводник к Вашему успеху



Световоды для SMD- и THT-светодиодов



Автоматизация



Автомобилестроение



Медицина

Особенности:

- Световоды со степенью защиты IP68
- Диапазон температур: -40...+85°C
- Возможно изготовление заказных изделий



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

(495) 232-2522 • INFO@PROCHIP.RU • WWW.PROCHIP.RU



Практика использования встроенного АЦП в ПЛИС семейства MAX10

Часть 1. Справочная информация по АЦП ПЛИС MAX10

Павел Редькин (г. Ульяновск)

Статья содержит информацию по практическому применению аппаратного модуля АЦП, входящего в состав ПЛИС семейства MAX10 производства Intel (Altera). В первой части статьи представлена справочная информация по АЦП в ПЛИС семейства MAX10, приведены рекомендации производителя по схемотехнике и конструкторскому исполнению измерителя на основе АЦП в ПЛИС.

Модели ПЛИС с АЦП

В состав части ПЛИС семейства MAX10 от Intel (Altera) производитель включил встроенный аппаратный модуль АЦП (ADC Hard IP Block), имеющий в своём составе встроенный аналоговый температурный датчик. Указанная особенность этих ПЛИС позволяет в рамках одной микросхемы реализовать как оцифровку, так и всю необходимую цифровую обработку внешних по отношению к ПЛИС аналоговых сигналов, в том числе сигнала от встроенного температурного датчика.

Тип АЦП семейства MAX10 – АЦП последовательного приближения (ADC SAR), обеспечивающий оцифровку одной выборки входного напряжения за один период синхросигнала.

ПЛИС семейства MAX10, содержащие АЦП и температурный датчик, имеют в обозначении буквы SA или DA, например 10M08SAE144C8G. При этом буква S или D указывает на количество необходимых для данного типа ПЛИС внешних напряжений питания: одно (Single Supply) или два (Dual Supply) [3]. ПЛИС типа Single supply для работы цифровой части (цифрового ядра и линий ввода/вывода общего назначения GPIO) и модуля АЦП требуют напряжения питания с номинальным значением 3,3 В.

ПЛИС типа Dual supply для работы цифровой части требуют напряжения питания с номинальным значением 1,2 В, а для работы модуля АЦП – напряжения питания с номинальным значением 2,5 В.

Буква A в обозначении модели ПЛИС указывает на наличие в составе ПЛИС модуля АЦП с датчиком температуры и массива пользовательской Flash-памяти (Analog and Flash Features) [3]. В зависимости от модели ПЛИС внутри семейства MAX10, она может содержать один или два аппаратных модуля АЦП. В таблице 1 перечислены все модели ПЛИС, имеющие встроенные аппаратные модули АЦП, с указанием количества модулей АЦП в ПЛИС [1].

Параметры АЦП в ПЛИС

Параметры аппаратного модуля АЦП в конкретной ПЛИС зависят от её типа (Single Supply или Dual Supply). В таблице 2 приведены параметры аппаратного модуля АЦП в ПЛИС типа Single supply [2]. В таблице 3 приведены параметры аппаратного модуля АЦП в ПЛИС типа Dual supply [2].

Входы АЦП в ПЛИС

В качестве аналоговых входов аппаратных модулей АЦП в ПЛИС семей-

ства MAX10 могут быть использованы либо выделенные выводы ПЛИС, имеющие единственную функцию аналогового входа (Dedicated), либо универсальные выводы ПЛИС, имеющие двойную функцию, – аналоговый вход или цифровой вход/выход GPIO (Dual Function). В таблице 4 содержатся сведения о количестве входов АЦП каждого из указанных типов для всех моделей ПЛИС, имеющих аппаратный модуль АЦП [1]. Как можно видеть из таблицы 4, максимальное количество доступных для использования в ПЛИС входов АЦП равно 18: 2 выделенных входа и 16 универсальных входов.

Помимо внешних входов АЦП, к входу модуля АЦП внутри ПЛИС может быть подключён встроенный диодный датчик температуры (TSD), для которого задан канал с номером 17. В случае если в качестве универсальных аналоговых входов в проекте ПЛИС используются линии GPIO из банка 1A, оставшиеся свободными линии GPIO в этом банке в качестве таковых использовать уже нельзя. Каждый аналоговый вход в аппаратном модуле АЦП ПЛИС имеет встроенную ячейку защиты от статического разряда (ESD).

Блок-схема аппаратного модуля АЦП в ПЛИС семейства MAX10 показана на рисунке 1.

IP-ядра поддержки АЦП в ПЛИС

Как можно видеть из рисунка 1, для поддержки аппаратного модуля АЦП в проекте ПЛИС необходимо соответствующее IP-ядро. Производитель предоставляет разработчикам такое IP-ядро – Modular ADC Core Intel FPGA IP. Всего доступно два типа IP-ядер поддержки АЦП: с поддержкой одного аппаратного модуля АЦП (ядро Modular ADC Core IP core) и с поддержкой двух аппаратных модулей АЦП (ядро Modular Dual ADC Core IP core). Поддержка IP-ядром аппаратного модуля АЦП реализует три основные функции:

- обеспечение собственно преобразований, то есть конфигурирование АЦП, генерация сигналов выбора активного канала для преобразования

Таблица 1. Модели ПЛИС семейства MAX10, имеющие встроенные аппаратные модули АЦП

Исполнение в корпусе	Количество источников питания ПЛИС	Количество аппаратных модулей АЦП в ПЛИС					
		Модель ПЛИС					
		10M04	10M08	10M16	10M25	10M40	10M50
M153	1	1	1	-	-	-	-
U169	1	1	1	1	-	-	-
U324	1	1	1	1	-	-	-
	2	1	1	1	-	-	-
F256	2	1	1	1	2	2	2
E144	1	1	1	1	1	1	1
F484	2	-	1	1	2	2	2
F672	2	-	-	-	-	2	2

Таблица 2. Параметры аппаратного модуля АЦП в ПЛИС типа Single supply

Параметр	Обозначение	Условия	Мин. значение	Тип. значение	Макс. значение	Ед. изм.	
Разрешение АЦП	-	-	-	-	12	бит	
Напряжение питания модуля АЦП	$V_{CC,ONE}$	-	2,85	3,0/3,3	3,465	В	
Внешнее опорное напряжение АЦП	V_{REF}	-	$V_{CC,ONE} - 0,5$	-	$V_{CC,ONE}$	В	
Частота преобразования	F_s	Аккумулированная частота преобразования	-	-	1	MSPS	
Рабочий температурный диапазон	T_i	-	-40	25	125	°C	
Входное аналоговое напряжение АЦП	V_{IN}	Предделитель отключён	0	-	V_{REF}	В	
		Предделитель включён	0	-	3,6 ¹	В	
Точность АЦП по постоянному току	ошибка и дрейф смещения	E_{offset}	Предделитель отключён	-0,2	-	0,2	% от полной шкалы
			Предделитель включён	-0,5	-	0,5	% от полной шкалы
	ошибка и дрейф усиления	E_{gain}	Предделитель отключён	-0,5	-	0,5	% от полной шкалы
			Предделитель включён	-0,75	-	0,75	% от полной шкалы
	дифференциальная нелинейность	DNL	Внешнее напряжение V_{REF}	-0,9	-	0,9	МЗР ²
			Внутреннее напряжение V_{REF}	-1	-	1,7	МЗР ²
Интегральная нелинейность	INL	-	-2	-	2	МЗР ²	
Точность АЦП по переменному току	Полное гармоническое искажение	THD	$F_{in} = 50$ кГц, $F_s = 1$ МГц, PLL	-65 ³	-	-	дБ
	Отношение сигнал/шум	SNR	$F_{in} = 50$ кГц, $F_s = 1$ МГц, PLL	54 ⁴	-	-	дБ
	Отношение сигнал/шум и искажения	SINAD	$F_{in} = 50$ кГц, $F_s = 1$ МГц, PLL	53 ⁵	-	-	дБ
Температурный датчик на кристалле	Частота выборок температуры	T_s	-	-	50	квыб/с	
	Абсолютная точность	-	Диапазон от -40 до +125°C при усреднении по 64 выборкам ⁶	-	-	±10	°C
Скорость преобразования	-	Одиночное измерение	-	-	1	Цикл АЦП	
		Непрерывное измерение-	-	-	1	Цикл АЦП	
		Измерение температуры	-	-	1	Цикл АЦП	

¹ Функция предделителя позволяет разделить входное аналоговое напряжение на два.
² МЗР – младший значащий разряд выходного кода АЦП.
³ THD с включённым предделителем входа АЦП на 6 дБ меньше указанного в таблице.
⁴ SNR с включённым предделителем входа АЦП на 6 дБ меньше указанного в таблице.
⁵ SINAD с включённым предделителем входа АЦП на 6 дБ меньше указанного в таблице.
⁶ Для ПО Intel Quartus Prime версии 15.0 и более поздних ядра Modular ADC Core и Modular Dual ADC Core IP поддерживают усреднение по 64 выборкам. Для версий ПО Intel Quartus Prime до 14.1 пользователю необходимо производить усреднение по выборкам самостоятельно.

управляющих сигналов для запуска и останова АЦП;

- так называемая программа упорядочения (sequencer) аппаратного модуля АЦП, позволяющая задать перечень активных каналов для преобразования, порядок их автоматического переключения, а также осуществлять простейшую обработку результатов АЦП, например сравнение их с порогом;
- поддержка интерфейсов автоматического сохранения результатов АЦП во внутренней или внешней памяти ПЛИС.

Каждое из IP-ядер поддержки аппаратного модуля АЦП может использо-

ваться в конкретном проекте ПЛИС в нескольких различных конфигурациях. При использовании IP-ядра Modular ADC Core IP core модуль АЦП в каждый момент времени может осуществлять аналого-цифровое преобразование сигнала только с одного выделенного или универсального аналогового входа. При использовании IP-ядра Modular Dual ADC Core IP core в ПЛИС с двумя аппаратными модулями АЦП, в каждый момент времени могут одновременно осуществляться аналого-цифровые преобразования сигнала от двух различных выделенных аналоговых входов. При этом производитель указывает, что задержка рас-

пространения сигнала для выделенных аналоговых входов будет одинаковой. Универсальные аналоговые входы для осуществления одновременных преобразований в двух аппаратных модулях АЦП одной ПЛИС производитель использовать не рекомендует, поскольку для этих входов одинаковая задержка распространения не гарантируется.

IP-ядро Modular ADC Core Intel FPGA IP обоих типов поддерживает следующие возможности по конфигурированию и управлению аппаратным модулем АЦП в ПЛИС:

- задание синхросигнала для АЦП, скорости преобразования, источника и значения опорного напряжения АЦП;

Таблица 3. Параметры аппаратного модуля АЦП в ПЛИС типа Dual supply

Параметр	Обозначение	Условия	Мин. значение	Тип. значение	Макс. значение	Ед. изм.	
Разрешение АЦП	-	-	-	-	12	бит	
Напряжение питания модуля АЦП	$V_{CCA\ ADC}$	-	2,375	2,5	2,625	В	
Напряжение питания цифровой части	V_{CCINT}	-	1,15	1,2	1,25	В	
Внешнее опорное напряжение АЦП	V_{REF}	-	$V_{CCA\ ADC} - 0,5$	-	$V_{CCA\ ADC}$	В	
Частота преобразования	F_S	Аккумулярированная частота преобразования	-	-	1	Мвыб/с	
Рабочий температурный диапазон	T_J		-40	25	125	°С	
Входное аналоговое напряжение АЦП	V_{IN}	Предделитель отключён	0	-	V_{REF}	В	
		Предделитель включён	0	-	3 ¹	В	
Ток потребления аналоговой части (постоянный)	$I_{ACC\ ADC}$	Средний ток	-	275	450	мкА	
Ток потребления цифровой части (постоянный)	I_{CCINT}	Средний ток	-	65	150	мкА	
Точность АЦП по постоянному току	ошибка и дрейф смещения	E_{offset}	Предделитель отключён	-0,2	-	0,2	% от полной шкалы
			Предделитель включён	-0,5	-	0,5	% от полной шкалы
	ошибка и дрейф усиления	E_{gain}	Предделитель отключён	-0,5	-	0,5	% от полной шкалы
			Предделитель включён	-0,75	-	0,75	% от полной шкалы
	дифференциальная нелинейность	DNL	Внешнее напряжение V_{REF}	-0,9	-	0,9	МЗР ²
			Внутреннее напряжение V_{REF}	-1	-	1,7	МЗР ²
интегральная нелинейность	INL	-	-2	-	2	МЗР ²	
Точность АЦП по переменному току	полное гармоническое искажение	THD	$F_{IN} = 50$ кГц, $F_S = 1$ МГц, PLL	-70 ^{3,4,5}	-	-	дБ
	отношение сигнал/шум	SNR	$F_{IN} = 50$ кГц, $F_S = 1$ МГц, PLL	62 ^{5,6,7}	-	-	дБ
	отношение сигнал/шум и искажения	SINAD	$F_{IN} = 50$ кГц, $F_S = 1$ МГц, PLL	61,5 ^{5,8,9}	-	-	дБ
Температурный датчик на кристалле	частота выборок температуры	T_S	-	-	50	квыб/с	
	абсолютная точность	-	Диапазон от -40 до +125°С при усреднении по 64 выборкам ¹⁰	-	-	±5	°С
Скорость преобразования	-	Одиночное измерение	-	-	1	Цикл АЦП	
		Непрерывное измерение	-	-	1	Цикл АЦП	
		Измерение температуры	-	-	1	Цикл АЦП	

¹ Функция предделителя позволяет разделить входное аналоговое напряжение на два.

² МЗР – младший значащий разряд выходного кода АЦП.

³ Полное гармоническое искажение составляет -65 дБ для универсального входа АЦП.

⁴ THD с включённым предделителем входа АЦП на 6 дБ меньше указанного в таблице.

⁵ При использовании внутреннего V_{REF} THD = 66 дБ, SNR = 58 дБ и SINAD = 57,5 дБ для выделенных входов АЦП.

⁶ Отношение сигнал/шум составляет 54 дБ для универсального входа АЦП.

⁷ SNR с включённым предделителем входа АЦП на 6 дБ меньше указанного в таблице.

⁸ Отношение сигнал/шум и искажения составляет 53 дБ для универсального входа.

⁹ SINAD с включённым предделителем входа АЦП на 6 дБ меньше указанного в таблице.

¹⁰ Для ПО Intel Quartus Prime версии 15.0 и более поздних ядра Modular ADC Core и Modular Dual ADC Core IP поддерживают усреднение по 64 выборкам. Для версий ПО Intel Quartus Prime до 14.1 пользователю необходимо производить усреднение по выборкам самостоятельно.

- задание активных каналов для АЦП, то есть таких, для которых в принципе разрешено преобразование путём наложения маски;
- задание порогового значения выходного кода АЦП, при достижении которого генерируется некий сигнал уведомления;
- настройка конверсионной последовательности, задающей очерёдность и частоту выбора для преобразования сигналов со входов активных (незамаскированных) каналов.

IP-ядро Modular ADC Core Intel FPGA IP обоих типов поддерживает четыре различные конфигурации:

- стандартная программа упорядочения с сохранением выборок АЦП по шине Avalon-MM во внутренней памяти ПЛИС.
- стандартная программа упорядочения с сохранением выборок АЦП по шине Avalon-MM во внутренней памяти ПЛИС и с задаваемым порогом выходного кода АЦП, при достижении которого сверху или снизу генерируется сигнал уведомления;
- стандартная программа упорядочения с сохранением выборок АЦП во внешней памяти;
- только управление АЦП без сохранения выборок.

Конфигурация 1 применяется в системах сбора данных и рассчитана на взаимодействие АЦП в ПЛИС с внешним микропроцессором, который по сигналам генерируемых прерываний читает блоки накопленных данных (оцифрованных выборок АЦП) из внутренней памяти (RAM) ПЛИС.

Конфигурация 2 также применяется в системах сбора данных и отличается от конфигурации 1 только тем, что в ней поддерживается задание порогового значения выходного кода АЦП, при достижении которого сверху или снизу конфигурация 2 генерирует сигнал уведомления. Используя этот сигнал, внешний микропроцессор может осуществлять системный мониторинг значений выборок АЦП и соответствующим образом реагировать на выходы результатов преобразования за заданные пределы. При наличии двух аппаратных модулей АЦП они могут генерировать сигнал уведомления о достижении порогов независимо друг от друга.

Конфигурация 3 аналогична конфигурации 1 с той лишь разницей, что блоки накопленных данных (оцифрованных выборок АЦП) хранятся не во внутренней памяти ПЛИС, а во внеш-

Таблица 4. Количество входов АЦП в ПЛИС семейства MAX10

Исполнение в корпусе	Тип вывода ПЛИС	Количество входов АЦП в данной модели ПЛИС					
		Модель ПЛИС					
		10M04	10M08	10M16	10M25	10M40	10M50
M153	Выделенный	1	1	-	-	-	-
	Универсальный	8	8	-	-	-	-
U169	Выделенный	1	1	1	-	-	-
	Универсальный	8	8	8	-	-	-
U324	Выделенный	1	1	1	-	-	-
	Универсальный	16	16	16	-	-	-
F256	Выделенный	1	1	1	2	2	2
	Универсальный	16	16	16	16	16	16
E144	Выделенный	1	1	1	1	1	1
	Универсальный	8	8	8	8	8	8
F484	Выделенный	-	1	1	2	2	2
	Универсальный	-	16	16	16	16	16
F672	Выделенный	-	-	-	-	2	2
	Универсальный	-	-	-	-	16	16

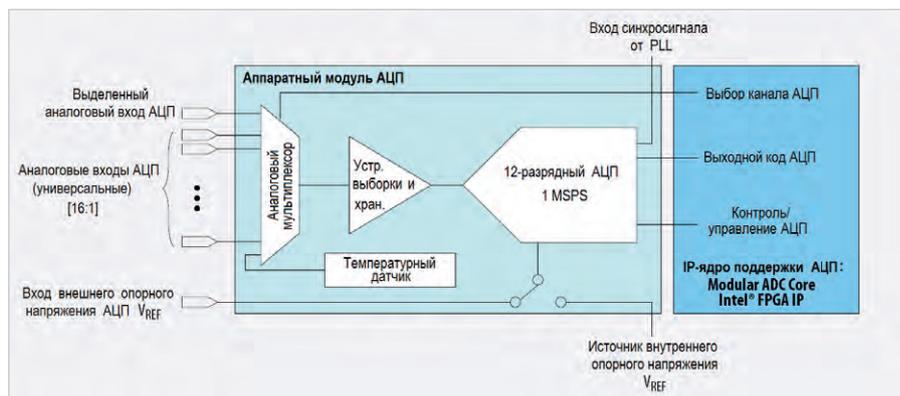


Рис. 1. Блок-схема аппаратного модуля АЦП в ПЛИС семейства MAX10

ней памяти. При этом для взаимодействия с внешней памятью разработчик должен спроектировать собственную логику, например используя для этого цифровую часть ПЛИС.

В конфигурации 4 IP-ядро Modular ADC Core Intel FPGA IP реализует только функции управления аппаратным модулем АЦП без функций упорядочения и сохранения оцифрованных выборок АЦП. В этой конфигурации разработчику предоставляется полная свобода проектирования своей собственной программы упорядочения и способа управления обработкой результатов АЦП.

Для получения подробностей по использованию конфигураций 1–4 рекомендуется обратиться к документу [1]. В рамках этой статьи будет рассмотрено использование АЦП в ПЛИС только в конфигурации 4.

Параметры IP-ядра поддержки АЦП в ПЛИС

IP-ядра Modular ADC Core IP core и Modular Dual ADC Core IP core имеют ряд параметров, которые пользователь

может задать в специальном редакторе параметров АЦП, поддерживаемом инструментальной средой разработки проектов ПЛИС Quartus II. Всего имеется три группы параметров: группа параметров общего назначения, группа параметров каналов АЦП, группа параметров упорядочения преобразования.

Параметры общего назначения IP-ядра Modular ADC Core IP core перечислены в таблице 5. Параметры каналов АЦП IP-ядра Modular ADC Core IP core перечислены в таблице 6. Параметры упорядочения IP-ядра Modular ADC Core IP core перечислены в таблице 7. Параметры IP-ядра Modular Dual ADC Core IP core имеют аналогичную структуру с поправкой на количество аппаратных модулей АЦП.

Подробнее о настройке АЦП и задании параметров IP-ядер в среде Quartus II будет рассказано во второй части статьи.

Синхронизация АЦП в ПЛИС

В качестве синхросигнала для аппаратного модуля АЦП в ПЛИС семейства MAX10 производителем рекомендуется использовать выходной

Таблица 5. Группа параметров общего назначения IP-ядра Modular ADC Core

Название параметра	Варианты задания в редакторе	Описание
Core Variant	<ul style="list-style-type: none"> Standard sequencer with Avalon-MM sample storage Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection Standard sequencer with external sample Storage <ul style="list-style-type: none"> ADC control core only 	Вариант IP-ядра. Выбор варианта IP-ядра в зависимости от требуемых задач, для которых применяется АЦП
Debug Path	<ul style="list-style-type: none"> Disabled Enabled 	Отладочные пути. Включить или выключить отладочные пути в модуле АЦП. Используется при необходимости получения дополнительной отладочной информации
Generate IP for which ADCs of this device?	<ul style="list-style-type: none"> 1st ADC 2nd ADC 	Генерировать IP-ядро для этого устройства? Для устройств, имеющих два аппаратных модуля АЦП, задаётся, какой из этих модулей блокируется (не используется)
ADC Sample Rate	25, 50, 100, 200, 250, 500 кГц, 1 МГц	Частота выборок АЦП. Задаваемая частота выборок АЦП не может превышать 1 МГц
ADC Input Clock	2, 10, 20, 40, 80 МГц	Частота входного синхросигнала АЦП. Задаваемая частота входного синхросигнала АЦП, из которого путём внутреннего аппаратного деления формируется частота выборок АЦП
Reference Voltage Source	<ul style="list-style-type: none"> External Internal 	Источник опорного напряжения. В случае выбора внешнего источника в качестве источника опорного напряжения используется внешнее напряжение на ножке ADC_VREF. В случае выбора внутреннего источника в качестве источника опорного напряжения используется внутренний источник напряжения 2,5 В на кристалле (3,0/3,3 В в устройствах со встроенным стабилизатором напряжения)
External Reference Voltage	<ul style="list-style-type: none"> Dual supply devices: up to 2.5 V Single supply devices: up to 3.63 V 	Напряжение внешнего источника опорного напряжения. Может быть выбрано из двух вариантов
Enable user created expected output file	<ul style="list-style-type: none"> Enabled Disabled 	Разрешить использование выходного файла. Данный параметр определяет источник выходных данных для логического моделирования АЦП

Таблица 6. Группа параметров каналов АЦП IP-ядра Modular ADC Core

Название параметра	Варианты задания в редакторе	Описание
Use Channel 0 (Dedicated analog input pin - ANAIN) (CH0 tab)	<ul style="list-style-type: none"> On Off 	Разрешить выделенный вход АЦП
User created expected output file	-	Пользователь создал выходной файл. Данный параметр определяет созданный пользователями входной файл стимулов, чтобы моделировать выходные данные для канала. Этот выбор доступен для каждого разрешённого канала, кроме TSD, но только в том случае, если был задан параметр Enable user created expected output file из группы параметров общего назначения
Use Channel N (Each channel in its own tab)	<ul style="list-style-type: none"> On Off 	Использовать канал N (каждый канал имеет собственный номер). Разрешает использование универсального аналогового входа, где N: <ul style="list-style-type: none"> 1...16 каналов для устройств с одним модулем АЦП; 1...8 каналов для устройств с двумя модулями АЦП
Use on-chip TSD (TSD tab)	<ul style="list-style-type: none"> On Off 	Использовать встроенный температурный датчик TSD на кристалле (вкладка TSD). Определяет, что IP-ядро осуществляет выборки напряжения от встроенного температурного датчика. Если этот параметр задан, то частота выборок с датчика TSD составляет до 50 кГц, при том что частота выборок с аналоговых входов составляет до 1 МГц
Enable Maximum threshold for Channel N (Each channel in its own tab)	<ul style="list-style-type: none"> On Off 	Разрешить порог максимума для канала N (каждый канал имеет собственный номер). Активирует максимальную пороговую опцию для канала. Этот выбор доступен, только если в качестве варианта IP-ядра выбран вариант Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection
Enable Maximum threshold for on-chip TSD (TSD tab)	<ul style="list-style-type: none"> On Off 	Разрешить порог максимума для TSD на кристалле (вкладка TSD). Активирует максимальную пороговую опцию для TSD. Этот выбор доступен, только если в качестве варианта IP-ядра выбран вариант Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection
Enter Maximum Threshold for Channel N (Each channel in its own tab, including channel 0)	Зависит от величины опорного напряжения	Задать порог максимума для канала N в вольтах. Этот выбор доступен, только если в качестве варианта IP-ядра выбран вариант Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection
Enter Maximum Threshold for on-chip TSD (TSD tab)	-	Задать порог максимума для TSD на кристалле в градусах Цельсия. Этот выбор доступен, только если в качестве варианта IP-ядра выбран вариант Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection
Enable Minimum threshold for Channel N (Each channel in its own tab, including channel 0)	<ul style="list-style-type: none"> On Off 	Разрешить порог минимума для канала N (каждый канал имеет собственный номер). Активирует минимальную пороговую опцию для канала. Этот выбор доступен, только если в качестве варианта IP-ядра выбран вариант Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection
Enable Minimum threshold for on-chip TSD (TSD tab)	<ul style="list-style-type: none"> On Off 	Разрешить порог минимума для TSD на кристалле (вкладка TSD). Активирует минимальную пороговую опцию для TSD. Этот выбор доступен, только если в качестве варианта IP-ядра выбран вариант Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection
Enter Minimum Threshold for Channel N (Each channel in its own tab, including channel 0)	Зависит от величины опорного напряжения	Задать порог минимума для канала N в вольтах. Этот выбор доступен, только если в качестве варианта IP-ядра выбран вариант Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection
Enter Minimum Threshold for on-chip TSD (TSD tab)	-	Задать порог минимума для TSD на кристалле в градусах Цельсия. Этот выбор доступен, только если в качестве варианта IP-ядра выбран вариант Standard sequencer with Avalon-MM sample storage and threshold violation detection
Enable Prescaler for Channel N	<ul style="list-style-type: none"> On Off 	Разрешить функцию входного делителя для канала N, где N: <ul style="list-style-type: none"> Каналы 8 и 16 (при наличии) для устройств с одним модулем АЦП. Канал 8 АЦП1 или АЦП2 для устройств с двумя модулями АЦП

сигнал встроенной в ПЛИС системы PLL (ФАПЧ). В зависимости от модели, ПЛИС семейства MAX10 содержат одну или две системы PLL: или только PLL1, или PLL1 и PLL3. В последнем случае для синхронизации АЦП можно использовать любую из имеющихся PLL. В случае использования ПЛИС с двумя аппаратными модулями АЦП и двумя PLL возможны следующие схемы синхронизации АЦП:

- оба модуля АЦП используют для синхронизации одну и ту же PLL;
- каждый модуль АЦП использует для синхронизации отдельную PLL.

В случае если каждый модуль использует свою PLL, программный инструмент монтажа проекта ПЛИС Intel Quartus Prime Fitter в ходе синтеза проекта ПЛИС автоматически выбирает один из двух вариантов. Если заданные разработчиком частоты выходных синхросигналов используемых PLL различны, Intel Quartus Prime Fitter оставляет выбранную разработчиком конфигурацию синхронизации АЦП неизменной (две PLL). Если же частоты выходных синхросигналов используемых PLL заданы одинаковыми, Intel Quartus Prime Fitter оставляет в качестве источника синхронизации обоих модулей АЦП одну PLL, а вторую высвобождает.

Опорное напряжение АЦП в ПЛИС

В качестве опорного напряжения каждый аппаратный модуль АЦП в ПЛИС может независимо использовать как внутренний, так и внешний источник опорного напряжения. В моделях ПЛИС с двумя модулями АЦП один из этих модулей может использовать внутренний источник опорного напряжения, а другой – внешний.

Однако в каждой ПЛИС имеется только один вход для подачи внешнего опорного напряжения V_{REF} , поэтому при выборе в качестве опорных напряжений внешних источников для обоих модулей АЦП в ПЛИС на них поступит одно и то же напряжение с вывода V_{REF} .

Встроенный температурный датчик в ПЛИС

В составе всех аппаратных модулей АЦП имеется внутренний диодный датчик температуры (TSD), сигнал с которого поступает внутри АЦП на вход отдельного канала. При выборе в качестве активного входа канала с датчиком температуры частота преобразования АЦП автоматически становится равной

Таблица 7. Группа параметров упорядочения преобразований IP-ядра Modular ADC Core

Название параметра	Варианты задания в редакторе	Описание
Number of slot used	От 1 до 64	Указывает количество используемых слотов при упорядочении преобразований. В разделе Conversion Sequence Channel отображаются слоты, доступные в соответствии с количеством выбранных здесь слотов
Slot N	Номер включённого канала (CH N)	Указывает, какой по номеру разрешённый канал АЦП должен использоваться для упорядочения преобразований. Выбранная опция содержит список включённых каналов АЦП из группы параметров Channel

50 квыб/с. При переключении на другой вход частота преобразования АЦП автоматически возвращается к значению 1 Мвыб/с или менее, если задано.

При оцифровке сигнала с датчика температуры аппаратный модуль АЦП автоматически производит усреднение напряжения с датчика по 64 выборкам. При этом используется метод бегущего среднего. Это означает, что первый результат усреднения вычисляется по истечении 64 выборок и усредняются выборки с 1-й по 64-ю, второй – по усреднению выборок со 2-й по 65-ю, третий – по усреднению выборок с 3-й по 66-ю и т.д. Таким образом, любой результат усреднения, кроме первого, выдаётся с выхода АЦП при каждой выборке.

Для вычисления текущей температуры кристалла ПЛИС, в которой установлен температурный датчик TSD, используется таблица соответствия температуры выходному коду АЦП при оцифровке напряжения с датчика, приведённая в [1]. Согласно этой таблице, диапазон измеряемых температур датчика составляет от -40 до $+125^{\circ}\text{C}$ включительно. При этом температуре -40°C соответствует выходной код АЦП, равный 3798, температуре $+125^{\circ}\text{C}$ – выходной код, равный 3431. Таким образом, области выходного кода размером $(3798 - 3431) = 367$ младших значащих разрядов (МЗР) соответствует интервал температур 165°C , то есть средняя чувствительность датчика с учётом оцифровки его выходного сигнала составляет $2,22$ МЗР/ $^{\circ}\text{C}$. Заметим, что чувствительность датчика во всем диапазоне измеряемых температур неравномерная и на отдельных участках может ухудшаться вплоть до 1 МЗР/ $^{\circ}\text{C}$.

Режимы АЦП в ПЛИС

Аппаратный модуль АЦП в ПЛИС может функционировать в двух режимах.

Нормальный режим. Модуль АЦП осуществляет преобразование аналогового сигнала от одного выбранного аналогового входа с частотой преобразования до 1 Мвыб/с. В ПЛИС с одним аппаратным

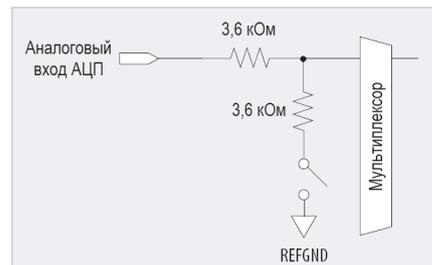


Рис. 2. Схема встроенного делителя на аналоговом входе АЦП ПЛИС

модулем АЦП всего доступно до 17 аналоговых входов: до 16 универсальных и один выделенный. В ПЛИС с двумя модулями АЦП в совокупности доступно до 18 аналоговых входов: по восемь универсальных и по одному выделенному в каждом аппаратном модуле АЦП.

Режим измерения температуры. Модуль АЦП осуществляет преобразование аналогового сигнала от внутреннего датчика температуры с частотой преобразования 50 квыб/с. В ПЛИС с двумя модулями АЦП данный режим поддерживается только первым модулем.

АЦП в ПЛИС типа Single Supply может оцифровывать входное напряжение в диапазоне от 0 до 3,0 В или до 3,3 В в зависимости от значения напряжения питания ПЛИС. АЦП в ПЛИС типа Dual Supply может оцифровывать входное напряжение в диапазоне от 0 до 2,5 В. В случае использования функции делителя на аналоговом входе АЦП в ПЛИС типа Single Supply может оцифровывать входное напряжение до 3,6 В, а АЦП в ПЛИС типа Dual supply – до 3,0 В. Делитель физически представляет собой резистивный делитель напряжения на входе аналогового мультиплекса АЦП, принципиальная схема которого показана на рисунке 2. Включение или отключение встроенного делителя на аналоговом входе АЦП может быть осуществлено при задании конфигурации модуля АЦП в инструментальной среде разработки проекта ПЛИС Quartus II, о чём будет подробнее рассказано ниже.

Делителем снабжены не все аналоговые входы АЦП, а только один или

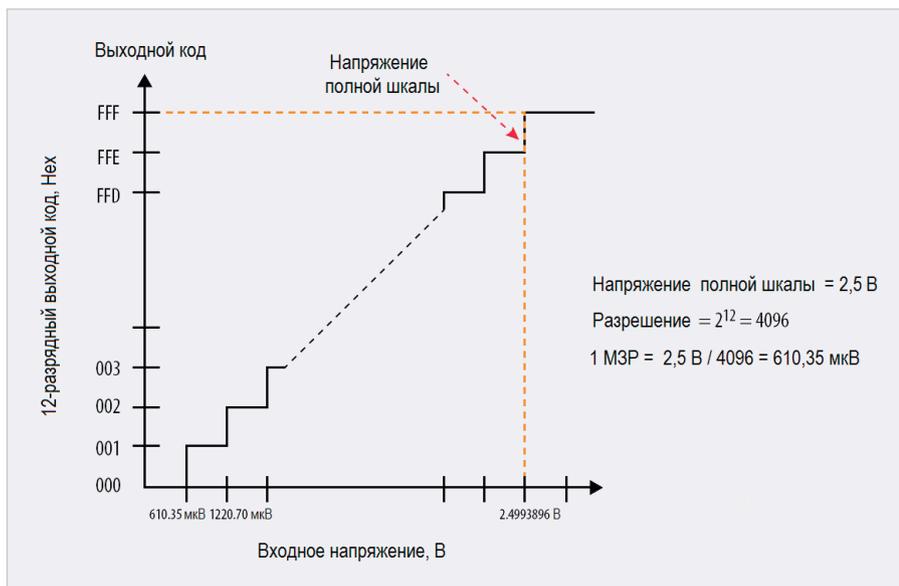


Рис. 3. Соответствие значений выходного кода АЦП и входного аналогового напряжения в ПЛИС семейства MAX10

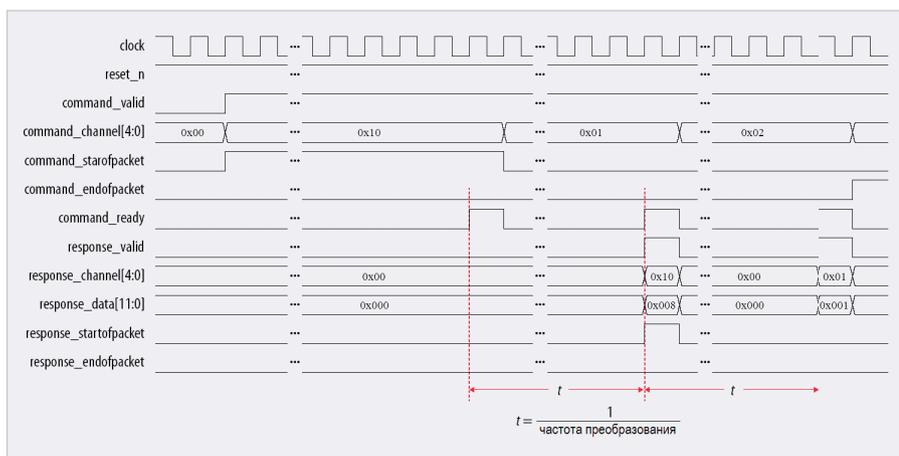


Рис. 4. Временные диаграммы работы модуля АЦП в ПЛИС

Таблица 8. Интерфейсные сигналы глобальной синхронизации и сброса IP-ядер Modular ADC Core и Modular Dual ADC Core

Интерфейсный сигнал	Разрядность	Описание
clock	1	Единственный источник синхросигнала для IP-ядер Modular ADC Core и Modular Dual ADC. Минимально допустимая частота этого синхросигнала должна быть не менее 25 МГц. При применении в качестве источника синхросигнала систем PLL ПЛИС необходимо использовать выход CO PLL1 или выход CO PLL3
reset_n	1	Единственный источник сброса IP-ядер Modular ADC Core и Modular Dual ADC. Необходимо устанавливать этот сигнал в активный уровень асинхронно, а снимать активный уровень синхронно

два в зависимости от модели ПЛИС. В ПЛИС с одним аппаратным модулем АЦП это вход канала 8 или вход канала 16 (при наличии последнего). В ПЛИС с двумя аппаратными модулями АЦП это вход канала 8 первого или второго модуля АЦП, если для применения АЦП используется IP-ядро Modular ADC Core IP core. Если для применения АЦП используется IP-ядро Modular Dual ADC Core IP core, то предделителями осна-

щаются вход канала 8 первого модуля АЦП и вход канала 17 второго модуля АЦП.

Выходной код АЦП во всех ПЛИС может принимать значения в диапазоне от 000h до FFFh. При формировании выходного кода в АЦП используется униполярное прямое двоичное кодирование согласно формуле:

$$\text{Цифровой код} = (V_{IN} / V_{REF}) \times 2^{12} \quad (1)$$

где V_{IN} – входное аналоговое напряжение, V_{REF} – опорное напряжение АЦП.

Соответствие значений выходного кода АЦП и входного аналогового напряжения показано на рисунке 3. Как можно видеть из рисунка, максимальное разрешение (610,35 мкВ) АЦП обеспечивает при минимально возможном напряжении полной шкалы 2,5 В.

Значение входного напряжения может быть вычислено из выходного цифрового кода АЦП по формуле:

$$\begin{aligned} \text{Входное напряжение} &= & (2) \\ &= \text{цифровой код} \times (V_{REF} / 2^{12}) \end{aligned}$$

Временные диаграммы работы АЦП

На рисунке 4 показаны временные диаграммы работы модуля АЦП в ПЛИС. Названия сигналов, отображаемых на диаграммах, соответствуют их наименованиям, используемым производителем в IP-ядре Modular ADC Core IP core. Диаграммы иллюстрируют соответствия между сигналами глобальной синхронизации и сброса модуля АЦП (clock, reset_n), управляющими интерфейсными сигналами модуля АЦП (command_valid, command_startofpacket, command_endofpacket, command_channel[4:0]) и ответными интерфейсными сигналами модуля АЦП (response_valid, response_data[11:0]). Для случая, показанного на рисунке, осуществляется преобразование сначала в канале 16 (0x10), затем в канале 1, затем в канале 2. Номер канала для преобразования задаётся управляющим сигналом command_channel[4:0], запуск преобразования задаётся сигналом command_valid (активный уровень высокий). Готовность результата преобразования индицируется сигналом command_ready (активный перепад положительный), однако действительные данные в результате преобразования (выходном коде АЦП) имеют место только при наличии сигнала response_valid (активный уровень высокий).

Как можно видеть из диаграмм, для канала 16 результат преобразования равен 8, а для канала 1 он равен 1. Интервал преобразования t (величина, обратная частоте преобразования) равен периоду между передними фронтами импульсов сигнала готовности результата command_ready.

Описание сигналов глобальной синхронизации и сброса IP-ядер Modular ADC Core и Modular Dual ADC Core приведено в таблице 8.

Описание интерфейсных управляющих сигналов IP-ядер Modular ADC Core и Modular Dual ADC Core приведено в таблице 9. Управляющие сигналы имеют префикс command.

Описание интерфейсных сигналов ответа IP-ядер Modular ADC Core и Modular Dual ADC Core приведено в таблице 10. Сигналы ответа имеют префикс response.

Построение внешних цепей АЦП в ПЛИС

В документе [3] производитель даёт ряд рекомендаций по практическому проектированию внешних аналоговых цепей ПЛИС с модулем АЦП. В качестве общего провода при подаче на входы АЦП в ПЛИС опорного напряжения необходимо использовать вывод ПЛИС аналогового общего провода REFGND. Цепь REFGND в целевом устройстве должна быть выполнена проводником максимальной возможной ширины и иметь сопротивление, не превышающее 1,0 Ом. Соединение цепи аналогового общего провода REFGND с цепью цифрового общего провода GND рекомендуется делать только в одной точке схемы и через ферритовую бусину.

Рекомендуется в целевом устройстве прокладывать проводники, подводящие к входам АЦП ПЛИС внешние аналоговые сигналы, таким образом, чтобы минимизировать их совместный параллельный пробег с цифровыми линиями GPIO, линиями питания и общего провода ПЛИС. Если последнее невозможно, то проводники питания и общего провода рекомендуется делать максимально широкими и с сопротивлением, не превышающим 1,5 Ом.

Цепи питания ПЛИС, используемые для модуля АЦП, рекомендуется выполнять по схеме, показанной на рисунке 5. При этом фильтрующие конденсаторы ёмкостью 0,1 мкФ должны располагаться как можно ближе к корпусу ПЛИС.

В качестве общего провода при подаче на входы АЦП в ПЛИС аналоговых сигналов также необходимо использовать вывод ПЛИС аналогового общего провода REFGND. При подаче на входы АЦП в ПЛИС внешних аналоговых сигналов необходимо учитывать электрические характеристики этих входов, прежде всего – их входной импеданс. Сумма паразитных ёмкостей корпуса ПЛИС, вывода ПЛИС, печатной платы, трассы аналогового сигнала внутри ПЛИС (ана-

Таблица 9. Интерфейсные сигналы управления IP-ядер Modular ADC Core и Modular Dual ADC Core

Интерфейсный сигнал	Разрядность	Описание
command_valid	1	Сигнал от источника, индицирующий, что его текущая передача является валидной, то есть передаваемые им данные действительны
command_ready	1	Сигнал от приёмника, индицирующий, что он готов к приёму
command_channel	5	Сигнал задания номера аналогового канала, с входа которого модуль АЦП должен брать входной аналоговый сигнал для преобразования в ходе выполнения текущей команды: 31 – запрос перекалибровки; 30:18 – не используются; 17 – встроенный температурный датчик; 16:0 – каналы аналоговых входов от 16 до 0, где канал 0 – выделенный аналоговый вход, каналы от 1 до 16 – универсальные аналоговые входы.
command_startofpacket	1	Сигнал от источника, индицирующий, что текущая передача является началом пакета. Этот сигнал является значимым только в IP-ядрах, использующих программу упорядочения (sequencer). IP-ядро устанавливает этот сигнал во время выдачи первого слота последовательности данных в массиве. В IP-ядрах без упорядочения этот сигнал можно игнорировать
command_endofpacket	1	Сигнал от источника, индицирующий, что текущая передача является концом пакета. Этот сигнал является значимым только в IP-ядрах, использующих программу упорядочения (sequencer). IP-ядро устанавливает этот сигнал во время выдачи последнего слота последовательности данных в массиве. В IP-ядрах без упорядочения этот сигнал можно игнорировать

Таблица 10. Интерфейсные сигналы ответа IP-ядер Modular ADC Core и Modular Dual ADC Core

Интерфейсный сигнал	Разрядность	Описание
response_valid	1	Сигнал от источника, индицирующий, что его текущая передача является валидной, то есть передаваемые им данные действительны
response_channel	5	Сигнал номера аналогового канала, с входа которого модуль АЦП брал входной аналоговый сигнал для преобразования в ходе текущего ответа: 31 – запрос перекалибровки; 30:18 – не используются; 17 – встроенный температурный датчик; 16:0 – каналы аналоговых входов от 16 до 0, где канал 0 – выделенный аналоговый вход, каналы от 1 до 16 – универсальные аналоговые входы
response_data	12 или 24	Слово выходных данных результата преобразования АЦП: • размерность 12 разрядов для ПЛИС с одним модулем АЦП; • размерность 24 разряда для ПЛИС с двумя модулями АЦП
response_startofpacket	1	Сигнал от источника, индицирующий, что текущая передача является началом пакета. В IP-ядрах без упорядочения этот сигнал является копией сигнала command_startofpacket
response_endofpacket	1	Сигнал от источника, индицирующий, что текущая передача является концом пакета. В IP-ядрах без упорядочения этот сигнал является копией сигнала command_endofpacket

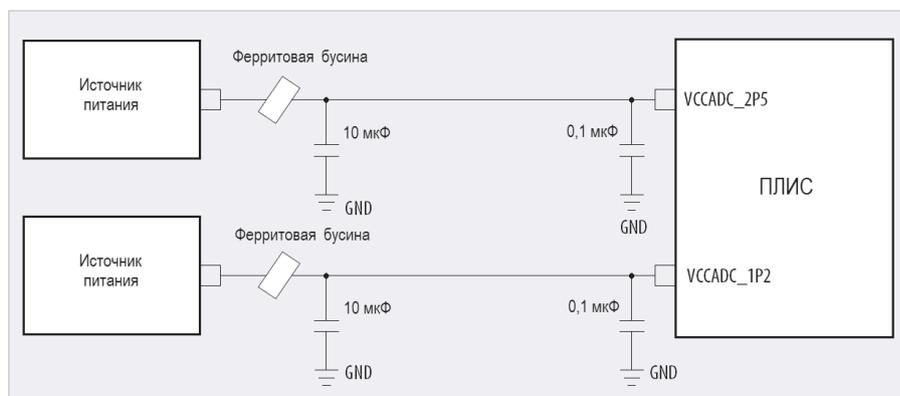


Рис. 5. Рекомендуемое исполнение цепей питания модуля АЦП в ПЛИС

логовому мультиплексору) и входное сопротивление АЦП образуют RC-цепочку фильтра низких частот (ФНЧ) с постоянной времени, равной 42,4 нс. С учётом этого значения очевидно, что входной аналоговый

сигнал АЦП полностью установится на входе преобразователя за время одной выборки, которое для максимальной частоты преобразования составляет 1 мкс. Чтобы избежать ошибок преобразования, связанных

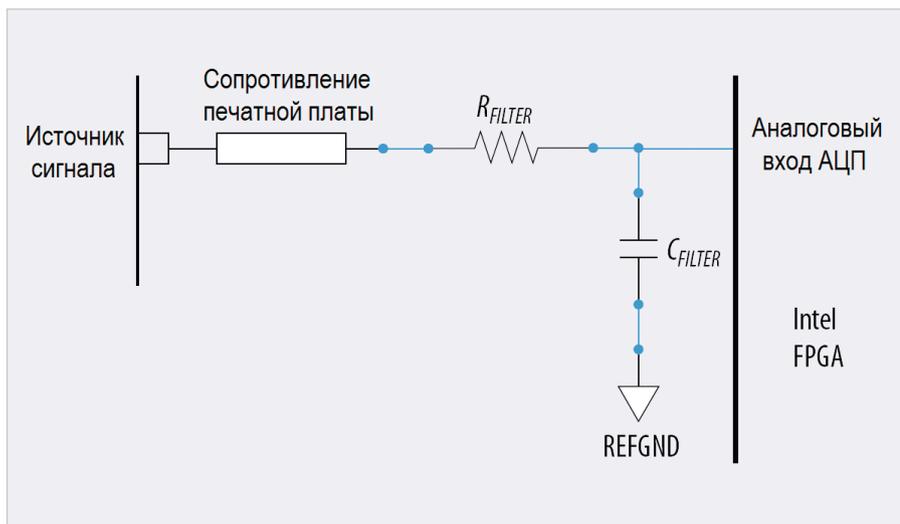


Рис. 6. Рекомендуемая схема включения внешнего пассивного ФНЧ на аналоговых входах АЦП в ПЛИС

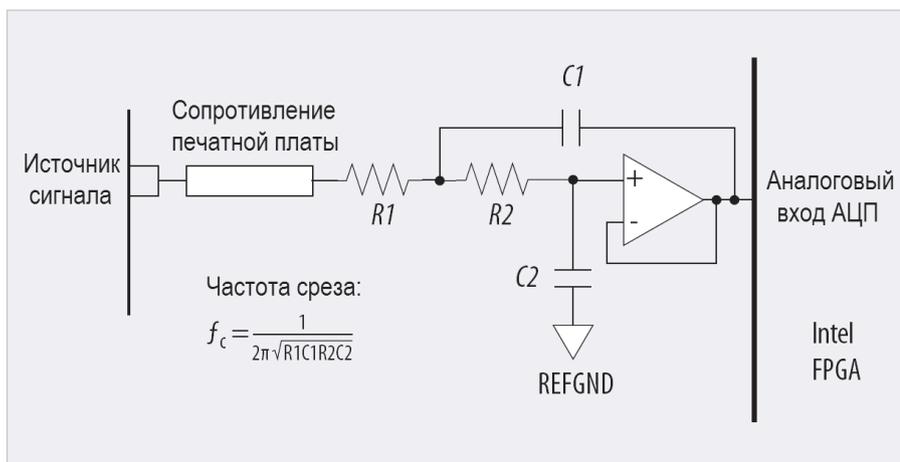


Рис. 7. Рекомендуемая схема включения внешнего активного ФНЧ на аналоговых входах АЦП в ПЛИС

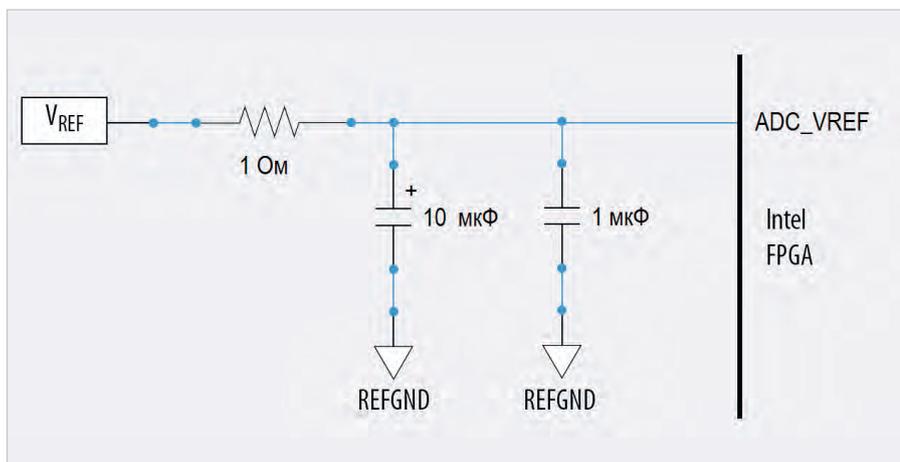


Рис. 8. Рекомендуемое исполнение цепи подачи внешнего опорного напряжения АЦП в ПЛИС

с рассогласованием сопротивлений источника аналогового сигнала и входа АЦП, производитель рекомендует минимизировать выходное сопротивление источника аналогового сигнала, которое без использования функции предделителя АЦП должно составлять не более 1 кОм, а с использованием функции предде-

лителя – не более 11 Ом. Несоблюдение указанных рекомендаций может привести к ухудшению таких параметров АЦП, как THD, SINAD, DNL, INL (см. табл. 2, 3). Из сказанного следует, что напрямую подавать на аналоговые входы ПЛИС сигналы от источников с высоким выходным сопротивлением, например фотодиоды, фоторези-

сторы, не следует. Роль буферного элемента здесь могут выполнять внешние операционные усилители (ОУ).

Производитель рекомендует устанавливать на аналоговых входах АЦП в ПЛИС внешние пассивные и активные (на базе ОУ) ФНЧ для подавления высокочастотных шумов во входных сигналах. При этом частоту среза ФНЧ рекомендуется выбирать не менее чем в 2 раза больше максимальной частоты входного сигнала. На рисунке 6 показана рекомендуемая схема внешнего пассивного ФНЧ на аналоговых входах АЦП в ПЛИС, а на рисунке 7 – активного ФНЧ на основе ОУ. Рекомендуемые значения сопротивления R_{FILTER} и ёмкости C_{FILTER} пассивного ФНЧ с учётом наличия всех перечисленных выше паразитных сопротивлений и ёмкостей для источника аналогового сигнала с выходным сопротивлением 5 Ом составляют соответственно 60 Ом и 550 пФ, а для источника сигнала с выходным сопротивлением 10 Ом составляют соответственно 50 Ом и 580 пФ. При этом конденсатор C_{FILTER} рекомендуется размещать как можно ближе к выводу аналогового входа ПЛИС.

Цепь подачи внешнего опорного напряжения АЦП ПЛИС рекомендуется выполнять по схеме, показанной на рисунке 8. В цепи подачи внешнего опорного напряжения АЦП ПЛИС должно быть два фильтрующих конденсатора: полярный ёмкостью 10 мкФ, и неполярный (керамический) ёмкостью 1 мкФ. При этом неполярный фильтрующий конденсатор должен располагаться как можно ближе к корпусу ПЛИС.

Во второй части статьи будет рассмотрена работа с отладочной платой Altera MAX 10 FPGA в инструментальной среде Quartus II.

Литература

1. Intel® MAX® 10 Analog to Digital Converter User Guide. Updated for Intel® Quartus® Prime Design Suite: 19.1/ UG-M10ADC | 2020.03.17. https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max-10/ug_m10_adc.pdf.
2. Intel® MAX® 10 FPGA Device Datasheet. M10-DATASHEET | 2018.06.29. https://ru.mouser.com/datasheet/2/612/m10_datasheet-1115242.pdf.
3. Intel® MAX® 10 FPGA Device Overview. M10-OVERVIEW | 2017.12.15. https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max-10/m10_overview.pdf.



РОССИЙСКАЯ НЕДЕЛЯ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ



 Минцифры
России

 Комитет Государственной Думы
Федерального Собрания
Российской Федерации
по образованию и науке

 ТОРГОВО-ПРОМЫШЛЕННАЯ ПАЛАТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



СВЯЗЬ

«Информационные и коммуникационные
технологии»

15–18 июня 2021

33-я международная
выставка

Организатор

 **ЭКСПОЦЕНТР**

При поддержке:

- Министерства цифрового развития, связи
и массовых коммуникаций РФ
- Комитета Государственной Думы ФС РФ по образованию и науке

Под патронатом ТПП РФ

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

www.sviaz-expo.ru

12+ Реклама



Обратный ток в синхронных выпрямителях

Виктор Жданкин (г. Москва)

Для обеспечения приемлемых энергетических характеристик в современных модулях питания с низкими выходными напряжениями и большими токами нагрузки применяется синхронное выпрямление. Замена диода Шоттки на MOSFET повышает эффективность, так как прямое падение напряжения на MOSFET более низкое благодаря его меньшему сопротивлению в открытом состоянии (и, следовательно, ниже потери) по сравнению с диодом. Работа двух MOSFET в данной схеме должна быть синхронизирована таким образом, чтобы они открывались и закрывались попеременно. Разработчики должны знать о некоторых проблемах, возникающих при проектировании синхронных выпрямителей. Об одной из этих проблем – токе через внутренний диод MOSFET во время необходимых задержек на переключение транзистора – рассказано в данной статье, которая является авторским переводом работы [1].

Синхронное выпрямление применяется в DC/DC-преобразователях с низкими выходными напряжениями и большими токами для достижения высокого КПД и повышения удельной мощности. Когда для выпрямления диод заменяется полевым транзистором MOSFET, необходимо помнить об одном важном различии между диодом и MOSFET: диод является однонаправленным устройством, тогда как MOSFET представляет собой двунаправленное устройство. Диод проводит ток в одном направлении, от анода к катоду, тогда как MOSFET допускает двунаправленный ток от стока к истоку и от истока к стоку. Так или иначе, независимо каким образом работает преобразователь, диод блокирует обратный ток, тогда как MOSFET этого не делает.

Синхронное выпрямление может воздействовать на постоянный ток в выходном дросселе, и ток становится отрицательным в режиме холостого

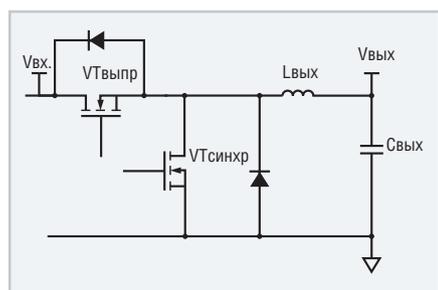


Рис. 1. а. Неизолированный понижающий DC/DC-преобразователь, сконфигурированный для синхронного выпрямления

хода или при низкой нагрузке. Обратный ток кроме снижения эффективности при низкой нагрузке может быть причиной повреждения источника питания. Следовательно, чтобы предотвратить серьёзный отказ при применении синхронного выпрямления, явление обратного тока должно быть контролируемым. Это справедливо для неизолированных понижающих преобразователей, а также для изолированных DC/DC-преобразователей в тех случаях, когда синхронное выпрямление используется на вторичной стороне преобразователя. На рис. 1 показаны упрощённые схемы изолированного и неизолированного DC/DC-преобразователей, сконфигу-

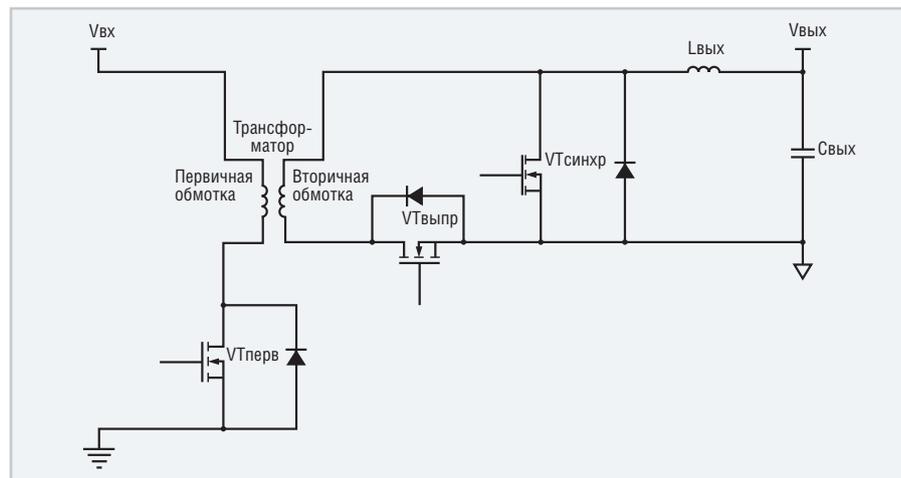


Рис. 1б. Изолированный DC/DC-преобразователь, сконфигурированный для синхронного выпрямления.

Примечание: показанные диоды являются встроенными (интегральными) в структуру транзистора

рированных для синхронного выпрямления.

Существует много способов управления затворами MOSFET в синхронных выпрямителях. Одним из широко распространённых методов является применение комплементарных импульсов для управления выпрямительным транзистором (VTвыпр) и синхронным транзистором (VTсинхр) с задержкой между импульсами для предотвращения одновременной проводимости верхнего и нижнего транзисторов. На рис. 2а и 2б показаны распределения временных интервалов напряжения управления затвором в неизолированном понижающем преобразователе, оптимизированные для обеспечения эффективности предотвращением пересекающейся проводимости транзисторов.

Обратный ток в синхронных выпрямителях может возникать в различных ситуациях. Например, он может возникнуть во время выключения источника питания в режиме холостого хода или неполной нагрузки, при включении предварительного смещения, отключения источника питания во время срабатывания защиты от перенапряжения (OVP) или перегрузки по току (OCP), или во время динамического изменения нагрузки от полной до холостого хода или близкой к холостому ходу и во время резкого снятия нагрузки. Проблема обратного тока объясняется различием харак-

теристик диодов и MOSFET. В любом случае при использовании преобразователя с синхронным выпрямлением обратный ток должен тщательно контролироваться, иначе обратный ток может быть причиной аварийного включения/выключения и может повредить MOSFET.

Для предотвращения перенапряжения и отказа из-за обратного тока, ШИМ-контроллеры, используемые в синхронном выпрямлении, должны иметь управляемые функции запуска и выключения для нормального состояния, а также для условия предварительного смещения.

На рисунках 3...5 показаны различные временные диаграммы для неизолированного понижающего синхронного DC/DC-преобразователя, работающего в режиме холостого хода. На рис. 3 представлены временные диаграммы при нормальной работе, тогда как формы сигналов на рис. 4 сняты во время включения преобразователя, и сигналы, представленные на рис. 5, сняты во время выключения преобразователя.

Эти формы сигналов получены для понижающего преобразователя, работающего на частоте 500 кГц при входном напряжении 12 В и выходном напряжении 1,1 В. Преобразователь создан на основе микросхемы контроллера для схемы синхронного выпрямления IR3710 (International Rectifier в 2015 году была приобретена компанией Infineon). Компания Infineon предлагает линейку контроллеров, ориентированных на управление транзисторами на вторичной стороне полумостовых резонансных и прямо-, и обратноточковых преобразователей, работающих в различных режимах тока дросселя выходного каскада. Более подробно контроллеры для схем синхронного выпрямления представлены в работе [2]. На рис. 6 представлены временные диаграммы выключения для изолированного понижающего преобразователя.

На рис. 3 отрицательный ток дросселя протекает в условиях холостого хода и неполной нагрузки. Во время выключения в условиях холостого хода или при близких к холостому ходу нагрузках, когда ток дросселя отрицательный, а оба MOSFET выключены, этот отрицательный ток может найти путь только через интегрированный в MOSFET-структуру транзистора $V_{T\text{выпр}}$ диод на вход источника постоянного напряжения. В изолиро-

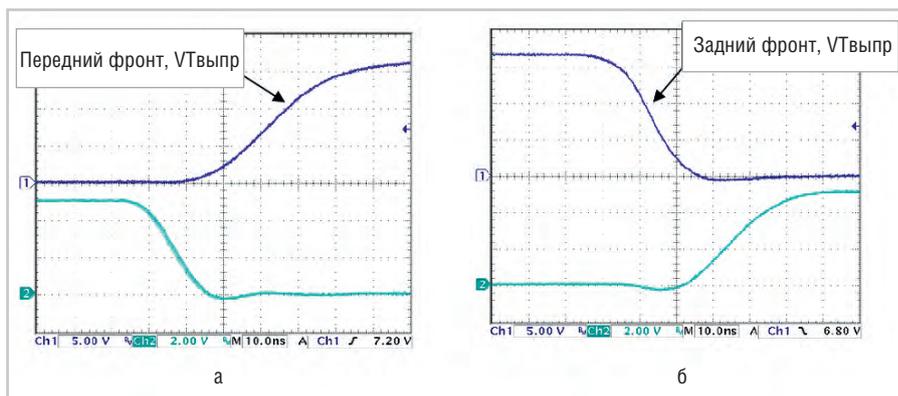


Рис. 2. Сигналы управления затворами для верхнего MOSFET ($V_{T\text{выпр}}$) (форма сигнала на канале Ch1) (а) и нижнего MOSFET ($V_{T\text{синхр}}$) (форма сигнала на канале Ch2) (б) в неизолированном понижающем преобразователе, представленном на рис. 1а

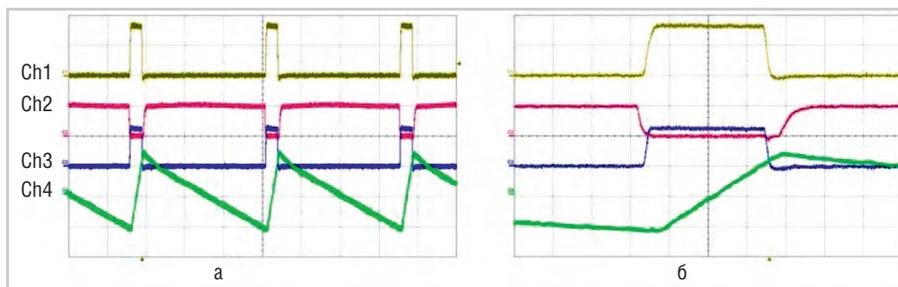


Рис. 3. Формы сигналов в нормальном режиме работы неизолированного понижающего преобразователя на холостом ходу показаны на осциллограмме (а) и фрагмент осциллограммы в увеличенном временном масштабе (б)

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$ и $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$.

Представлены следующие формы сигналов: напряжение затвора верхнего MOSFET (Ch1), напряжения затвора нижнего MOSFET (Ch2), фазное напряжение (Ch3), и ток дросселя (2А/деление) (Ch4)

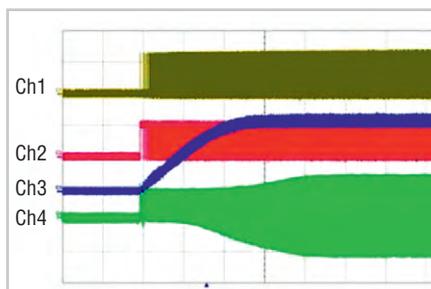


Рис. 4. Формы сигналов неизолированного понижающего преобразователя при включении в режиме холостого хода

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$ и $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$

Представлены следующие формы сигналов: напряжение на затворе верхнего транзистора MOSFET (Ch1), напряжение на затворе нижнего MOSFET (Ch2), выходное напряжение $V_{\text{вых}}$. (Ch3) и ток дросселя (2А/деление) (Ch4)

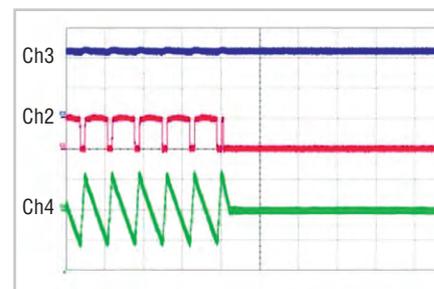


Рис. 5. Формы сигналов неизолированного понижающего преобразователя при выключении в режиме холостого хода

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$ и $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$

Представлены формы сигналов: напряжение затвора верхнего транзистора MOSFET (Ch1), напряжение затвора нижнего MOSFET (Ch2), выходное напряжение $V_{\text{вых}}$. (Ch3) и ток дросселя (2А/деление) (Ch4)

ванном преобразователе это создаёт перенапряжение на MOSFET, так как этот ток не может найти прямой путь для протекания. Результатом является более высокое воздействие напряжения на устройства. Этот обратный ток в итоге заряжает выходную ёмкость MOSFET и таким образом может быть отражён в первичную цепь и может вызвать дополнительное напряжение

на MOSFET первичной цепи, в итоге приведя к его отказу.

Во время включения, если синхронный MOSFET $V_{T\text{синхр}}$ открыт, какое-то предварительное напряжение смещения присутствующее на выходе, будет разряжаться через него. Это вызывает увеличение обратного тока в выходном дросселе и может быть причиной падения выходного напряжения.

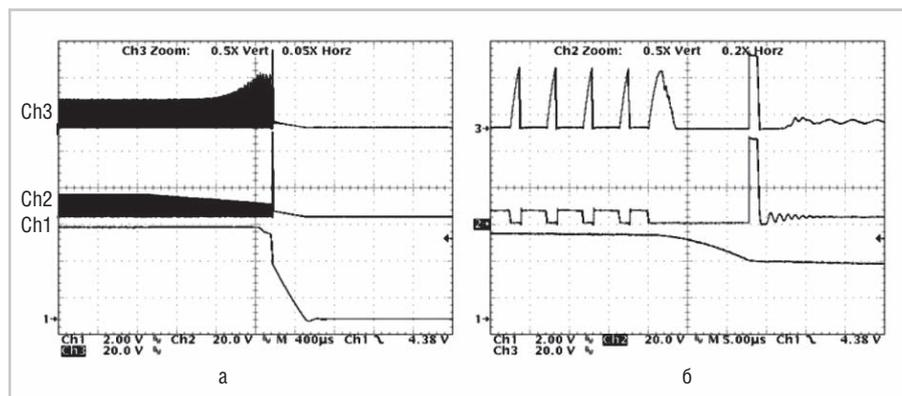


Рис. 6. Формы сигналов изолированного понижающего преобразователя при выключении (а) и с расширенным визуальным отображением (б)

Показаны следующие формы сигналов: выходное напряжение $V_{\text{вых}}$ (Ch1), напряжение на стоке транзистора $V_{\text{Tсинхр}}$ (Ch2) и напряжение на стоке MOSFET $V_{\text{Tвыпр}}$ (Ch3)

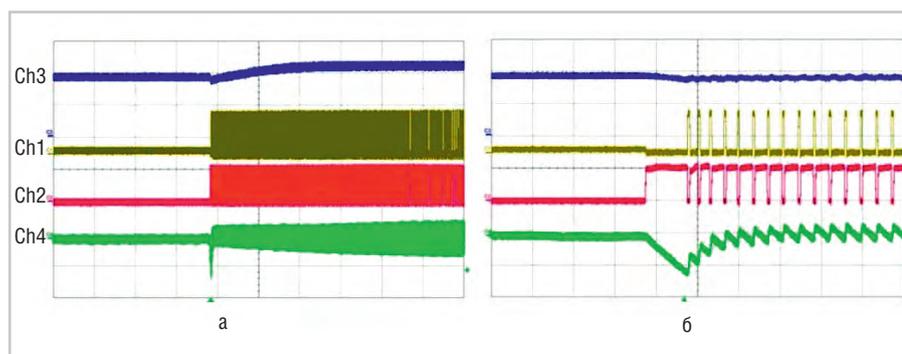


Рис. 8. Формы сигналов включения предварительного смещения для неизолированного понижающего преобразователя с проблемой (а) и то же в увеличенном масштабе (б)

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$ и $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$.

Формы сигналов приведены для напряжения на затворе верхнего MOSFET (Ch1), напряжения на затворе нижнего MOSFET (Ch2), выходного напряжения $V_{\text{вых}}$ (Ch3) и тока дросселя (2A/деление) (Ch4)

На рис. 7 показано включение предварительного смещения без какой-либо проблемы. На рис. 8 показано нарастание обратного тока и падение выходного напряжения, когда не обеспечено фиксирование предварительного напряжения смещения. Нижний транзистор MOSFET остаётся во включённом состоянии в течение определённого времени, ток дросселя увеличивается и становится отрицательным. Большой обратный ток с выхода служит причиной падения выходного напряжения, что недопустимо.

Для предотвращения этой ситуации (для того чтобы достигнуть включения с предварительным смещением) синхронный MOSFET должен быть удержан в выключенном состоянии во время включения устройства. Существуют различные методы для успешного включения с предварительным смещением в синхронных выпрямителях. Может быть использован компаратор для удержания синхронного MOSFET в выключенном состоянии во время включения до момента, пока выход-

ное напряжение достигнет приблизительно 60...70% своего конечного значения. Недостатком является то, что пока синхронный MOSFET не включён, его внутренний диод проводит ток, и это может привести к значительным потерям. Затем синхронный MOSFET деблокируется, и он может начать переключение. При условии холостого хода и при нагрузках, близких к холостому ходу, до тех пор пока синхронный MOSFET не включится, микросхема ШИМ-контроллера IR3710 будет работать в режиме пропуска импульсов.

В некоторых структурах схем с предварительным смещением обеспечивается мягкий запуск при управлении затвором синхронного MOSFET, для того чтобы время включения синхронного MOSFET увеличивалось постепенно. Микросхема запускается в асинхронном режиме и удерживает синхронный MOSFET в выключенном состоянии до тех пор, пока не будет сформирован первый импульс для затвора верхнего MOSFET. Синхронный MOSFET всегда начинает работать с

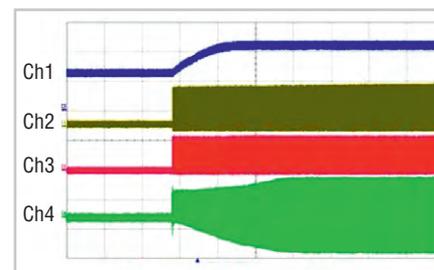


Рис. 7. Формы сигналов включения предварительного смещения для неизолированного понижающего преобразователя.

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$ и $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$

Приведены формы сигналов для напряжения на затворе верхнего MOSFET (Ch1), напряжения на затворе нижнего MOSFET (Ch2), выходного напряжения $V_{\text{вых}}$ (Ch3) и тока дросселя (2 A/деление) (Ch4)

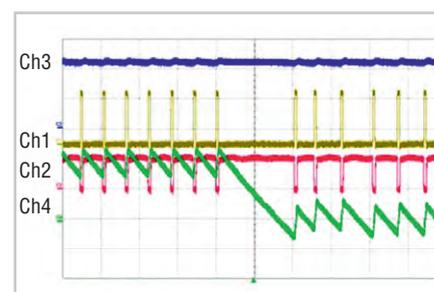


Рис. 9. Быстрое изменение 100% нагрузки в неизолированном DC/DC-преобразователе

$V_{\text{вх}} = 12 \text{ В}$ и $V_{\text{вых}} = 1,1 \text{ В}$.

Представлены формы сигналов для напряжения на затворе верхнего MOSFET (Ch1), напряжения на затворе нижнего MOSFET (Ch2), выходного напряжения $V_{\text{вых}}$ (Ch3) и тока дросселя (5A/деление) (Ch4)

импульсом небольшой длительности и постепенно увеличивает длительность импульса с шагом 25, 50, 75 и 100% до тех пор, пока он не достигнет установленного значения. Это будет гарантировать, что обратный ток в выходном дросселе не увеличится.

Измерение тока дросселя и выключение синхронного MOSFET в момент пересечения током нуля является другим методом осуществления контролируемого включения. Другой способ – отслеживать длительность импульса $V_{\text{Tвыпр}}$ и затем включать MOSFET $V_{\text{Tсинхр}}$ только когда длительность импульса $V_{\text{Tвыпр}}$ достигнет некоторой заранее определённой длительности. Это может также предотвратить работу синхронного MOSFET с повышенной нагрузкой во время включения.

Должно быть уделено внимание обеспечению такого режима, при котором выходное напряжение повышается равномерно и не создаёт никаких выбросов на выходе, когда открывается транзистор

VT-синхр. Равномерный запуск обеспечивает безопасное начало работы в предварительно смещённом выходе, тогда как обычные понижающие регуляторы без этого состояния могут разряжать выходной конденсатор, создавая падение напряжения на выходе, что может повредить чувствительную нагрузку.

На рис. 9 показаны формы сигналов для неизолированного понижающего преобразователя, где нагрузка полностью снимается от 100% до состояния холостого хода. В результате ток дросселя может измениться до очень большого отрицательного значения.

В неизолированном понижающем преобразователе это состояние является допустимым, поскольку обратный ток может направиться обратно на вход источника постоянного напряжения через внутренний диод верхнего MOSFET. Но в изолированных DC/DC-преобразователях это является проблемой. Если синхронный MOSFET закрывается, когда протекающий через него ток является отрицательным, из-за прерывания обратного тока может возникнуть сильное напряжение. Этой проблемы можно избежать, если синхронный MOSFET выключить, когда ток дросселя будет положительным, или когда он достигнет нуля (например, прямо перед переходом в отрицательное значение).

Во время выключения синхронный MOSFET должен быть выключен первым в синхронизации с сигналом на затворе выпрямительного MOSFET. В таком случае выпрямительный транзистор MOSFET выключится через несколько циклов переключения, для того чтобы ток дросселя мог вернуться к положительному значению, до того как выпрямительный MOSFET окончательно выключится. Этот способ сложен. Более простым решением является измерение тока дросселя и выключение синхронного MOSFET в моменты равенства тока дросселя нулю, что не позволит ему изменить направление.

Заключение

Синхронные выпрямители широко распространены в настоящее время благодаря существенному уменьшению сопротивления сток-исток MOSFET и времени их переключения. Ведущие производители полупроводниковых компонентов предлагают транзисторы MOSFET с малым сопротивлением открытого канала, обратным диодом с улучшенными характеристиками, уменьшенным зарядом затвора, что делает возможным оптимальный выбор транзисторов для применения в качестве синхронного и выпрямительного. Для упрощения разработки схем синхронных выпрямителей предлагаются семейства управляющих микросхем

синхронными схемами для организации синхронного выпрямителя на вторичной стороне преобразователей. Помимо этого, компания Infineon предлагает доступный на сайте компании инструмент [2], позволяющий быстро и точно рассчитать элементы схемы. Применение контроллеров и оптимизированных силовых транзисторов позволяет повысить КПД конечного устройства, а также избежать многих проблем при создании синхронных выпрямителей: изменения напряжения (Cdv/dt), которое является причиной нежелательного включения синхронного транзистора [3], добиться уменьшения обратного тока через внутренний диод MOSFET-структуры, исключив тем самым потерю мощности при смене направления потока энергии.

Литература

1. Kariyadan Suresh. Reverse-Current Phenomenon in Synchronous Rectifiers. International Rectifier. 2009.
2. Соломатин М. Применение компонентов International Rectifier для синхронного выпрямления. Электронные компоненты. 2010. № 6.
3. Жикленков Д.В., Исаков М.С. Наведённое Cdv/dt включение полевого транзистора в синхронном понижающем регуляторе. Практическая силовая электроника. 2005. № 19.



НОВОСТИ МИРА

LG INNOTEK ПРЕВРАЩАЕТ СМАРТФОН В КЛЮЧ ОТ МАШИНЫ

Компания LG Innotek разработала модуль цифрового автомобильного ключа, который устанавливается в автомобиле и обеспечивает беспроводную передачу данных между автомобилем и смартфоном, позволяя пользователям открывать или запирают дверь автомобиля или запускать двигатель с помощью смартфона. Водитель может использовать свой смартфон, чтобы с первого взгляда контролировать состояние транспортного средства, включая расстояние пробега, топливную экономичность, давление в шинах и т.д., а также управлять транспортным средством. Пользователи могут предоставить цифровой ключ другому человеку или разрешить ему только определённые функции, такие как открытие или закрытие багажника, с помощью приложения для смартфона. Пользователям не нужно носить с собой физический ключ, что снижает риск его потери. Кроме того, для управления автомобилем смартфон должен находиться внутри автомобиля, что снижает риск угона автомобиля.



Поскольку в последнее время услуги каршеринга и аренды выросли, спрос на модуль цифрового автомобильного ключа растёт с каждым годом. Но существующие модули цифровых ключей для автомобилей имеют низкую точность определения местоположения и, соответственно, – низкую безопасность. В модуле цифрового автомобильного ключа, разработанном LG Innotek, используется сверхширокополосная (UWB) технология, которая представляет собой технологию беспроводной связи LAN, и собственный алгоритм, повышающий точность определения местоположения. Кроме того, в модуле повышена безопасность за счёт применения запатентованной технологии пре-

дотвращения взлома. Модуль может определять местонахождение смартфона в пять раз точнее, чем существующие ключевые модули. Чем точнее модуль цифрового автомобильного ключа определяет местонахождение смартфона, тем более разнообразные и удобные функции могут быть реализованы. Например, можно определить местоположение смартфона и заранее открыть дверь водительского сиденья или автоматически запустить двигатель. Когда несколько человек используют одну и ту же машину, модуль может распознавать конкретный смартфон и автоматически настраивать сиденье водителя или боковые зеркала заднего вида для соответствующего водителя. Когда несколько человек с одним и тем же цифровым автомобильным ключом садятся в автомобиль, модуль точно обнаруживает человека на сиденье водителя. Цифровой модуль автомобильного ключа компактный и тонкий, он размером с USB-флешку, при этом содержит около 60 компонентов, включая ВЧ-тракт и элементы блока питания.

www.lginnotek.com

Ослабление потоков электронов радиационных поясов Земли защитными экранами на основе композита W-Cu

А.С. Якушевич, Ю.В. Богатырев, С.С. Грабчиков,
С.Б. Ластовский, Н.А. Василенков, А.Е. Козюков, Г.А. Протопопов

Для снижения дозовых нагрузок на электронную компонентную базу космических аппаратов от потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли применяются экраны локальной радиационной защиты. Такие экраны изготавливают на основе материалов с большим атомным номером и высокой плотностью (вольфрама, тантала, композита W-Cu и др.), а затем интегрируют в металлокерамические корпуса электронных компонентов с недостаточным уровнем радиационной стойкости. Методом Монте-Карло рассмотрены способы снижения уровня поглощённой кристаллами активных элементов дозы с помощью экранов радиационной защиты на основе композита W-Cu в гибридных металлических корпусах при воздействии электронов круговой орбиты с углом наклона 30° и высотой 8000 км.

Введение

Экраны локальной радиационной защиты (ЭЛРЗ) применяются для снижения дозовых нагрузок на электронную компонентную базу космических аппаратов (КА) от потоков электронов и протонов радиационных поясов Земли (РПЗ). Суть метода применения ЭЛРЗ

заключается в интегрировании защитных экранов в металлокерамические корпуса электронных компонентов с недостаточным уровнем радиационной стойкости [1–6]. Данный метод достаточно просто реализуется в блоках радиоэлектронных средств третьего поколения, где используется монтаж

корпусированных электронных компонентов на платы [6]. Экраны локальной радиационной защиты изготавливают на основе материалов с большим атомным номером и высокой плотностью (вольфрама, тантала, композита W-Cu и др.), что позволяет при незначительных изменениях конструкции и габаритных размеров существенно повысить защитные функции корпуса интегральных микросхем.

В блоках радиоэлектронных средств авиакосмической техники четвертого поколения используется бескорпусной монтаж кристаллов активных элементов на коммутационные платы [7]. Несколько микросборок в виде таких плат помещают в металлический корпус-экран, герметизируемый либо по торцам, либо по верхней крышке. Связь с другими блоками осуществляется через разъёмы в боковых стенках. Помимо бескорпусных микросборок в корпус блока могут монтироваться пассивные электронные компоненты, которые, например, нельзя изготовить в плёночном исполнении. Если это каркасные катушки индуктивности, то высота боковых стенок такого корпуса составляет 10 мм и более [7]. Подобного типа гибридные корпуса необходимы для различного рода мощных источников вторичного электропитания, преобразователей напряжения и др.

Цель настоящей работы – показать расчётными методами возможные способы снижения уровня поглощённой кристаллами активных элементов дозы с помощью экранов радиационной защиты на основе композита W-Cu в гибридных металлических корпусах радиоэлектронной аппаратуры при воздействии электронов радиационных поясов Земли.

Методика расчёта

Определение поглощённых доз D проводилось для шести кремниевых кристаллов (активных элементов), обозначенных в данной работе как транзисторы VT1–VT6. Кристаллы транзисторов смонтированы по бескорпусной технологии в центральной области (VT5), по краям (VT1, VT3 и VT6) и в углах (VT2 и VT4) ком-

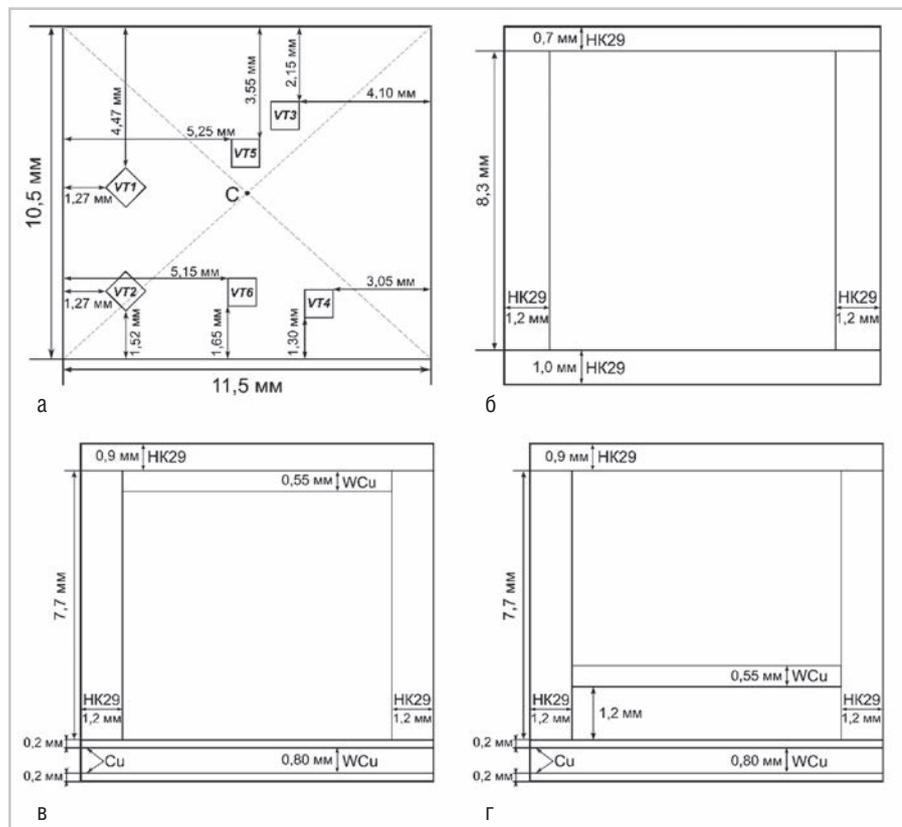
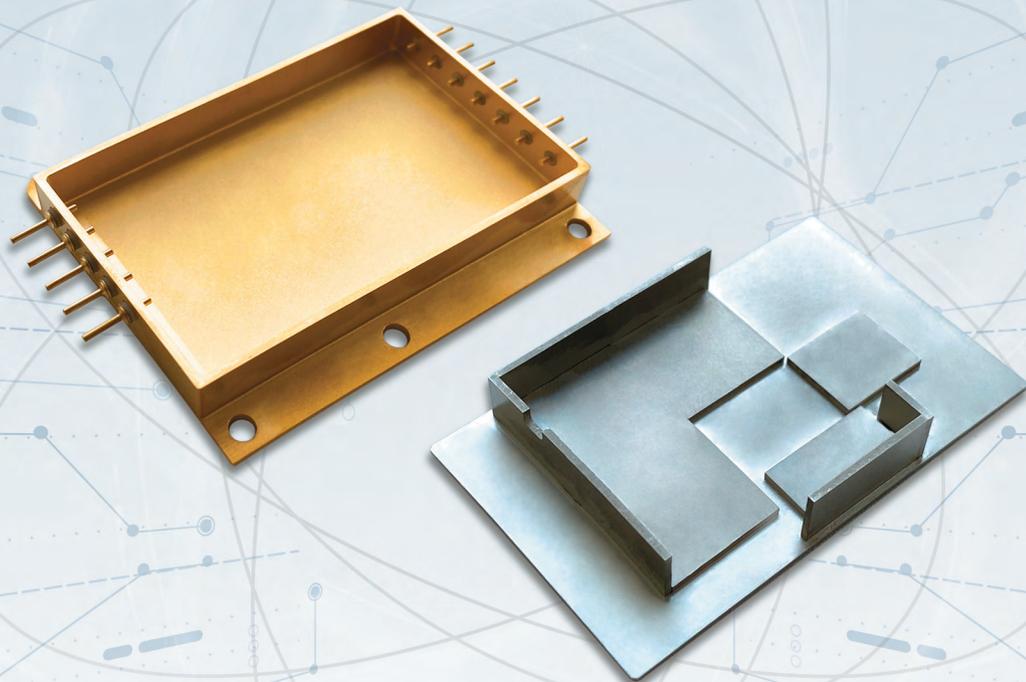


Рис. 1. Расположение кристаллов кремния на коммутационной плате (а) и вертикальные сечения корпусов типа I (б), II (в) и III (г)



КОРПУСА RAD-PAK

для вторичных источников питания и электронных модулей

особенностью данных корпусов
является локальная защита
наиболее уязвимых элементов конструкции



125480, г. Москва
ул. Планерная, д. 7А
тел./факс: (495) 657-87-37
testpribor@test-expert.ru
www.test-expert.ru

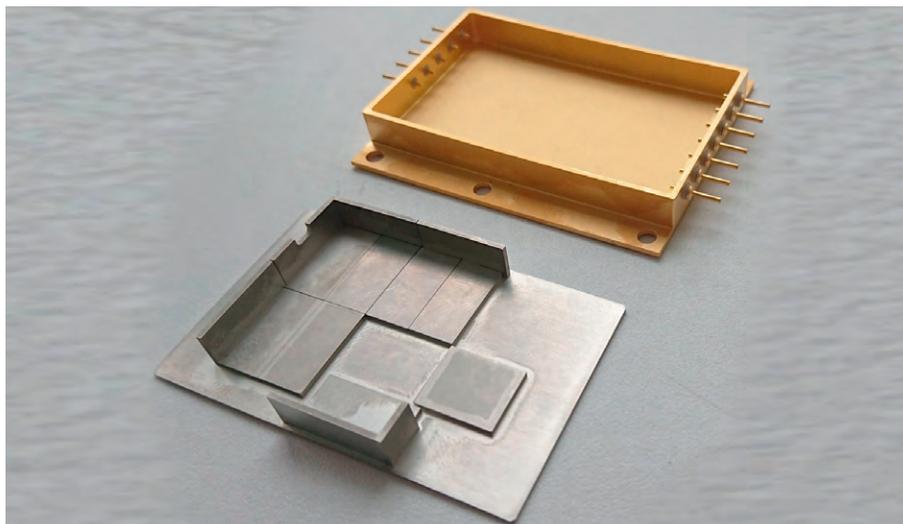


Рис. 2. Фотография корпуса и крышки с установленными радиационными экранами

мутационной платы (см. рис. 1а). Размер каждого кристалла составляет $0,90 \times 0,90 \times 0,24$ мм³. Размер платы и положение каждого кристалла на ней указаны на рисунке. Отметим, что тип активных элементов и размеры их кристаллов выбраны произвольно и для определения значения D не играют существенной роли. Из расчётной модели исключены пассивные компоненты (резисторы, конденсаторы, кардасные катушки индуктивности и т. д.), способные создать некоторую теневую защиту активным элементам от ионизирующих излучений. Это позволяет рассматривать защитные свойства только стенок корпуса и встроенных радиационных экранов.

Плата с транзисторами помещена в металлический корпус пенального типа, герметизируемый по верхней крышке (см. рис. 2). Внутренние размеры нижнего и верхнего оснований корпуса соответствуют размерам платы. Исследовались три типа корпусов: без экранов радиационной защиты – тип I (см. рис. 1б), с экранами – тип II (см. рис. 1в) и с экранами оптимизированной конструкции – тип III (см. рис. 1г). Внешние размеры всех корпусов практически совпадают и показаны на рисунках 1б–г. Имеется лишь незначительное различие по высоте: у корпуса типа I она составляет 10,0 мм, а у типов II и III – 9,8 мм. Боковые стенки всех корпусов изготовлены из сплава НК29 (ковара) толщиной 1,2 мм.

Верхнее и нижнее основания корпуса типа I также выполнены из ковара, их толщина которых показана на рисунке 1б. У корпусов типов II и III усиление защиты проведено только для крыш-

ки и основания, что проще реализовать технически в процессе изготовления серийных гибридных корпусов. Основание обоих корпусов с радиационными экранами (см. рис. 1в, г) имеет толщину 1,2 мм и состоит из слоя композита W-Cu толщиной 0,8 мм между двумя слоями меди толщиной 0,2 мм для улучшения теплоотводящих свойств.

Плотность композита W-Cu равна 16,5 г/см³, а суммарная массовая толщина основания с защитным экраном и слоями меди – 1,67 г/см². Верхние крышки корпусов, изготовленные из ковара толщиной 0,9 мм, усилены дополнительным слоем композита W-Cu толщиной 0,55 мм до суммарной массовой толщины, равной 1,67 г/см². Основным отличием между корпусами типов II и III является различное положение верхнего защитного слоя W-Cu относительно основания. В первом случае он располагается непосредственно под крышкой корпуса (см. рис. 1в), а во втором – на высоте 1,2 мм от основания корпуса, т. е. приближён к активным элементам на расстояние ~1 мм (см. рис. 1г). Указанное значение высоты в данной модели выбрано произвольно. Положение экрана относительно основания в реальных корпусах может быть другим, так как оно будет зависеть от толщины и типа печатной платы, а также размеров элементов навесного монтажа. Положение экрана будет отличаться, например для одно- и двухсторонних, а также многослойных печатных плат. В настоящее время существует большое число конструктивно-технологических разновидностей печатных плат, и невозможно рассмотреть их все в рамках данной

работы. Учитывая то, что коммутационная плата в весьма незначительной степени ослабляет поток ионизирующего излучения по сравнению с основанием и другими стенками корпуса, она, так же как и пассивные компоненты, исключена из расчётной модели, т. е. кристаллы транзисторов расположены на основаниях корпусов всех трёх типов согласно рисунку 1а.

Суммарная поглощённая доза D рассчитывалась по формуле [8]:

$$D = \int \frac{D_0(E)}{\Phi} \varphi(E) dE, \quad (1)$$

где $\varphi(E)$ – дифференциальный спектр электронов; $D_0(E)$ – поглощённая доза в зависимости от энергии E электронов; Φ – флюенс электронов. Величина поглощённой дозы от электронного излучения на единичный флюенс $\frac{D_0(E)}{\Phi}$ в формуле (1) фактически определяет уровень поглощённой дозы от одного электрона.

С помощью программного комплекса Geant4 v.10.5 методом Монте-Карло [9] для каждого значения энергии E из спектра электронов рассчитывалась поглощённая доза D_0 в каждом кристалле кремния для всех типов корпусов. Корпуса размещались в изотропном поле электронного излучения с флюенсом $\Phi = 4,1 \cdot 10^6$ см⁻². При этом учитывался вклад от вторичных электронов и тормозного излучения. Далее в соответствие с формулой (1) методом численного интегрирования были получены значения суммарных поглощённых доз D в кристаллах кремния за 1 сутки. В настоящей работе расчёты проводились для круговой орбиты с углом наклона $i=30^\circ$ высотой $H=8000$ км. Дифференциальные спектры электронов $\varphi(E)$ при максимуме и минимуме солнечной активности (СА) были получены с помощью программы OMERE 5.3 [10].

Результаты и обсуждение

Полученные в результате моделирования зависимости $D_0(E)$ для кристаллов кремниевых транзисторов в корпусах трёх типов представлены на рисунке 3. Для каждого типа корпуса показаны семейства из шести зависимостей, которые на графике наиболее заметно различаются для корпуса типа III. Для корпусов типов I и II кривые $D_0(E)$ всех шести активных элементов платы лежат достаточно близко.

Согласно представленным результатам можно заключить, что все зависи-

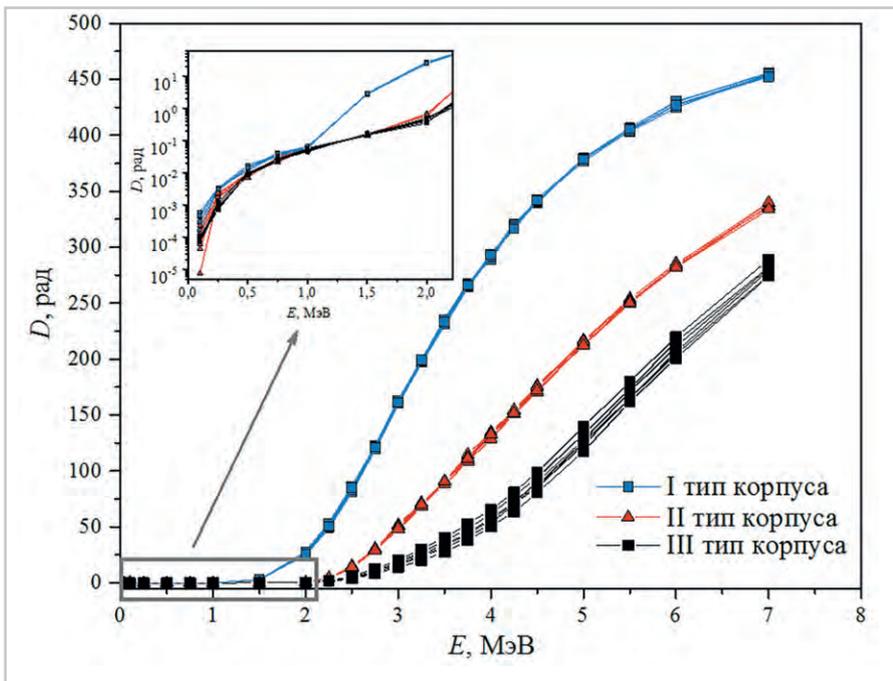


Рис. 3. Зависимости $D_0(E)$ для кристаллов кремниевых транзисторов в корпусах трёх типов при облучении электронами флюенсом $\Phi=4,1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$

мости $D_0(E)$ имеют одинаковый вид, а именно: с ростом энергии электронов значение поглощённой дозы растёт нелинейно. При этом до определённой энергии электронов значение D_0 совсем незначительно. Для корпуса типа I значение этой «пороговой» энергии составляет порядка 1,2 МэВ, а для типов II и III – 2,0 МэВ. Не вызывает особых сомнений и то, что электроны с энергией ниже «пороговой» полностью тормозятся стенками корпусов, а накопленная кристаллами доза определяется исключительно низкоэнергетичным вторичным излучением, сгенерированным при взаимодействии первичных электронов с атомами материала стенок. Такой результат согласуется с данными экстраполированного пробега электронов в веществе. Так, у корпуса типа I крышка из кобальта имеет наименьшую по сравнению с остальными стенками массовую толщину, равную $0,59 \text{ г/см}^2$, и ей соответствует длина экстраполированного пробега электронов с $E = 1 \text{ МэВ}$ в железе [11]. Боковые стенки двух других корпусов имеют массовую толщину $1,0 \text{ г/см}^2$. В то же время длина экстраполированного пробега электронов с $E = 1,5 \text{ МэВ}$ в железе составляет $0,96 \text{ г/см}^2$. При этом для электронов с $E = 2,0 \text{ МэВ}$ длина экстраполированного пробега в железе равна $1,31 \text{ г/см}^2$, а в вольфраме – $1,55 \text{ г/см}^2$ [11]. Следовательно, электроны с энергией до 2 МэВ активно поглощаются корпусами II и III типов.

Дальнейший рост энергии падающих на стенки корпуса первичных электронов выше «порогового» значения ведет к увеличению энергии и количества частиц, достигающих кристаллов кремния, в результате чего наблюдается существенное возрастание значения D_0 (см. рис. 3). Зависимости $D_0(E)$ для корпусов с дополнительными радиационными экранами (II и III типы) лежат значительно ниже, чем таковые для корпуса типа I. Это обусловлено большим значением суммарной массовой толщины ($1,67 \text{ г/см}^2$) крышек и оснований корпусов со слоями композита W-Cu.

Опускание слоя композита W-Cu к основанию в конструкции корпуса типа III приводит к существенному увеличению массовой толщины вышележащих частей всех боковых стенок. Здесь электронам необходимо преодолеть не только эти стенки, но и защитный слой композита, чтобы попасть в кристаллы активных элементов (см. рис. 1г). Несложно оценить, что суммарная массовая толщина указанных элементов корпуса возрастает до $2,7...3,5 \text{ г/см}^2$. При этом суммарная массовая толщина остальных элементов (крышки, основания и частей боковых стенок, лежащих ниже слоя композита W-Cu) остаётся такой же, как и у корпуса типа II. Из вышесказанного становится понятно, почему на графике (см. рис. 3) зависимости $D_0(E)$ кристаллов транзисторов в корпусе типа III

лежат ниже таких же зависимостей, рассчитанных для корпуса типа II.

Таким образом, можно сделать вывод, что наибольшей эффективностью защиты активных элементов от потоков электронов радиационных поясов Земли обладает корпус типа III. Это полностью подтверждается данными по вычислению в соответствии с формулой (1) суммарных поглощённых доз D в кристаллах кремниевых транзисторов (см. табл. 1).

Эффективность радиационной защиты электронных компонентов корпуса от воздействия электронов K_c можно оценить из отношения

$$K_c = D_1/D_{sb}, \quad (2)$$

где D_1 – накопленная доза кристаллами кремния в корпусе без радиационного экрана (типа I), а D_{sb} – накопленная доза в корпусе с радиационными экранами. Эффективность экранирования корпусом типа II составляет $3,5...3,7$ при минимуме солнечной активности и $3,9...4,1$ – при её максимуме. Соответственно, эффективность экранирования корпусом типа III составляет $6,8...9,3$ при минимуме и $7,6...10,7$ – при максимуме СА.

В заключение следует отметить тот факт, что значения D кристаллов транзисторов в корпусе типа III явно зависят от их положения на коммутационной плате (см. табл. 1). Максимальная разница в накопленной дозе активными элементами в корпусе типа III при минимуме и максимуме солнечной активности составляет 25 и 27% соответственно. При этом такая же разница для корпусов типов I и II равняется $2...3\%$ и сопоставима со статистической погрешностью моделирования. Столь большое различие в значениях D для корпуса типа III также вытекает и из расхождений кривых $D_0(E)$ (см. рис. 3). Если расположить транзисторы по мере удалённости от двух ближайших боковых стенок (см. рис. 1а): VT2 (1,27 и 1,52 мм), VT4 (1,3 и 2,15 мм), VT1 (1,27 и 4,47 мм), VT6 (1,65 и 5,15 мм), VT3 (2,15 и 4,10 мм), VT5 (3,55 и 5,15 мм), то такой порядок соответствует монотонному уменьшению их значения D (см. табл. 1). Указанная закономерность позволяет дать следующее объяснение полученным результатам. Выше уже отмечалось, что у корпусов типов II и III массовая толщина крышки и основания больше толщины боковых стенок. Суммарное количество излучения (первичные и вторичные электроны, а также тормозные гамма-кванты),

падающего на кристалл от любой стороны корпуса, определяется телесным углом, под которым эта сторона видна из точки расположения кристалла. Очевидно, что величина телесного угла увеличивается с уменьшением расстояния между кристаллом и боковой стенкой, и значение D должно возрастать, что и наблюдается при расчётах для корпуса типа III (см. табл. 1). С помощью геометрических построений несложно показать, что этот эффект уменьшается с увеличением высоты стенок, что подтверждается полученными результатами для корпуса типа II.

Для более полного анализа зависимости значения D от положения кристаллов активных элементов на плате необходимо сравнить спектры рассеянных первичных и сгенерированных вторичных электронов, а также тормозных гамма-квантов всеми стенками и защитными экранами корпуса для каждого транзистора. Следует отметить, что одной из возможных причин зависимости значения D от положения кристалла на плате в корпусе типа III может быть также эффект теневого экранирования транзисторами друг друга. При этом изменение размеров корпуса может существенно изменить вид полей ионизирующих излучений. Все эти особенности требуют проведения дополнительных исследований.

Заключение

Таким образом, с помощью программного комплекса Geant4 рассмотрены способы снижения уровня поглощённой дозы D кристаллами активных элементов с использованием экранов радиационной защиты на основе композита W-Cu в гибридных металлических корпусах блоков радиоэлектронных средств четвёртого

Таблица 1. Суммарные поглощённые дозы в кристаллах кремниевых транзисторов, расположенных в корпусах всех типов, от электронов круговой орбиты с углом наклона $i = 30^\circ$ и высотой $H = 8000$ км

Положение на плате	D, рад/сут					
	минимум солнечной активности			максимум солнечной активности		
	тип корпуса I	тип корпуса II	тип корпуса III	тип корпуса I	тип корпуса II	тип корпуса III
VT1	36,01	9,96	4,63	117,13	29,82	13,53
VT2	35,62	10,05	5,24	115,74	29,79	15,27
VT3	36,63	9,86	4,32	119,47	29,61	12,36
VT4	35,81	10,03	4,79	116,63	29,93	13,60
VT5	36,74	9,87	3,95	119,38	29,37	11,12
VT6	36,18	10,06	4,42	117,86	30,27	12,71

поколения при воздействии электронов круговой орбиты с углом наклона $i = 30^\circ$, высотой $H = 8000$ км. Показано, что увеличение массовой толщины основания и крышки корпусов экранами до значения $1,67$ г/см² позволяет снизить дозовую нагрузку в $3,5...3,7$ раза при минимуме и в $3,9...4,1$ раза – при максимуме солнечной активности. Оптимизация защиты путём опускания верхнего слоя композита W-Cu к основанию до высоты $1,2$ мм уменьшает значение D в $6,8...9,3$ раза при минимуме и $7,6...10,7$ раза – при максимуме солнечной активности.

Литература

1. Ефремов Г. и др. Новые материалы локальной радиационной защиты. Физика и химия обработки материалов. 2003. № 1. С. 34–37.
2. Заболотный В. Т., Старостин Е. Е., Кочетков А. В. Оптимальные составы для локальной защиты бортовой электроники от космической радиации. Физика и химия обработки материалов. 2008. № 5. С. 15–18.
3. Василенков Н. А. и др. Специализированные радиационно-защитные корпуса для изделий микроэлектроники. Технологии

в электронной промышленности. 2015. № 4. С. 85–88.

4. Spratt J. P. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1997. Vol. 44. № 6. URL: <https://doi.org/10.1109/23.658984>. P. 2018–2025.
5. Fan W. S. Shielding considerations for satellite microelectronics. IEEE Trans. Nucl. Sci. 1996. P. 2790–2796. URL: <https://doi.org/10.1109/23.556868>. № 6. Vol. 43.
6. Богатырёв Ю. В. и др. Экраны локальной радиационной защиты изделий микроэлектронной техники. Вопросы атомной науки и техники. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2014. Вып. 4. С. 53–56.
7. Белоусов Е. Л., Ушкар М. Н. Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи. Н. Новгород. НГТУ. 2005. С. 237.
8. Чумаков А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы. М. Радио и связь. 2004. С. 320.
9. Geant4 Collaboration. URL: <http://geant4.web.cern.ch>.
10. OMERE 5.3. TRAD Tests & Radiations. URL: <https://www.trad.fr/en/space/omere-software>.
11. Баранов В. Ф. Дозиметрия электронного излучения. М. Атомиздат. 1974. С. 232. ©

НОВОСТИ МИРА

Крошечный полноцветный лазерный модуль для AR-очков

TDK разработала полноцветный лазерный модуль размером $6,7 \times 5,5$ мм и высотой $2,7$ мм и весом всего $0,35$ г для AR-очков дополненной реальности. Рынок очков дополненной реальности (AR) с использованием лазерных диодов, по прогнозам, вырастет почти в 100 раз в течение следующих десяти лет, и TDK стремится выйти на этот рынок. Полноцветный лазерный модуль использу-

ет плоскую световодную схему (PLC) от NTT для объединения всех цветов в один оптический путь. PLC и три лазерных чипа используются в новой конструкции узла меньшего размера – всего одной десятой размера обычного модуля. Чтобы продемонстрировать работу полноцветного лазерного модуля его установили в очки RETISSA Display 2, которые представляют собой изделие от QD Laser. В дополнение к AR и VR-очкам модуль применим и в других приложениях.

Например, в проекционных дисплеях для легковых автомобилей. Полноцветный лазерный модуль чрезвычайно лёгок и весит всего $0,35$ г. Три лазерных диода имеют длины волны соответственно 636 нм (красный), 520 нм (зелёный) и 455 нм (синий), с выходной мощностью каждого цвета менее 5 мВт. Модуль оснащён фотоприёмником и термистором для контроля внутренней температуры блока и предотвращения перегрева.

www.tdk.com

НОВОСТИ МИРА

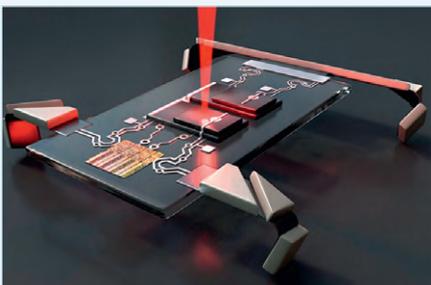
Топ-5 микроботов, которые изменят будущее робототехники

Революция через роботизацию идёт полным ходом. В области микробототехники происходит перекрёстное слияние микротехнологий и робототехники. Уже разрабатываются микроботы, которые смогут ходить, летать, плавать, лазать, ползать и выполнять различные задачи, например доставку лекарств в наши тела, выявление и уничтожение раковых опухолей. Учёные и инженеры придумали микроботы размером менее 1 мм. Благодаря последним достижениям в области электроники, механики, нанотехнологий и вычислительной техники сейчас разрабатываются модели, которые нельзя будет увидеть невооружённым глазом.

Некоторые из разработок становятся невероятно полезными инструментами, в то время как другие – лишь творческие идеи для дальнейших инноваций в области микробототехники. Перед вами топ-5 невероятно креативных и продвинутых микроботов, разработанных в 2020 году.

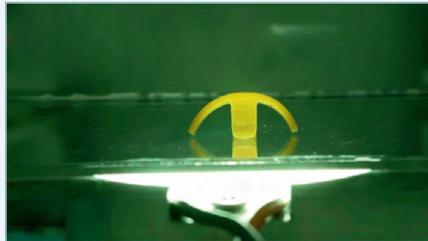
Робот, активируемый лазерным лучом

Исследователи из Корнелла и Пенсильванского университета построили роботов, состоящих из простой схемы, сделанной из кремниевых фотоэлектрических элементов, и четырёх электрохимических приводов, приводящих в движение ноги. Эти микроботы имеют толщину около 5, ширину 40 и длину от 40 до 70 микрон. Управляются они лазерными импульсами, подаваемыми на разные фотоэлементы, что позволяет активировать отдельные ноги.

**Акваробот**

Исследователи Северо-Западного университета разработали мягкого робота, который может ходить с человеческой скоростью, перемещать груз, преодолевать препятствия. Напоминающий четвероного осьминога, этот микробот функционирует внутри заполненного водой резервуара

и идеально подходит для использования в водной среде. Аква-робот сантиметрового размера имитирует поведение морских обитателей и движется со скоростью один шаг в секунду. Для движения он не требует сложного оборудования, гидравлики или электричества, вместо этого робот активируется светом и движется в направлении внешнего вращающегося магнитного поля. Заполненная водой структура этого бота и встроенный скелет из никелевых нитей являются ферромагнитными, что обеспечивает точное движение и маневренность.

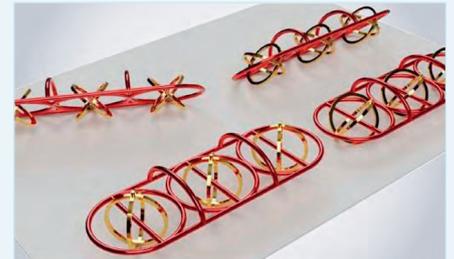
**Робожук**

Это 88-миллиграммовый автономный ползающий робот размером с насекомое (его длина 15 мм), работающий от энергии каталитического сжигания метанола. Исследователи из Университета Южной Калифорнии снабдили его искусственной мышечной системой на основе жидкого топлива (метанола), которая накапливает примерно в 10 раз больше энергии, чем батарея той же массы, позволяющей роботу ползать, карабкаться и переносить грузы на спине в течение двух часов. Жук имеет четыре ноги. Задние ноги неподвижны, а передние прикреплены к трансмиссии, соединённой с листовой пружиной, деформирующейся при нагреве. Тело робота представляет собой топливный бак, заполненный метанолом, и конструкция такова, что робот может стоять прямо. Механическая конструкция системы может модулировать поток топлива.

**Совсем крошечные роботы**

Исследователи из ETH Zurich разработали микроботы, печатаемые на 3D-принтере с помощью технологии, которая использует

сложное переплетение нескольких материалов. Два материала: металл и пластик-полимер переплетены как звенья цепи. Роботы способны доставлять полезные лекарства через кровеносные сосуды в человеческом теле. Эти микроботы настолько малы, что могут маневрировать по кровеносным сосудам и доставлять лекарства в определённые точки тела.

**Робомуха**

Исследователи из Вашингтонского университета создали этот 7,4-миллиметровый микробот с крыльями, который может перемещаться в воздухе, на земле и на водной поверхности. Этот новый робот был построен с использованием меньшего количества компонентов по сравнению с другими разработанными роботами, размером с насекомое. Это помогло упростить процесс изготовления. RoboFly использует два машущих крыла, приводимых в движение пьезоэлектрическими приводами. Используя хлопающие крылья, он может двигаться и по земле. Поскольку робот лёгкий, небольшая модификация позволит ему приземляться на поверхность воды. После приземления на воду робот может двигаться, используя тот же принцип, который задействуется для перемещения по земле.



Разве эти крошечные роботы не поражают воображение? Этот список, разумеется, неполон, так как число инноваций огромно и могли быть пропущены некоторые из них. Тем не менее краткий обзор даст вам довольно хорошее представление об уровне и направлениях исследований в области микробототехники.

circuitdigest.com

Трагическая судьба гениального изобретателя Эдвина Армстронга. К 130-летию со дня рождения

Владимир Бартнев (bartvg@rambler.ru)

Четыре гениальных изобретения Эдвина Армстронга – регенерация, сверхрегенерация, супергетеродинный радиоприём и частотная модуляция – во многом определили ход развития радиотехнических приёмных устройств, радиовещания и связи. К сожалению, борясь за авторское право на свои изобретения, Армстронг был вынужден потратить много сил и времени в безуспешных судебных тяжбах.

В конце прошлого года исполнилось 130 лет со дня рождения гениального изобретателя Эдвина Армстронга (см. рис. 1). Это событие осталось незамеченным научно-технической общественностью. Во многом причиной этого стала пандемия, охватившая многие страны, в том числе и США. Восполнить пробел и рассказать о трагической судьбе Эдвина Армстронга – главная цель настоящей статьи.

Краткая биографическая справка: Эдвин Говард Армстронг родился 18 декабря 1890 года в Нью-Йорке. Выдающийся американский радиотехник и изобретатель окончил Колумбийский университет, в котором впоследствии занимал должность профессора. Армстронг вошёл в историю как изобретатель важнейших типов радиоприёмников: регенеративного, сверхрегенеративного

и супергетеродинного. Также первым американец предложил использовать частотную модуляцию в радиосвязи и радиовещании. Он покончил жизнь самоубийством 31 января 1954 года, выпрыгнув из окна своей квартиры в Нью-Йорке. Причиной самоубийства стала тяжёлая депрессия, вызванная многолетними тяжбами с крупными американскими компаниями.

Четыре главных изобретения Армстронга: регенерация, сверхрегенерация, супергетеродинный радиоприём и частотная модуляция. Авторство Армстронга до сих пор вызывает споры, и на то есть причины. Рассмотрим этот вопрос подробнее. Начнём с патента на изобретённый Армстронгом регенеративный радиоприёмник [1].

Свою заявку на этот патент Армстронг подал в 23 года, будучи выпускником Колумбийского университета.

Предшествовало этому событию изобретение трёхэлектродной лампы (audion tube) Ли де Форестом, который получил патент на это изобретение в 1906 году. Де Форест не мог не заметить появление патента Армстронга и, конечно же, сразу вступил в борьбу за оспаривание приоритета в изобретении регенератора, ссылаясь на то, что, в соответствии с его лабораторными записями 1912 года, учёный наблюдал генерацию за счёт положительной обратной связи в изобретённом им аудионе.

Какой же из множества своих патентов с трёхэлектродной лампой де Форест противопоставил изобретению Эдвина Армстронга? Автору статьи удалось найти патент де Фореста № 1 170 881 [2], который вошёл в историю под названием «Ультра-аудион» (см. рис. 2). Причём авторов у патента двое – де Форест и Чарльз Логвуд.

Нужно обратить внимание на мало заметный, но важный компонент схемы – дроссель между анодом лампы и наушником. Вот что про этот дроссель пишет в описании патента (см. рис. 3) де Форест: «Помещаем дроссельную катушку K в цепь соединения пластины W с батареей B, между пластиной W



Рис. 1. Эдвин Армстронг (1890–1954)

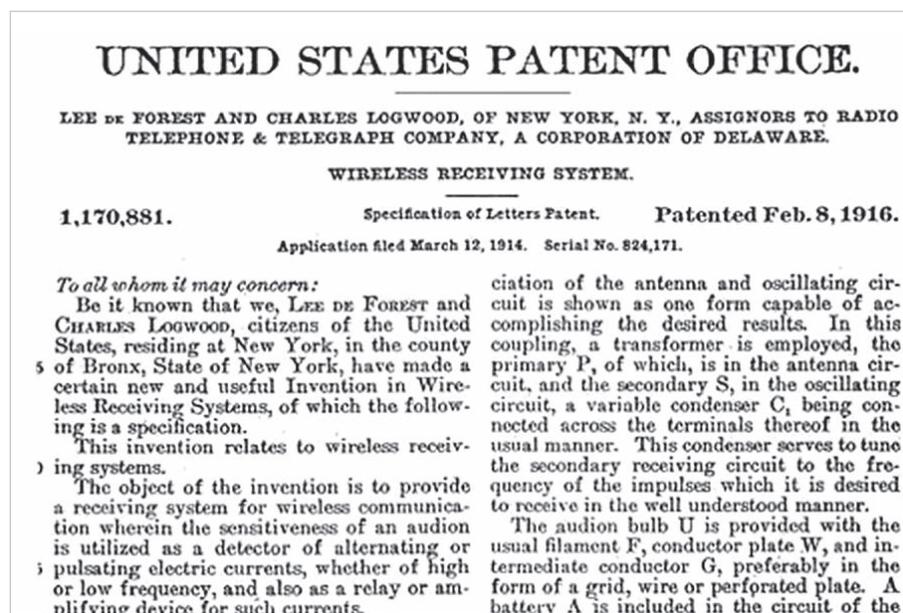


Рис. 2. Фрагмент патента на ультра-аудион

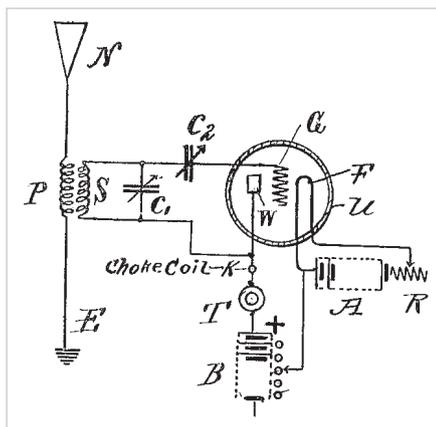


Рис. 3. Схема ультра-аудиона из патента Ли де Фореста

и батарей В за пределами клеммного соединения катушки S с пластиной W...»

На рисунке 4 изображена схема регенератора Армстронга из его патента № 1113149 под названием «Беспроводная приёмная система». Катушка L, включённая в анодную цепь и индуктивно связанная с катушкой в цепи сетки, является источником положительной обратной связи, что приводит к повышению чувствительности приёмной системы.

Армстронг в отличие от де Фореста смог не только обосновать использование положительной обратной связи в предложенной схеме приёмника, но и раскрыть физический принцип работы предложенного устройства (см. рис. 5). Представляет интерес сравнение двух схем регенераторов Армстронга и де Фореста. Для этого автором статьи были созданы модели ламповых устройств в системе для моделирования схем LTspice [2].

Для корректности сравнения модели были настроены идентично по используемым комплектующим, принимаемой частоте (1410 кГц), параметрам амплитудно-модулированного сигнала на входе. Отличие состояло лишь в способах подключения колебательного контура: у Армстронга – между сеткой и «землёй», а у де Фореста – между сеткой и анодом триода.

Результаты моделирования представлены на рис. 6, 7 и 8. Следует отметить, что сигнал на выходе регенератора де Фореста имеет искажённую форму, что говорит о частичном самовозбуждении этой схемы. У регенератора Армстронга это критическая величина обратной связи (в состоянии предвозбуждения). Регенератор де Фореста находится в режиме

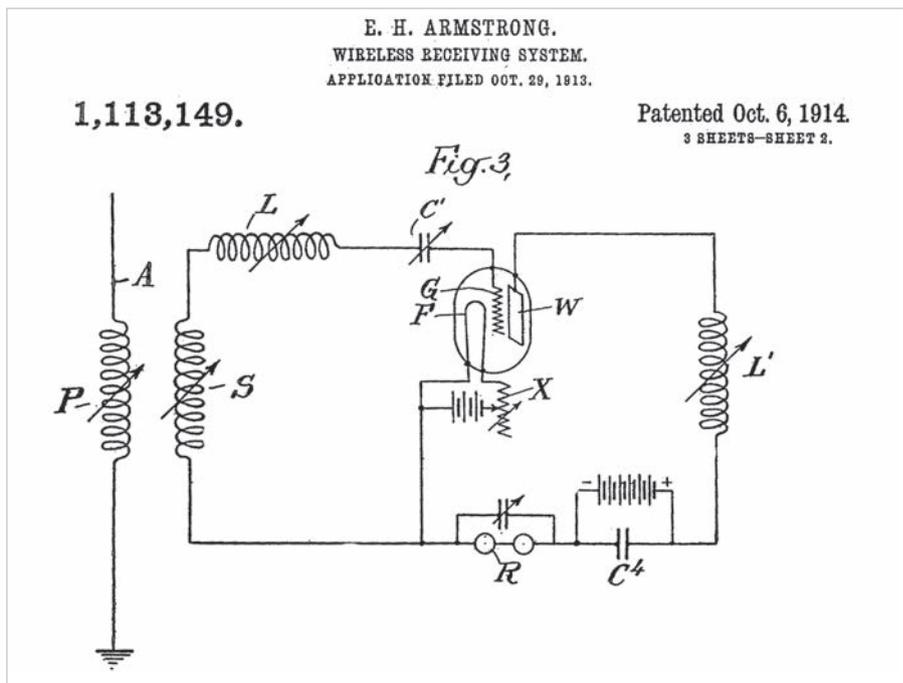


Рис. 4. Схема регенеративного приёмника Армстронга

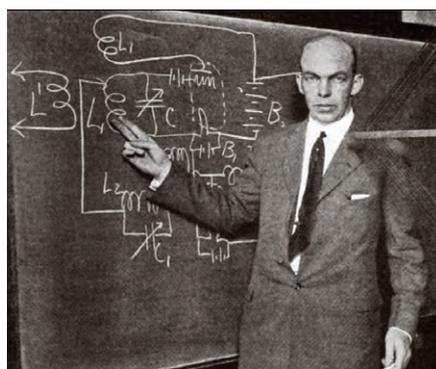


Рис. 5. Эдвин Армстронг на лекции рассказывает о своём изобретении

релаксации. Подводя итог по моделированию, можно сказать, что схему де Фореста назвать регенератором можно

с большой натяжкой, так как вывести её из состояния генерации практически невозможно даже при отсутствии индуктивной связи между входным контуром и дросселем в аноде лампы.

Но вернёмся к судебной тяжбе, которая продолжалась 14 лет и обошлась де Форесту в более чем 1 млн долларов. К этому времени де Форест уже был владельцем 25 фирм. Несколько раз дело рассматривал Верховный суд США, и в конечном итоге де Форест победил. Это был один из самых длительных патентных судебных процессов в истории США.

Скандально закончилась и история изобретения Армстронгом супергетеродина. Как и в случае с реге-

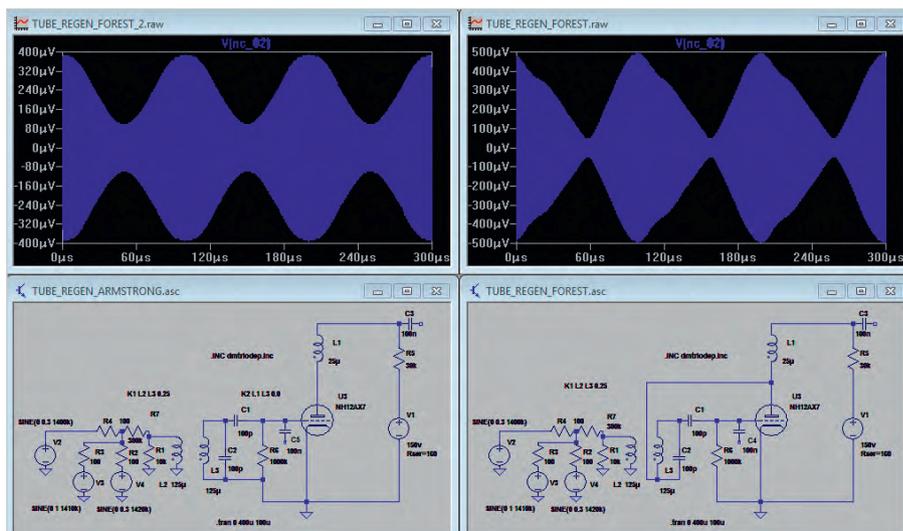


Рис. 6. Сигнал порядка 500 мкВ на управляющей сетке регенераторов: регенератор Армстронга (слева), регенератор Ли де Фореста (справа)

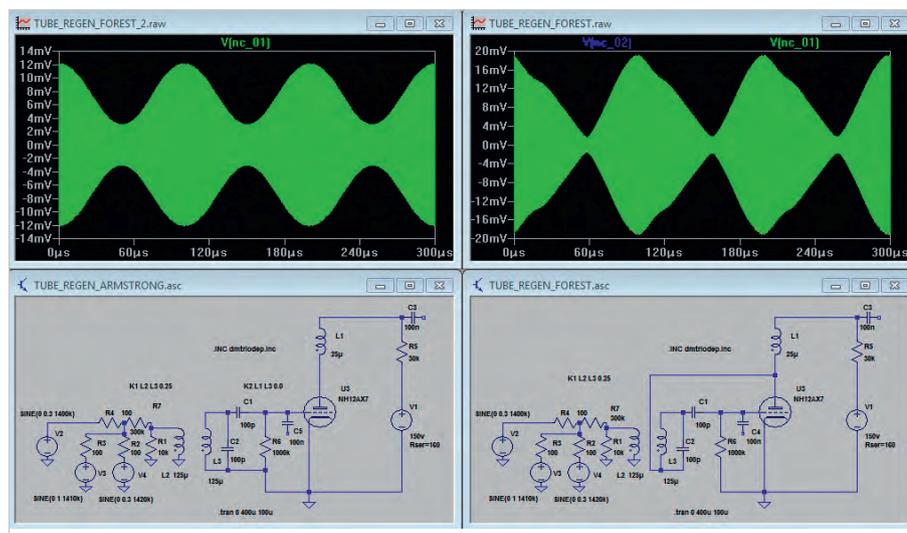


Рис. 7. Сигнал на выходе регенераторов при работе без положительной обратной связи

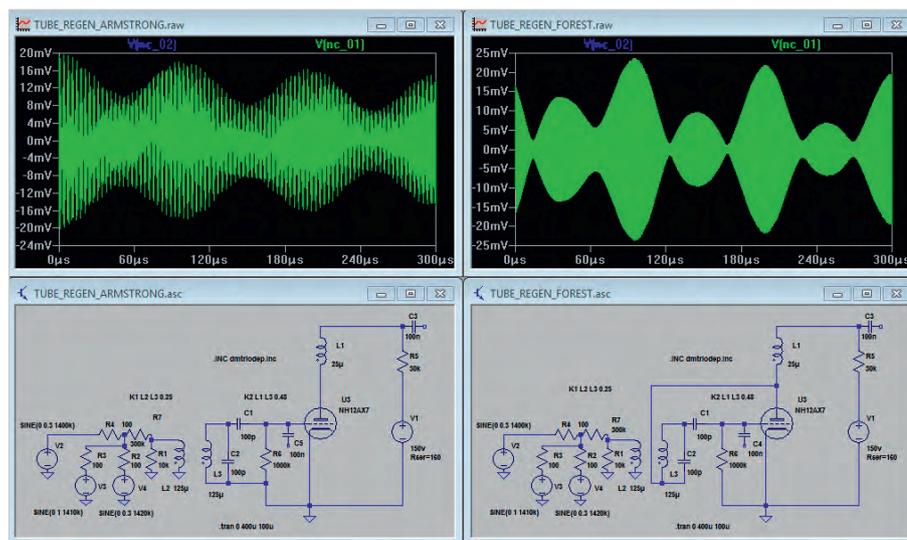


Рис. 8. Сигнал на выходе регенераторов при введении положительной обратной связи одного уровня в каждой схеме

нератором, эта противоречивая и неоднозначная история свелась к длительным судебным тяжбам. Французский инженер Люсьен Леви 4 августа 1917 подал заявку на изобретение супергетеродина во Франции и получил патент в августе 1919 года (№ 493660). Французский учёный 12 августа 1918 года также подал заявку на изобретение супергетеродина и в США (патент США № 1734038) [3]. Причём Леви это сделал за 6 месяцев до Эдвина Армстронга, чья заявка на супергетеродин была подана 8 февраля 1919 года. Патентному ведомству США пришлось иметь дело с двумя заявками на изобретение. Поскольку патент не может быть выдан дважды на одно и то же изобретение, требовалось судебное разбирательство. Апелляционный суд округа Колумбия (США) признал изобретателем супергетеродина Люсьена Леви. 5 ноября

1929 года патент с приоритетом от 4 августа 1917 года на супергетеродинный приёмник был выдан французу. Свои права на патент Люсьен Леви в США продал AT&T за \$20 000 (фирма до настоящего времени является правообладателем патента).

Автор статьи хотел бы привести из описания патента один из важнейших отличительных признаков супергетеродина, который входит в формулу изобретения Люсьена Леви: «Система, содержащая избирательные средства для приёма требуемой радиочастоты, локальный источник высокочастотной энергии, средство для объединения принимаемой энергии и энергии локального источника, получения промежуточной частоты ниже принятой, но выше слышимой. Второй локальный источник энергии переменного тока и детектор используются для объединения энергии промежуточной

частоты и энергии второго локального источника, а также для выделения сигналов и электрического фильтра, соединённого на одном конце со схемой на промежуточной частоте, а на другом – средством детектирования».

Впервые Леви вводит важный термин «промежуточная частота», которая ниже, чем принимаемая, но выше, чем слышимая. Ещё термины, введённые французом: «локальный источник», чья функция – преобразование принимаемой частоты в промежуточную (имеется в виду гетеродин); «фильтр на промежуточную частоту»; второй локальный источник, так называемый «телеграфный гетеродин». О телеграфном гетеродине следует сказать особо. Гетеродинный приём стал широко применяться очень давно, с переходом на передачу незатухающих колебаний и их приём кристаллическими детекторами. В гетеродинном приёмнике на детектор подавали два сигнала: принимаемый и гетеродинный, значительно больший по амплитуде. Если частота гетеродина немного (например, на 1 кГц) отличается от частоты приёма, то на выходе детектора появляется напряжение биений с разностной частотой. Телеграфные сигналы в этом случае воспринимаются в телефонах привычными, хорошо различимыми тональными сигналами азбуки Морзе.

Так что добавление ещё одного гетеродина для преобразования частоты принимаемого сигнала в промежуточную частоту, на которой происходят основное усиление и фильтрация, превращает гетеродинный приём в супергетеродинный.

На рисунке 9 автор поместил фото, на котором Льюис Леви выступает в роли изобретателя аудиона (трёх-электродной лампы), рядом сидит Ли де Форест. Два «победителя» судебных тяжб с Армстронгом. Ли де Форест сумел доказать в суде, что он создал регенератор, а Льюис Леви был признан по суду изобретателем супергетеродина.

Печально закончилась и история изобретения в 1922 году сверхрегенератора. Армстронг продал патентные права на сверхрегенератор компании RCA (Radio corporation of America) и в результате стал её крупнейшим акционером. Однако сверхрегенератор так и не оправдал надежд, которые Эдвин Армстронг и американский связист и бизнесмен Давид Сарнов на него возла-



Рис. 9. Люсьен Леви и Ли де Форест

гали. Причина проста: каждый сверхрегенеративный приёмник, по сути, также является генератором помех

для ближайших приёмников. Кроме того, бурное развитие супергетеродинной техники радиоприёма стало превалировать.

Последней ожесточённой битвой Армстронга стал судебный спор с бывшим другом Сарновым и RCA, длившийся более 10 лет, за права на изобретённый учёным способ частотной модуляции. Сил и денег у Армстронга уже почти не оставалось. Изобретатель, находясь в тяжёлой депрессии, покончил жизнь самоубийством в 1954 году в возрасте 63 лет. Давид Сарнов (1891–1971), выходец из России, с 1919 года работал в корпорации по производству радиоэлектронной аппаратуры RCA, с 1922 года – её вице-президент, после 1930 года – президент, в 1947–1970 годах – председатель совета директоров. Де Форест за несколько лет до своей смерти в возрасте 87 лет

написал автобиографию под одиозным названием «Отец радио». В 1980 году Эдвин Армстронг посмертно был введён в Национальный зал славы изобретателей США (National Inventors Hall of Fame) [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барменов В. Г.* Детекторные приёмники. Вчера, сегодня и завтра. Горячая линия. Телеком. М. 2016.
2. LTspice. Ресурсы (Analog Devices). URL: <https://www.analog.com/ru/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>.
3. *Барменов В. Г.* 100 лет супергетеродинному радиоприёмнику. Современная электроника. 2018. № 9.
4. *Lessing Lawrence.* Man of High Fidelity: Edwin Howard Armstrong. J. B. Lippincott company. Philadelphia and New York. 1956.



НОВОСТИ МИРА

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ ДЛЯ 2 НМ-ПРОЦЕССОВ

imec, KMLabs и Inpria использовали голографическую литографию high-NA EUV для создания линий и пространств с шагом 20 нм для 2-нм технологического процесса.

Бельгийская исследовательская лаборатория imec использовала источник с длиной волны 13,5 нм для интерференции или голографической литографии на металло-оксидном резисте в условиях высокой числовой апертуры. Интерференция между двумя оптическими источниками может применяться для создания массивов регулярных объектов, таких как линии и пространства, без использования сложных оптических систем или фотошаблонов в EUV-литографии.

Эта разработка является шагом вперёд к производству схем по технологии 2 и 1 нм. KMLabs в Боулдере, штат Колорадо, является производителем сверхбыстрых лазерных систем и партнёром инициативы AttoLab совместно с imec. KMLabs предоставила лазерный источник с зеркалом Ллойда для экспериментов. В этой конфигурации свет, отражённый от зеркала, интерферирует со светом, непосредственно излучаемым лазерным источником 13,5 нм, создавая тонко детализированную интерференционную картину, подходящую для визуализации резистивных изображений.

Следующий шаг – перейти к исследованию на пластинах диаметром 300 мм. Технология будет использоваться для обеспечения промышленности узорчатыми

пластинами до того, как появится первая литографическая система high-NA (0,55) от ASML. Это и есть EXE5000. Высокоточный лазерный источник KMLabs использовался на рекордно малой длине волны 13,5 нм, испуская серию аттосекундных (10^{-18} с) импульсов с частотой следования в несколько фемтосекунд (10^{-15} с).

www.imec-int.com

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДОБАВЛЯЮТ СЕНСОРНЫЕ ФУНКЦИИ К ЛЮБОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Тензометрические датчики Dynaforce от Algra могут быть применены в качестве сенсорного датчика на металле, стекле или дереве с толщиной листа от 0,3 до 1,2 мм. Компания Algra (Германия) выпустила набор для установки своих тензометрических датчиков, позволяющий добавить сенсорную клавиатуру на любую поверхность. Каждая кнопка на печатной плате представляет собой один из этих датчиков. Сеть датчиков обнаруживает мелкие механические деформации и использует интеллектуальное программное обеспечение для фильтрации сигналов помех. Тензометрическая технология распознает даже самые незначительные деформации в слое материала. Этого достаточно, чтобы зафиксировать нажатие на кнопку. Это стало возможным благодаря интеллектуальному программному обеспечению и сенсорной сети, состоящей из тензометрических датчиков. Посколь-

ку устройства являются датчиками силы, функции могут быть дифференцированы в зависимости от силы, приложенной к датчику. Например, жёсткое нажатие кнопки на лампе может привести к включению света, в то время как более мягкое нажатие кнопки может снизить яркость. Другая возможность – визуальная обратная связь через светодиодный индикатор или дисплей. Возможность отклеивания и приклеивания в широком диапазоне температур (от -40 до $+85^{\circ}\text{C}$) и работы в перчатках открывает возможности применения в домашних и промышленных условиях или в общественных местах, а также применения с высокими требованиями к прочности и водонепроницаемости.



Демо-версия Dynaforce и комплект разработчика включает функциональность оптической, акустической и тактильной обратной связи. После подключения к ПК клавиши реагируют на прикосновение пальца к алюминиевой передней панели толщиной 1 мм.

www.algragroup.ch

Итоги «Российской недели высоких технологий-2020»

Со 2 по 6 ноября 2020 года в ЦВК «Экспоцентр» прошла «Российская неделя высоких технологий-2020», которая объединила ряд значимых отраслевых событий под общей концепцией «Цифровая трансформация»:

- 32-ю международную выставку «Информационные и коммуникационные технологии» – «СВЯЗЬ-2020»;
- 12-ю международную выставку «Навигационные системы, технологии и услуги» – «НАВИТЕХ-2020»;
- форум «Связь-2020: цифровое будущее телеком отрасли»;
- Форум «Российский софт – эффективные решения для цифровой экономики».

Организатором выступил АО «Экспоцентр». При поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, Министерства промышленности и торговли РФ, Комитета Государственной Думы ФС РФ по образованию и науке, а также Федерального агентства связи (Россвязи). В подготовке принимали участие Центр компетенций по импортозамещению в сфере ИКТ и Ассоциация разработчиков программных продуктов «Отечественный софт». Патронат: Торгово-промышленная палата России.

Генеральный директор АО «Экспоцентр» Сергей Беднов: «В пятый раз «Экспоцентр» проводит «Российскую неделю высоких технологий». За это время выставочный проект снискал высокий авторитет, признание и востребованность в профессиональной среде. Это авторитетное событие является межотраслевой платформой для создания и развития инфраструктуры цифровой экономики России. Несмотря на сложную обстановку, связанную с пандемией, её экспонентами стали 150 компаний из 10 стран мира, представлены 8 регионов России. Для многих телеком-компаний участие в «Неделе», особенно в нынешних условиях, – это не только способ достичь конкурентных преимуществ, но и обязательное условие сохранения их позиций и дальнейшего развития».

«Российская неделя высоких технологий-2020» как часть масштабной

платформы «Наука-Технологии-Инновации Экспо» («НТИ-Экспо») подтвердила статус эффективной площадки для взаимодействия участников рынка, знакомства с достижениями индустрии связи, инновационными разработками в сфере телекоммуникаций и навигационного оборудования. На одной площадке встретились лидеры бизнеса, ведущие экспертов, представители законодательной и исполнительной власти.

В работе РНВТ-2020 приняли участие 154 компании из Великобритании, Германии, Казахстана, Китая, Польши, Республики Беларусь, России, США, Финляндии, Швейцарии. С экспозицией ознакомились свыше 5000 посетителей из 162 городов России, а также из 22 других стран.

Цифровые сервисы во время пандемии позволили всем оставаться эффективными – получать услуги и работать дистанционно. Всё это, конечно, усилило нагрузку на телекоммуникации. В то же время смягчение налоговой политики дало отечественным компаниям производителям программного обеспечения выйти на новый качественный уровень.

Президент Торгово-промышленной палаты РФ Сергей Катырин: «Несмотря на все сложности, связанные с работой крупного мероприятия, для нас было важным показать, что в России есть возможность на высоком уровне безопасности провести подобные выставки, а также их насущность и востребованность. Тема цифровизации – доступ к Интернету по всей стране, спутниковая связь, телекоммуникации и так далее, что называется, – на острие важности и насущности».

В честь открытия 5-й «Российской недели высоких технологий» была выпущена почтовая карточка «Связь-2020» с почтовой маркой, на которой изображено здание «Экспоцентра», изготовлен специальный сувенирный штампель. В заключительной части церемонии открытия РНВТ почетные гости произвели памятное гашение почтовой марки.

«СВЯЗЬ-2020»

Главное событие «Российской недели высоких технологий» выставка «СВЯЗЬ-2020» представила ключевые тенденции мирового и отечественного рынков информационных технологий в различных областях цифровой экономики.

Руководитель Федерального агентства связи Олег Духовницкий: «Являясь главным отраслевым событием в России и Восточной Европе, выставка нацелена на продвижение и развитие технологий отечественного производства. «СВЯЗЬ-2020» – это не только витрина передовых достижений, но и дискуссионная площадка для обмена мнениями и опытом между представителями органов государственной власти, бизнес-сообществ, производителей и разработчиков телекоммуникационного оборудования, операторов связи».

Лучшие достижения были отражены в главных тематических разделах: телекоммуникация, сетевая инфраструктура, сети передачи данных, спутниковая и мобильная связь, телевизионное и радиовещание, кабели связи, ИТ-услуги, Интернет вещей, российский софт, программное обеспечение и т.д.

Региональные центры поддержки предпринимательства оказали содействие в организации участия региональных компаний. На выставке были представлены региональные коллективные стенды Архангельской, Воронежской, Курской, Самарской, Томской, Тульской, Ульяновской областей, Красноярского края. Среди участников региональных экспозиций – ЗАО «СОКК» (г. Самара), ООО «Архитектор ИС» (г. Архангельск), ООО «Инжиниринговое бюро Феникс» (г. Красноярск), «Скард-Электроникс» (г. Курск), ОАО НПФ «Микран» (г. Томск), Центр инновационного развития Томской области, ИТ-компании из Ульяновска PROF-IT Group, «Смарт Сити», Simtech Development и другие.

Выставку дополнил раздел «Электронные компоненты для телекоммуникаций», который представи-

ли компании Keysight Technologies (США), АО «Алмаз-СП», ООО «Интэко», ГК «Пантес», АО ПКК «Миландр», ООО «Телеконта», ОАО «Элеконд», «Скард-Электроникс» и другие.

Свыше 30 экспонентов впервые участвовали в выставке или вернулись после длительного перерыва: ООО «КСС-Контакт», ZPAS (Польша), АО «Алмаз-СП», ООО «Сибтехметалл», ООО «Юнитесс», ООО «Экон технологии», ООО «Энергосеть инвест», ООО «Нетше Лаб», ДВДМ.РУ, «СКАРД-Электроникс», ООО «Радио Гигабит», АО «Концерн «Автоматика», ООО «Орбис Солюшнс» и другие.

На стендах компаний-участников впервые демонстрировались уникальные разработки. Технополис «Эра» представил 23 образца продукции двойного назначения – это компьютерная техника, специальное программное обеспечение и комплектующие. Компания «Специальная интеграция» продемонстрировала масштабируемый комплекс для защиты высокоскоростных каналов связи на базе средств криптографической защиты информации «Квазар». Применение комплекса позволяет обеспечить соответствие сетей передачи данных требованиям регуляторов по защите персональных данных и объектов критической инфраструктуры. Концерн «Автоматика» госкорпорации «Ростех» представил на выставке «СВЯЗЬ-2020» решение для организации защищённого корпоративного портала с мультимедийными сервисами. Новинка, получившая название «Портал-10», предназначена для финансовых, государственных и коммерческих организаций, которым нужно организовать защищённое информационное взаимодействие своих сотрудников. Концерн «Автоматика» презентовал модернизированную мобильную радиостанцию для подводной связи IVA S/W. Новая версия обладает уменьшенным весом, позволяет общаться и передавать данные под водой на расстоянии до 150 м. «Холдинг Кабельный Альянс» (г. Екатеринбург) продемонстрировал на выставке огнестойкие оптические кабели, которые отличаются низким дымо- и газовыделением при горении и низкой коррозионной активностью выделяемых газов.

В рамках «Российской недели высоких технологий» на выставке «СВЯЗЬ-2020» впервые была запущена

специальная программа переговоров для экспонентов – «Бизнес-Гид». Организатор программы – КВК «ИМПЕРИЯ». Поставщики провели более 500 переговоров с потенциальными стратегическими заказчиками телекоммуникационных и ИТ-решений на стендах компаний-участников выставки.

«НАВИТЕХ-2020»

Участники 12-й специализированной выставки навигационных систем, технологий и услуг «НАВИТЕХ-2020», среди которых отечественные и зарубежные разработчики и производители навигационного оборудования, познакомили с новыми разработками в области транспортной телематики, интеллектуальной городской мобильности, высокоточной спутниковой навигации.

Свои разработки представили компании из России и Китая: Queclink Wireless Solutions Co. Ltd, «Дженерал Майкросейв», Красногорский завод имени С. А. Зверева, «Дата Ист», «Лаборатория Микроприборов», ООО «Марвелмайд», «НТЛАБ».

Благодаря Центру поддержки экспорта в выставке приняли участие три предприятия Тульской области в рамках региональной экспозиции: ООО НПП «РусГазТехнологии», ООО НИЦ «Наукоёмкие Технологии», ООО «СервисСофт». Они демонстрировали навигационное оборудование, программное обеспечение и системы автоматизации для речных и морских судов.

Компания «Дата Ист» ознакомила с сервисами облачной геоинформационной системы CityCloud. Эти облачные технологии помогают решать многие городские проблемы, создавать приложения и публичные карты, следить за жизнью города в режиме реального времени, эффективно взаимодействовать с гражданами, собирать, хранить и обрабатывать большие данные. На выставке были продемонстрированы шесть сервисов CityCloud – «Наказы избирателей», «Рекламные конструкции», «Нестационарные торговые объекты», «Разрешения на строительство», «Кадастровая карта», «Твердые коммунальные отходы». Они позволяют муниципалитетам эффективно управлять городским хозяйством.

Разработчики Красногорского завода имени С. А. Зверева представили макет системы «Аврора» для создания цифровых карт из космоса во время чрез-

вычайных ситуаций и экологических бедствий. По своим техническим характеристикам «Аврора» не имеет зарубежных аналогов, позволяет получать снимки высокого качества в панхроматическом и мультиспектральном диапазонах, что является ее ключевым преимуществом.

«Экспоцентр» организовал выставку при поддержке Министерства промышленности и торговли РФ, под патронатом Торгово-промышленной палаты России. Совместное проведение выставки «НАВИТЕХ-2020» и выставки «СВЯЗЬ-2020» в рамках «Российской недели высоких технологий» предоставило возможность специалистам отрасли возможность изучить новинки рынка, найти новых поставщиков и партнёров, получить консультации у технических специалистов компаний производителей, а также подобрать необходимое оборудование.

Деловая программа

Деловую программу «Российской недели высоких технологий-2020» открыл форум «СВЯЗЬ-2020: цифровое будущее телеком отрасли». Темой пленарного заседания стала «Цифровая экономика и телеком-отрасль: навстречу новой реальности». Организаторы Форума – АО «Экспоцентр», информационное агентство «РосБизнесКонсалтинг» при поддержке Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, Комитета Государственной Думы РФ по образованию и науке РФ, Экспертного совета по научно-технологическому развитию и интеллектуальной собственности при Комитете ГД РФ по образованию и науке.

В ходе заседания обсуждались вопросы развития цифровой экономики в России, способы оценки эффективности внедрения новых технологий, планы телеком операторов в сфере цифровой трансформации и внедрения сетей 5G.

Депутат Государственной Думы ФС РФ, председатель Оргкомитета технологической платформы «НТИ-Экспо» Владимир Кононов: «Традиционный бизнес телекоммуникационных компаний постепенно уходит в прошлое, перед компаниями стоят новые задачи, но и открываются новые возможности для роста. Будущее отрасли сегодня напрямую связано с такими понятиями как облачные сервисы, Интернет

вещей, переход на 5G, технологии BigData, мобильные финансы».

В рамках форума прошли тематические сессии «Точки роста: поставщики и новые каналы сбыта», «Телеком Smart city: инвестиции в технологии будущего», «5G в России – вектор роста для экономики», «Поддержка разработчиков и производителей телеком-оборудования».

Состоялось два мероприятия в формате онлайн. Круглый стол на тему «Место спутниковых технологий на рынке Интернета вещей» был организован ФГУП «Космическая связь» по инициативе Федерального агентства связи. Эксперты и представители отраслевого сообщества обсудили роль спутниковой связи в экосистеме Интернета вещей, статус стандартизации IoT, а также перспективы развития спутниковых технологий в индустрии IoT. Модератором мероприятия выступил Евгений Буйдинов, заместитель генерального директора по развитию и эксплуатации систем связи ФГУП «Космическая связь». С докладами выступили начальник отдела по развитию и использованию сетей связи Федерального Агентства связи (Россвязи) Роман Антипин и другие представители отрасли.

На конференции «IoT Harvest 2020. IoT по осени считают» речь шла о трендах промышленных решений Интернета вещей в 2020 году, о том, что ожидать от рынка в ближайшие четыре года, а также о мерах государственной поддержки, новостях из мира стандартов и международных векторах развития.

Вторым важным мероприятием деловой программы РНВТ стал форум «Российский софт – эффективные решения для цифровой экономики». Его организаторами выступили Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ, Комитет Государственной Думы РФ по образованию и науке, Экспертный совет по научно-технологическому развитию и интеллектуальной собственности при Комитете ГД РФ по образованию и науке, АО «Экспоцентр».

На форуме в рамках тематических сессий «Эпоха пандемии: цифровые продукты для эффективной удаленной работы», «Военные ИТ – технологии и экономический рост: законы интеграции» обсуждались перспективы развития российских программных средств для удаленной работы, вопросы, связанные с барьерами внедрения российско-

го ПО в органах государственной власти, госкомпаниях и в коммерческом секторе.

Международная академия связи в партнёрстве с АО «Экспоцентр» провела XXIV международный форум МАС'2020 «Новые задачи и возможности цифровой трансформации экономики в целях устойчивого развития». Большое количество докладов было посвящено актуальной и востребованной теме развития Национальной системы квалификаций.

Участники Форума также рассмотрели вопросы развития инфокоммуникаций в условиях внедрения цифровых технологий, перспективы квантовой экономики, решения на базе Интернета вещей и другие актуальные темы.

В заключение мероприятия были подведены итоги Молодежного конкурса инноваций и инновационных проектов – «Новое поколение 2019/2020».

Ждём вас на 33-й международной выставке «Связь-2021» и 13-й международной выставке «Навитех-2021», которые пройдут с 15 по 18 июня 2021 года в ЦВК «Экспоцентр» в рамках «Российской недели высоких технологий-2021».

Пресс-служба АО «Экспоцентр» ©



ВИДЕО С ВЫСТАВОК «СВЯЗЬ-2020» И «НАВИТЕХ-2020»

Смотрите на YouTube-канале журнала СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ©





ЧИТАЙТЕ КАК ВАМ УДОБНО



ПЕЧАТНУЮ

ПОДПИСКА С ГАРАНТИРОВАННОЙ ДОСТАВКОЙ

ИЛИ ЭЛЕКТРОННУЮ ВЕРСИЮ ЖУРНАЛА

**СОВРЕМЕННАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА**

ПОДПИСКА
НА ЖУРНАЛ

онлайн: www.soel.ru • +7 495 232-0087 • info@soel.ru
на почте: по каталогу «Урал-пресс» (индекс для печатной версии 36280)

Физическим лицам для получения печатной версии журнала в 2021 году предлагаем оформить подписку через подписное агентство «Урал-Пресс» (индекс на 1 год – 36280). В этом случае журнал будет гарантированно доставлен на указанный почтовый адрес Почтой России.

Юридические лица могут подписаться на печатную версию журнала «Современная электроника» на 2021 год, оплатив прилагаемый счёт. Каждый новый номер печатной версии журнала будет гарантированно доставляться заказной бандеролью по Почте России.

Подписка только для юридических* лиц

*Выход каждого нового номера будет сопровождаться полным комплектом закрывающих бухгалтерских документов.

Журнал «СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА» ПЕЧАТНАЯ версия

Издание	Назначение платежа	Периодичность выхода	Подписная цена, руб.
СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА	Подписка на 2021 год	9 номеров в год	7 920,00

ООО «СТА-ПРЕСС»
ИНН: 7726208996, КПП: 772801001,
ОГРН 1037739253100,
ПАО АКБ «АВАНГАРД», БИК 044525201,
к/сч 30101810000000000201,
р/сч 40702810100070000708.

Счет на оплату № ПЮ02-2021 от 01 декабря 2020 г.

Поставщик: ООО «СТА-ПРЕСС», ИНН: 7726208996, КПП: 772801001
(Исполнитель): РФ, 117437, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 108, пом I ком 67, тел. + 7 (495) 234-06-35

Основание: Счет № ПЮ02-2021 от 01 декабря 2020 г.

№	Товары (работы, услуги)	Кол-во	Ед.	Цена	Сумма
1	Подписка на ПЕЧАТНУЮ версию журнала «СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА» на 2021 год	9	шт	880,00	7 920,00

Итого: 7 920,00
В том числе НДС: 720,00
Всего к оплате: 7 920,00

Всего наименований 1, на сумму 7920,00 руб.
Семь тысяч девятьсот двадцать рублей 00 копеек

Внимание!

При оплате счёта укажите в платёжном поручении в графе «Назначение платежа» полный адрес доставки (с почтовым индексом), телефон для связи (с кодом города), контактное лицо, e-mail.

Оплата данного счета означает согласие с условиями поставки товара.

Руководитель

Седов К. В.





На нашем канале:

ВСЕВИДЯЩЕЕ ОКО В КОСМОСЕ



«...она создаётся на деньги всего мирового сообщества и в интересах всех. Нет ни одной страны, не заинтересованной в её существовании...»

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ САПР ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ



«...мы намного ближе к разработчику электроники, чем наши западные конкуренты. Нам удалось создать модульную функциональную среду...»

17 февраля редакция журнала «Современная электроника» побывала на организованном компанией МЦСТ «Elbrus Tech Day», посвящённом достижениям в разработке новых продуктов и плану дальнейшего развития российских процессоров Эльбрус.

В конференции принимали участие партнёры МЦСТ, среди которых представители компаний ГК Astra Linux, DEPO computers, Aquarius, PCK, JTAG, GS Nanotech, ADVANTIX и многих других, занимающихся как созданием аппаратных платформ на базе процессоров семейства «Эльбрус», так и адаптацией под них программных продуктов. Участники конференции рассказали о своих достижениях и обсудили перспективные планы сотрудничества. Со многими интересными спикерами нам удалось побеседовать в неформальной обстановке.

Скоро на нашем канале эксклюзивные интервью с конференции Elbrus Tech Day!



Полностью сертифицированное решение для измерения фазового шума — R&S®FSWP

R&S FSWP – это решение для прецизионного измерения фазового шума сертифицированное в РФ с гарантированной спецификацией по чувствительности в непрерывном и импульсном режимах. Прибор является уникальным моноблочным решением сочетающим в себе комплекс средств по тестированию шумовых параметров СВЧ компонентов и систем.

- ▮ Прецизионные измерения фазового и амплитудного шума
- ▮ Непрерывный и импульсный режим измерения без внешних устройств
- ▮ Тестирование компонентов тракта – измерение вносимых фазовых шумов в непрерывном режиме, импульсном режиме и для устройств с переносом частоты
- ▮ Встроенный полноценный анализатор спектра и сигналов высшего класса



Хотите узнать, как без проблем провести приёмо-сдаточные испытания?