

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

WWW.CTA.RU

6

2026

ТЕМА НОМЕРА

РАЗВЕДЁМ ПО ПОЛНОЙ ПРОГРАММЕ:
отечественное ПО в области проектирования электроники



Электронная
версия этого
журнала



50ohm Technologies

**Эволюция для революции
в проектировании СВЧ ИС**

50ohm Tech Circuit Studio - это САПР СВЧ интегральных схем,
использующая методы искусственного интеллекта

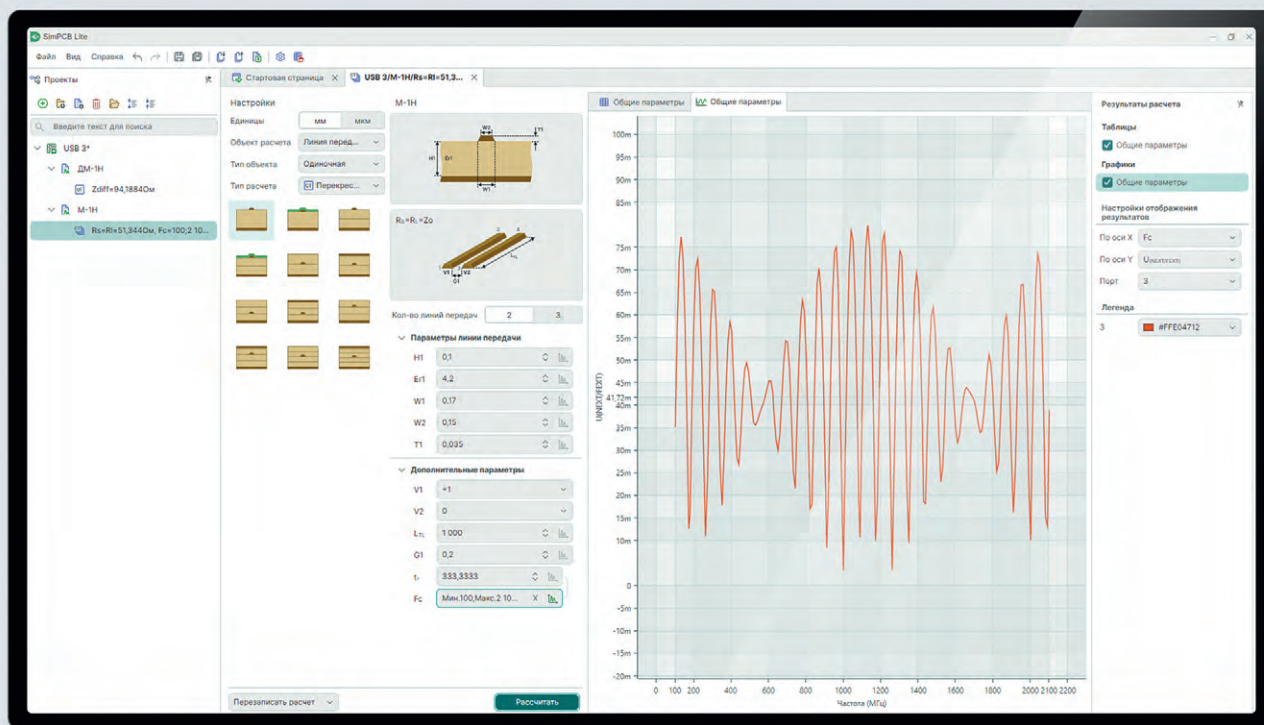
50ohm.tech/ru



Реклама



Новое отдельное приложение
для обеспечения целостности сигналов



- + **Большой набор готовых структур линий передачи** (одиночные, диф. пары, копланарные) и переходных отверстий
- + **Расчет без потерь.** Вычисление первичных и вторичных параметров линий передачи и переходных отверстий (емкость, индуктивность, волновое сопротивление, задержка сигнала и т.д.)
- + **Частотный анализ** (импеданс, индуктивность, сопротивление, проводимость диэлектрика, ослабление сигнала)
- + **Временной анализ** (форма сигнала, S-параметры, перекрестные помехи)
- + **Расчет S-параметров одиночных и дифференциальных линий передачи**
- + **Вычисление перекрестных помех без учета потерь**
- + **Множественный расчет** (вычисление одного или нескольких параметров с учетом шага)



Приобрести новое приложение SimPCB Lite
могут физические и юридические лица!

Купить SimPCB Lite





РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА 2026

27 сентября –
3 октября 2026



ФЕДЕРАЛЬНАЯ
ТЕРРИТОРИЯ
«СИРИУС»

Российский форум «Микроэлектроника» –
ключевое коммуникационное событие года
в микроэлектронной и смежных отраслях

7

дней

3 500+

участников

50

мероприятий
деловой
программы

1 000+

организаций

14

секций научной
конференции

1 200+

докладчиков

160+

выставочных
экспозиций

2 000 м²

выставочных
площадей

Форум «Микроэлектроника» – авторитетная площадка российской индустрии, где формируются стратегические векторы развития отечественной электронной компонентной базы и обсуждаются прорывные технологические решения в условиях новой индустриальной реальности. Мероприятие объединяет лидеров отрасли, представителей госкорпораций, инновационных стартапов и научно-исследовательских центров, создавая экосистему для выстраивания эффективных бизнес-партнёрств и коммерциализации передовых разработок.

На Форуме демонстрируются актуальные достижения в области микро- и радиоэлектроники, полупроводниковых технологий импортозамещения, задавая ориентиры для устойчивого роста российского высокотехнологичного сектора.

+7 495 641 57 17
office@proconf.ru
microelectronica.pro



MICROELECTRONICA.PRO



ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ И БУДЬТЕ В КУРСЕ
ВСЕХ ПОСЛЕДНИХ НОВОСТЕЙ!



RUTUBE



VK ВИДЕО

Организаторы



При поддержке



Генеральный партнёр



Инновационный партнёр



Образовательный партнёр



Партнёры



Партнёр детской программы



Генеральный информационный партнёр



Оператор Форума



Реклама



Здравствуйте, уважаемые друзья!

Главной темой этого номера стало развитие отечественных систем автоматизированного проектирования электронной аппаратуры. Сегодня российские системы переходят от этапа начального импортозамещения к формированию полноценной экосистемы, охватывающей весь цикл разработки – от создания принципиальной схемы и моделирования до подготовки конструкторской документации и применения интеллектуальных методов проектирования.

В тематическом блоке представлены материалы о практическом опыте перехода ОКБ «Аэрокосмические системы» с Altium Designer на отечественную САПР «Макс.EDA», новой редакции Delta Design для индивидуальных разработчиков и автоматизации выпуска конструкторской документации в этой системе. Дополняют тему статьи об интеллектуальном синтезе СВЧ-интегральных схем в программе 50ohm Tech Circuit Studio и сравнительном анализе инструментов моделирования SimPCB Lite и Ansys HFSS при проектировании СВЧ МИС.

Традиционно значительное место в номере занимают практические инженерные разработки. Читатели познакомятся с программой диагностики контроллера ОВЕН ПР205, методикой сопряжения контроллеров разных производителей по интерфейсу RS-485, а также с первой частью описания универсального вольтметра действующего и средневыпрямленного значений напряжения.

Отдельное внимание уделено вопросам надёжности электронной аппаратуры. В статье об инновационных технологиях повышения противопожарной безопасности аккумуляторных батарей рассматриваются современные российские решения по предотвращению и локализации возгораний литиевых источников питания.

Научный раздел продолжает цикл публикаций к 130-летию со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма. Очередная статья посвящена истории открытия плазмонов и роли идей учёного в развитии современной плазмоники. Кроме того, представлены результаты исследований импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона и её взаимосвязи с сейсмической активностью и гелиогеофизическими процессами.

Спасибо, что остаётесь с нами. Надеемся, материалы этого номера будут полезны инженерам, разработчикам и всем, кто интересуется развитием современной электронной отрасли.

Всего вам доброго.

Юрий Широков, главный редактор

Журнал «Современная электроника»

Издаётся с 2004 года

Главный редактор Ю. В. Широков

Заместитель главного редактора А. В. Малыгин

Редакционная коллегия В. К. Жданкин, С. А. Сорокин,
Р. Х. Хакимов

Вёрстка М. Ю. Соколов

Распространение Ю. А. Фенчева (shop@cta.ru)

Реклама Н. А. Антипов +7 (968) 567-30-06 (antipov.n@cta.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: 117437, г. Москва,
Профсоюзная ул., 108

Тел.: (495) 232-00-87

shop@cta.ru • www.cta.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 «МЕДИАКОЛОР».

Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19,
бизнес-центр Вздан.

Тел./факс: (499) 903-69-52

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, 2026

Мы в соцсетях





КВ Системы:
быть успешными –
значит превосходить
технологические тренды

Николай Калугин –
руководителем направления
по НТР, ООО «КВ Системы»

«Победа Эдисона над Теслой»? Почему постоянный ток снова становится технологией будущего

Что общего между беспроводной передачей энергии, современными ЦОД, зарядкой БПЛА и источниками питания нового поколения? Именно эти технологии сегодня определяют новые направления развития силовой электроники.

В новом видеоинтервью на канале СЭТА представитель компании «КВ Системы» Николай Калугин рассуждает о том, почему постоянный ток вновь выходит на первый план, какие преимущества он открывает, способны ли российские инженеры конкурировать с мировыми разработчиками и что сегодня поддерживает развитие отечественной электроники.

В интервью также обсуждаются беспроводная передача энергии, архитектура энергообеспечения ЦОД, экономика разработки, импортозамещение, масштабирование производства и перспективы российской силовой электроники.

Материал будет полезен разработчикам электронной аппаратуры, специалистам по силовой электронике, инженерам и руководителям высокотехнологичных предприятий, которым важно понимать, какие технологии будут определять развитие отрасли в ближайшие годы.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- 4 Сравнительный анализ точности расчёта копланарных линий передачи для СВЧ МИС: инструмент 2D ВЕМ-анализа SimPCB Lite и полноволновой 3D-симулятор Ansys HFSS**
Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин, Дмитрий Коломенский, Владислав Дворников
- 10 Импортозамещение Altium Designer. Опыт работы ОКБ «Аэрокосмические системы» с отечественной EDA-системой – САПР «Макс.EDA»**
Максим Петров
- 14 Быстрый синтез схемного решения GaAs СВЧ ИС ступенчатого аттенюатора с фазовой коррекцией в интеллектуальной программе 50ohm Tech Circuit Studio**
Александр Метель, Игорь Добуш, Алексей Калентьев, Андрей Сальников, Александр Горяинов
- 20 Автоматизация выпуска КД в Delta Design**
Анастасия Чекманова, Олег Сысоев
- 26 Проектирование печатных плат для индивидуальных разработчиков: возможности новой редакции САПР Delta Design**
Илья Скворцов

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

- 31 Программа для проверки контроллера ОВЕН**
Олег Вальпа
- 34 Вольтметр действующего и средневыпрямленного значений напряжений в звуковом диапазоне частот с цветным 1,3" TFT-дисплеем и батарейным питанием. Часть 1**
Алексей Кузьминов
- 44 Сопряжение контроллеров разных производителей по интерфейсу RS-485**
Олег Вальпа

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- 48 Инновационные технологии для повышения противопожарной надёжности АКБ и РЭА**
Андрей Кашкаров

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

- 54 Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности. Часть 2**
Алексей Галахов
- 58 К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Часть 5. Как были открыты плазмоны**
Виктор Алексеев

Сравнительный анализ точности расчёта копланарных линий передачи для СВЧ МИС: инструмент 2D ВЕМ-анализа SimPCB Lite и полноволновой 3D-симулятор Ansys HFSS

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин,
Дмитрий Коломенский, Владислав Дворников

В статье представлены результаты сравнительного исследования точности расчёта электрофизических характеристик копланарной линии передачи (CPW) на подложке арсенида галлия (GaAs) с использованием двух инструментов численного анализа: быстрого 2D-решателя на основе метода граничных элементов (BEM) – SimPCB Lite – и полноволнового 3D-симулятора Ansys HFSS, реализующего метод конечных элементов (МКЭ). Сравнение выполнено в диапазоне частот от 1 до 50 ГГц. Показано, что расхождение по волновому сопротивлению не превышает 0,89% во всём рассматриваемом диапазоне, тогда как отклонение по потерям на 50 ГГц составляет не более 0,05 дБ на отрезке линии длиной 2 мм. Установлена граница надёжного применения квазистатического ВЕМ-подхода при проектировании СВЧ МИС и сформулированы практические рекомендации по выбору инструмента в зависимости от этапа проектирования и рабочего диапазона частот.

Введение

Проектирование монолитных интегральных схем (МИС) для СВЧ-диапазона предполагает обязательный расчёт линий передачи на начальном этапе синтеза топологии. При этом инженер традиционно сталкивается с компромиссом между скоростью получения результата и его

точностью. Быстрые квазистатические калькуляторы, использующие аналитические или полуаналитические модели, обеспечивают результат за секунды, однако их применимость при высоких частотах ограничена принятыми упрощениями. Полноволновые 3D-симуляторы, такие как Ansys HFSS, обеспечивают высокую

точность за счёт численного решения уравнений Максвелла в полном объёме, но требуют значительных вычислительных ресурсов и времени.

Настоящая работа посвящена количественной оценке расхождения результатов, получаемых в системе инженерного анализа SimPCB Lite (2D-решатель на основе метода граничных элементов, ВЕМ) и полноволновом 3D-симуляторе Ansys HFSS (метод конечных элементов, МКЭ) применительно к расчёту копланарной линии передачи на подложке GaAs в диапазоне 1–50 ГГц. Цель исследования – определить границы применимости квазистатического ВЕМ-подхода на этапе первичного синтеза топологии СВЧ МИС.

Описание модели и материалов

В качестве объекта исследования выбрана копланарная линия передачи (Coplanar Waveguide, CPW) без экранирующей земляной плоско-

Настройки

Объект расчёта: Линия передачи

Тип линии передачи: Копланарная одиночная

Тип расчёта: Частотный анализ

Расчётный параметр: S-параметры

КМ-1Н

Толщина диэлектрика

H1: 0,1 мм

Диэлектрическая проницаемость

Er1: 12,9

Ширина проводника

W1: 0,065 мм

W2: 0,065 мм

Расстояние от проводника до опорной плоскости

D1: 0,045 мм

Толщина проводника

T1: 0,002 мм

Шероховатость

Учитывать в расчёте: ☐

а, Радиус узла неровности: 0,75 мкм

N, Количество узлов на ячейку: 32

AI, Площадь ячейки: 0,0001 мм²

Дополнительные параметры

ТС, Электропроводность: 45 МСм/м

tgδ, Тангенс угла диэлектрик...: 0,0006

LTL, Длина проводника: 2 мм

TR, Фронт сигнала: 333,3333 пс

FREQ, Частота: Мин, 1 ГГц, Макс, ... X

Сопротивление

ZS, Источник: 50 Ом

ZL, Приемник: 50 Ом

Рис. 1. Интерфейс SimPCB Lite: ввод геометрических и материальных параметров CPW-структуры

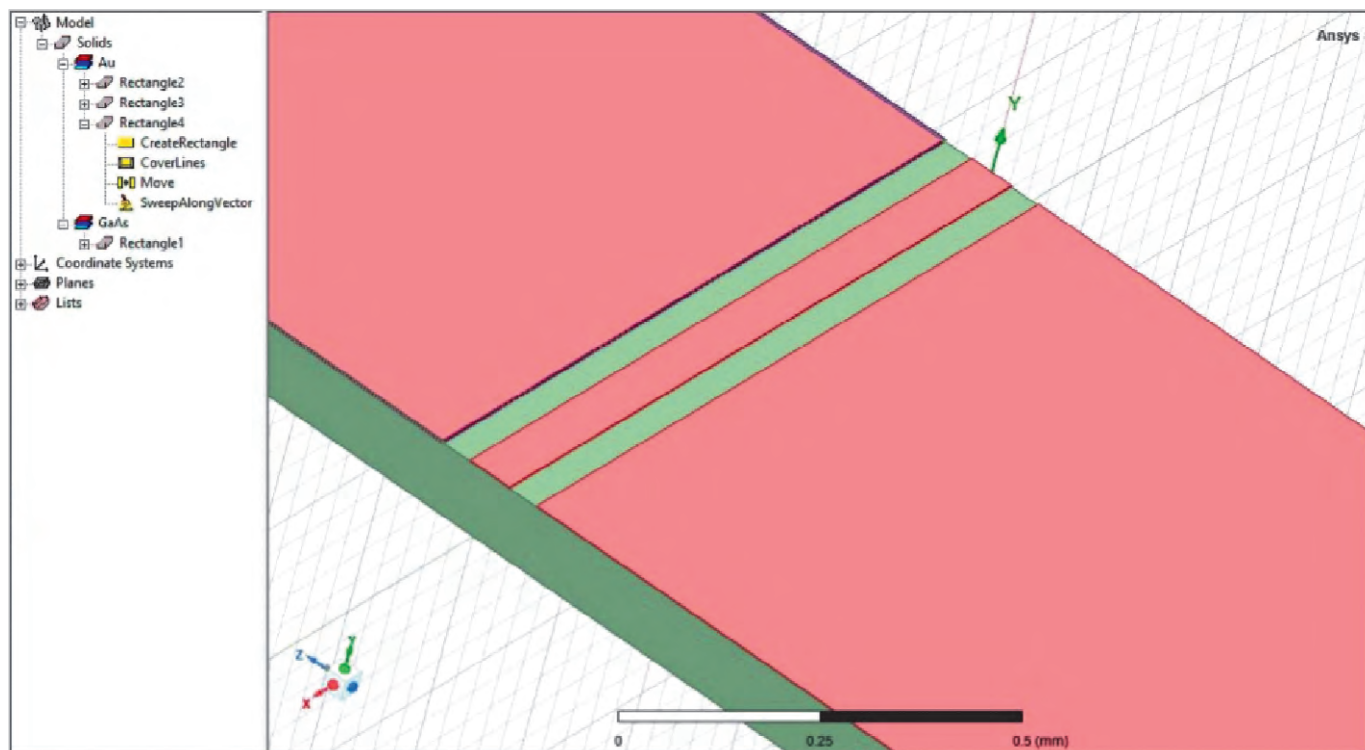


Рис. 2. Трёхмерная модель CPW-структуры в Ansys HFSS с заданными портами Wave Port

сти снизу (без нижней металлизации, так называемый CPW with No Bottom Ground Plane). Данная конфигурация является типовой для СВЧ МИС на подложках из полупроводниковых материалов. Параметры модели приведены в табл. 1.

Высокое значение относительной диэлектрической проницаемости GaAs ($\epsilon_r \approx 12,9$) обуславливает повышенную концентрацию электромагнитного поля в подложке и усиливает частотную дисперсию

Таблица 1. Параметры исследуемой CPW-структуры

Параметр	Значение
Тип линии	CPW (без экранной земли снизу)
Подложка	GaAs, $\epsilon_r = 12,9$; $\tan \delta = 0,0006$
Толщина подложки (H)	100 мкм
Металлизация	Au, $\sigma = 45 \text{ МСм/м}$
Толщина металла (T)	2 мкм
Ширина центрального проводника (W)	65 мкм
Зазор до опорной плоскости (G)	45 мкм
Длина проводника (L)	2 мм
Целевое волновое сопротивление	50 Ом
Частотный диапазон	1–50 ГГц

эффективной диэлектрической проницаемости, что представляет дополнительный интерес с точки зрения проверки точности квазистатических методов [1].

Методика моделирования

Расчёт в SimPCB Lite

В системе SimPCB Lite выбран тип линии Coplanar Waveguide; параметры материалов и геометрии заданы в соответствии с табл. 1. Частотный анализ проводился в диапазоне 1–50 ГГц. Для расчёта электрических характеристик CPW SimPCB Lite применяет метод граничных элементов (ВЕМ) (рис. 1). В отличие от объёмного разбиения сетки, характерного для МКЭ, ВЕМ оперирует исключительно на границах раздела сред: поверхностях проводников (сигнального проводника и заземляющих полосков) и на граничной поверхности раздела металлизация – GaAs – воздух. Задача Лапласа для электрического потенциала сводится к поверхностному интегральному уравнению; дискретизация объёма диэлектрика при этом не производится [2].

Данный подход обеспечивает высокую скорость расчёта (менее нескольких секунд), что принципиально важно при параметрической оптимизации. Вместе с тем квазистатическая природа метода накладывает

ограничения на точность при высоких частотах, когда длина волны в диэлектрике становится сопоставимой с поперечными размерами структуры.

Расчёт в Ansys HFSS

В Ansys HFSS построена трёхмерная модель отрезка линии, геометрически идентичная структуре, заданной в SimPCB Lite. Возбуждение осуществляется через Wave Port на торцевых гранях модели. Частотный анализ выполнен в диапазоне 1–50 ГГц с адаптивным уточнением сетки МКЭ. Полное время расчёта, включая построение и сходимость сетки, составило 5–10 минут. Результаты, полученные в HFSS, приняты в качестве эталонных для данного сравнительного анализа (рис. 2).

Результаты и сравнение

Волновое сопротивление

В табл. 2 и на рис. 3 представлено сравнение значений волнового сопротивления Z_0 , рассчитанных в SimPCB Lite и Ansys HFSS в зависимости от частоты.

SimPCB Lite демонстрирует высокую точность расчёта волнового сопротивления. Максимальное отклонение не превышает 0,89% (0,45 Ом) на частоте 50 ГГц. Характерно, что систематическое смещение $\sim 0,4 \text{ Ом}$

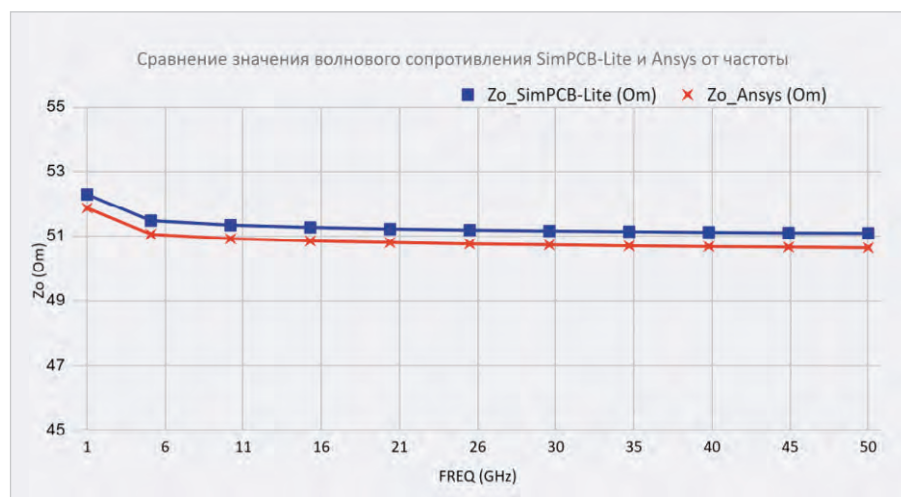


Рис. 3. Зависимость волнового сопротивления Z_0 от частоты: SimPCB Lite и Ansys HFSS

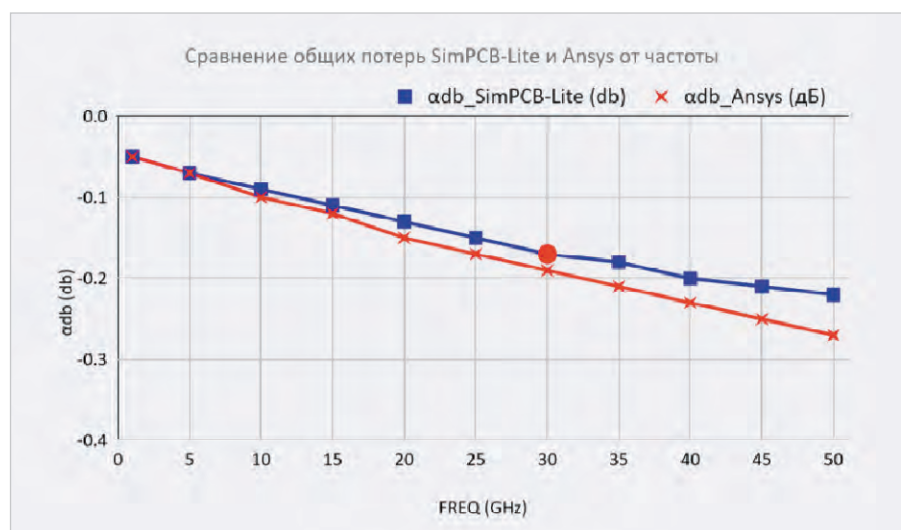


Рис. 4. Зависимость общих потерь adB от частоты: SimPCB Lite и Ansys HFSS

Таблица 2. Сравнение значений волнового сопротивления Z_0

FREQ (ГГц)	Zo_SimPCB Lite (Om)	Zo_Ansys (Om)	Отклонение (Om)	Отклонение (%)
1	52,29	51,87	0,42	0,81
5	51,48	51,06	0,42	0,82
10	51,34	50,92	0,42	0,82
15	51,27	50,85	0,42	0,83
20	51,22	50,8	0,42	0,83
25	51,19	50,76	0,43	0,85
30	51,16	50,73	0,43	0,85
35	51,14	50,7	0,44	0,87
40	51,12	50,68	0,44	0,87
45	51,1	50,66	0,44	0,87
50	51,09	50,64	0,45	0,89
Макс. откл-е			0,45	0,89

Таблица 3. Сравнение общих потерь в линии adB

FREQ (ГГц)	adb_SimPCB Lite (дБ)	adb_Ansys (дБ)	Отклонение (дБ)	Отклонение (%)
1	-0,05	-0,05	0,00	0,00
5	-0,07	-0,07	0,00	0,00
10	-0,09	-0,1	0,01	-10,00
15	-0,11	-0,12	0,01	-8,33
20	-0,13	-0,15	0,02	-13,33
25	-0,15	-0,17	0,02	-11,76
30	-0,17	-0,19	0,02	-10,53
35	-0,18	-0,21	0,03	-14,29
40	-0,2	-0,23	0,03	-13,04
45	-0,21	-0,25	0,04	-16,00
50	-0,22	-0,27	0,05	-18,52
Макс. откл-е			0,05	18,52

сохраняется практически неизменным во всём частотном диапазоне. Данное обстоятельство свидетельствует о наличии небольшого постоянного расхождения в расчётном значении эффективной диэлектрической проницаемости ϵ_{eff} , а не о деградации численного метода с ростом частоты.

Для задачи первичного синтеза топологии – подбора ширины центрального проводника W и зазора G под целевой импеданс – такой уровень точности является достаточным. Применение SimPCB Lite на данном этапе не требует верификации в Ansys HFSS.

Потери в линии

Результаты сравнения общих потерь (погонного коэффициента затухания adB) приведены в табл. 3 и на рис. 4.

Наблюдается систематическое занижение потерь в SimPCB Lite по сравнению с результатами HFSS, нарастающее с ростом частоты. На частоте 50 ГГц относительное расхождение достигает 18%, однако в абсолютных единицах отклонение составляет лишь 0,05 дБ на отрезке линии длиной 2 мм, что соизмеримо с погрешностью измерения реального устройства.

Физическая причина занижения потерь в ВЕМ-подходе связана с упрощённым учётом скин-эффекта в тонком ($T = 2$ мкм) золотом проводнике и краевых токовых эффектах в области зазора. При частотах выше ~25 ГГц глубина скин-слоя в золоте становится значительно меньше толщины металлизации, и пространственное перераспределение тока по периметру сечения проводника оказывает существенное влияние на активные потери. В Ansys HFSS эти эффекты обрабатываются численно через адаптивную трёхмерную сетку на поверхности металла.

Для большинства задач первичного синтеза такая точность является приемлемой. Тем не менее при проектировании устройств с жёсткими требованиями к вносимым потерям (маломощные усилители, полосовые фильтры с высокой добротностью) на частотах свыше 25–30 ГГц использование только SimPCB Lite недостаточно – требуется верификация в полномолновом симуляторе.

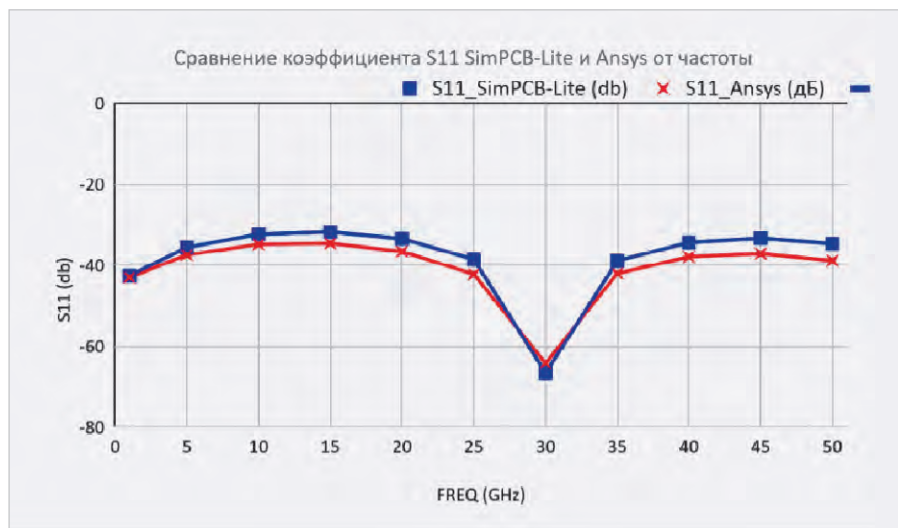


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения S_{11} от частоты: SimPCB Lite и Ansys HFSS

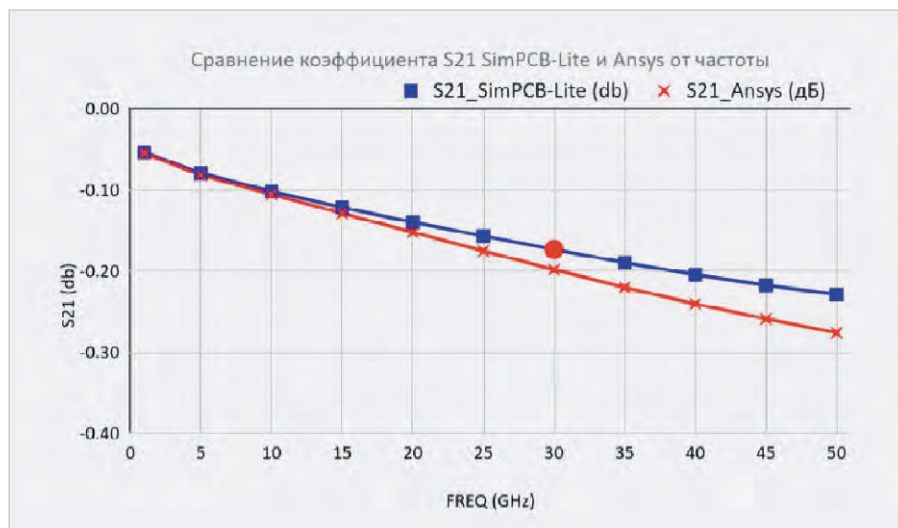


Рис. 6. Зависимость коэффициента передачи S_{21} от частоты: SimPCB Lite и Ansys HFSS

Таблица 4. Сравнение коэффициента отражения S_{11}

FREQ (ГГц)	S11_SimPCB_Lite (дБ)	S11_Ansys (дБ)	Отклонение (дБ)	Отклонение (%)
1	-42,49	-42,89	0,40	-0,92
5	-35,53	-37,37	1,84	-4,93
10	-32,24	-34,76	2,54	-7,24
15	-31,66	-34,53	2,87	-8,31
20	-33,37	-36,54	3,17	-8,68
25	-38,50	-42,12	3,62	-8,58
30	-66,44	-64,10	-2,34	3,65
35	-38,84	-41,94	3,10	-7,39
40	-34,30	-37,84	3,54	-9,35
45	-33,22	-37,08	3,86	-10,41
50	-34,61	-38,82	4,22	-10,86
Макс. откл.			4,22	10,86

Таблица 5. Сравнение коэффициента передачи S_{21}

FREQ (ГГц)	S21_SimPCB_Lite (дБ)	S21_Ansys (дБ)	Отклонение (дБ)	Отклонение (%)
1	-0,05	-0,05	0,00	-2,37
5	-0,08	-0,08	0,00	-2,82
10	-0,10	-0,11	0,00	-3,74
15	-0,12	-0,13	0,01	-5,57
20	-0,14	-0,15	0,01	-8,05
25	-0,16	-0,18	0,02	-10,53
30	-0,17	-0,20	0,02	-12,49
35	-0,19	-0,22	0,03	-13,87
40	-0,20	-0,24	0,04	-14,95
45	-0,22	-0,26	0,04	-16,01
50	-0,23	-0,28	0,05	-17,11
Макс. откл.			0,05	17,11

Коэффициент отражения S_{11}

Сравнение рассчитанных значений S_{11} представлено в табл. 4 и на рис. 5.

Оба инструмента демонстрируют уровень S_{11} в диапазоне от -32 до -43 дБ, что соответствует хорошему согласованию линии с 50-омным трактом при расчётном импедансе ≈ 51 Ом. Относительное отклонение $\sim 10\%$ от значения в дБ, хотя и кажется значительным на первый взгляд, физически соответствует разнице ~ 4 дБ между уровнями, например, -34 и -38 дБ. На практике оба значения однозначно характеризуют структуру как хорошо согласованную, а качественный вывод обоих методов совпадает.

Локальный минимум $S_{11} \approx -66$ дБ в SimPCB Lite на частоте 30 ГГц (-64 дБ в HFSS) является следствием резонанса при длине линии $\approx \lambda/2$. Небольшой сдвиг резонансной частоты между двумя моделями объясняется различием в расчётном значении ϵ_{eff} , обусловленным описанным выше систематическим смещением. Данный артефакт воспроизводим и физически обоснован.

Коэффициент передачи S_{21}

Коэффициент передачи S_{21} , непосредственно отражающий вносимые потери, сравнивается в табл. 5 и на рис. 6.

Закономерность, наблюдаемая по S_{21} , аналогична результатам анализа потерь: SimPCB Lite систематически занижает вносимые потери с ростом частоты. Максимальное абсолютное отклонение на 50 ГГц составляет 0,05 дБ – значение, идентичное полученному при анализе погонных потерь. Оба метода описывают структуру качественно одинаково.

Анализ границ применимости и частотных ограничений

Точность квазистатического ВЕМ-подхода определяется соотношением поперечных размеров структуры и длины волны в диэлектрике λd . Для подложки GaAs ($\epsilon_r = 12,9$) толщиной 100 мкм можно выделить следующие частотные зоны.

● **До 30 ГГц:** отклонения по S-параметрам и потерям не превышают $\sim 10\%$, что приемлемо для задач первичного синтеза топологии. Применение SimPCB Lite без верификации в HFSS обосновано.

● **Свыше 30 ГГц:** начинает проявляться частотная дисперсия эффективной диэлектрической проницаемости $\epsilon_{eff}(f)$, которую 2D-квазистатическая модель учитывает приближённо. Результаты SimPCB Lite на данных частотах следует рассматривать как ориентировочные.

● **По волновому сопротивлению:** граница надёжного применения шире – погрешность не превышает 1% во всём диапазоне до 50 ГГц.

● **Геометрические ограничения:** при отношении $W/H > 5$ или зазорах $G < 10$ мкм точность расчёта ϵ_{eff} и Z_0 снижается – в таких случаях целесообразно сразу переходить к трёхмерному моделированию.

Следует также учитывать, что значение $\epsilon_r = 12,9$ является справочным для низких частот и постоянного тока. В диапазоне 40–60 ГГц реальное значение диэлектрической проницаемости GaAs составляет 12,4–12,5, что вносит дополнительный вклад в расхождение расчётных данных при экстраполяции на область миллиметровых волн.

Заключение

Проведённое сравнительное исследование показало, что инструмент SimPCB Lite на основе 2D BEM-решателя обеспечивает достаточную для практических задач точность расчёта электрических характеристик CPW-структур на подложке GaAs в диапазоне СВЧ. Основные результаты:

- по волновому сопротивлению Z_0 : погрешность не превышает 1% во всём диапазоне до 50 ГГц. Инструмент полностью пригоден для итерационного подбора геометрии CPW без верификации в HFSS;
- по потерям и S-параметрам: надёжная точность обеспечивается до ~25–30 ГГц (отклонение $\leq 10\%$). На частоте 50 ГГц абсолютное расхождение по α_{dB} и S_{21} составляет 0,05 дБ для отрезка линии длиной 2 мм;
- по скорости расчёта: SimPCB Lite обеспечивает принципиальное преимущество при параметрической оптимизации – расчёт занимает менее нескольких секунд против 5–10 минут в Ansys HFSS.

Рекомендуемый технологический маршрут: применение SimPCB Lite на этапе быстрого синтеза геометрии с последующей финальной верификацией в Ansys HFSS, особенно при работе выше 30 ГГц, наличии вертикальных переходов (via), многослойных подложек или жёстких требований к вносимым потерям. Для типовых задач (линии передачи, делители мощности, согласующие цепи в диапазоне до Ка-диапазона) инструмент обеспечивает достаточную точность при многократно меньших временных затратах.

Литература

1. A Review of Technologies and Design Techniques of Millimeter-Wave Power Amplifiers / V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D.P. Nguyen, H. Wang, A.-V. Pham // IEEE Trans. Microwave Theory Techn. 2020. Vol. 68, № 7. P. 2957–2983.
2. Ухин В.А., Коломенский Д.С., Кухарук В.С., Смирнова О.В. Методы расчёта волнового сопротивления линий передач на печатных платах // Современная электроника. 2023. № 9. С. 40–42. ©



**120-ВАТТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ
DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
С ПРЕДЕЛЬНЫМ УРОВНЕМ
РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ**



- Диапазон входного напряжения 20...50 В постоянного тока
- Выходные напряжения 3,3; 5; 6,3; 8; 9,5; 12; 15; 20; 28; ± 5 ; $\pm 9,5$; ± 12 ; ± 15 В
- КПД до 86%
- Обширный набор сервисных и защитных функций
- Стойкость к радиации: 100 крад (Si); 75 МэВ·см²/мг



ProChip
POWERED BY ProSoft

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

+7 (495) 232-52-22 • INFO@PROCHIP.RU • WWW.PROCHIP.RU



Регистрация



Зеленоградский
нанотехнологический
центр



ДИЗАЙН-ЦЕНТР

проектирования интегральных микросхем



Технологические услуги:

Проектирование:

- СБИС, преобразователей сигналов для датчиков физических величин, микроконтроллеров, систем цифровой обработки сигналов, сенсоров, DC/DC-преобразователей и линейных регуляторов напряжения
- Цифровых алгоритмов систем и блоков управления питанием
- Блоков сбора и обработки данных, управления и обработки информации
- Радиочастотных схем и блоков X-диапазона
- Микроконтроллеров и микропроцессоров DSP и общего применения

Проектирование систем-на-кристалле по ТЗ заказчика на основе верифицированных СФ-блоков собственной разработки:

- Стандартные интерфейсы (PCI, USB, Ethernet и т.п.)
- Цифро-аналоговые блоки (ЦАП, АЦП)
- Программируемые устройства
- Аналоговые СФ-блоки: операционные усилители, компараторы, источники опорного напряжения, линейные регуляторы напряжения

Услуги по интеграции в электронные изделия

технологии

БиКМОП
КМОП
МЭМС
Биполярная

нормы проектирования

от **12 нм**

Разработка
и производство ИС

Реклама

Импортозамещение Altium Designer. Опыт работы ОКБ «Аэрокосмические системы» с отечественной EDA-системой – САПР «Макс.EDA»

Максим Петров

В статье рассматривается практический опыт перехода предприятия – разработчика радиоэлектронной аппаратуры с зарубежной ECAD-системы Altium Designer на отечественную EDA-систему «Макс.EDA». На примере ОКБ «Аэрокосмические системы» показано, что импортозамещение инженерного ПО требует не только внедрения нового программного продукта, но и плановой миграции накопленной инженерной среды: проектных данных, компонентной базы, рабочих сценариев и внутренних методик проектирования. Описаны предпосылки разработки «Макс.EDA», использование реальных проектов предприятия при развитии системы, ход опытной эксплуатации, выполнение пробного проекта и формирование обратной связи для дальнейшего развития продукта.

Переход с зарубежных ECAD-систем как практическая задача предприятий радиоэлектронной отрасли

Вопрос импортозамещения инженерного программного обеспечения в области проектирования электронной аппаратуры давно вышел за рамки простой замены одного инструмента другим. За время работы инженерные отделы успевают сформировать собственную рабочую среду: проекты, библиотеки компонентов, шаблоны документации, правила оформления и выпуска данных. Однако вместе с этим появляется менее формализуемая, но очень важная часть процес-

са – собственная методика работы в конкретной системе проектирования. И такая среда создаётся годами! В ней накапливаются не только файлы и настройки, но и практический опыт предприятия: какие решения уже применялись в изделиях, какие подходы удобны инженерам, какие правила приняты внутри организации, какие данные нужны производству и как проект проходит путь от схемы до выпуска документации.

Для многих российских предприятий основным инструментом разработки печатных узлов долгое время были зарубежные EDA-системы, в том числе Altium Designer. После ухода зарубеж-

ных поставщиков с российского рынка дальнейшее развитие этой инфраструктуры оказалось ограничено: стало невозможно легально расширять количество рабочих мест, получать обновления, техническую поддержку, исправления ошибок и сопровождение со стороны разработчика ПО. При этом задачи проектирования никуда не исчезли – предприятия продолжают разрабатывать новые изделия, сопровождать ранее созданные проекты, выпускать документацию и готовить данные для производства.

В этих условиях переход на отечественные EDA-системы становится практической необходимостью. Предприятиям нужен инструмент, который позволит продолжить работу с печатными платами, сохранить накопленный инженерный опыт и обеспечить управляемый переход без резкого разрыва с действующими процессами. Именно поэтому импортозамещение EDA-системы нельзя свести просто к установке нового программного продукта: система должна быть проверена на реальных проектных данных, привычных сценариях работы и требованиях конкретного предприятия, иначе инженерный отдел формально получит новый инструмент, но не сможет полноценно использовать его в ежедневной проектной работе (рис. 1).

Предпосылки разработки системы «Макс.EDA»

Из этой практической задачи сформировался один из базовых принципов, заложенных при начале разработки «Макс.EDA»: нужно создать собственную систему, понятную инженерам, имеющим опыт работы в зарубежных EDA-системах, прежде всего, в Altium Designer. При переходе на новый инструмент пользователь не должен заново осваивать саму логику проектирования печатных плат, ему нужен отечественный продукт, в котором можно пройти знакомый марш-

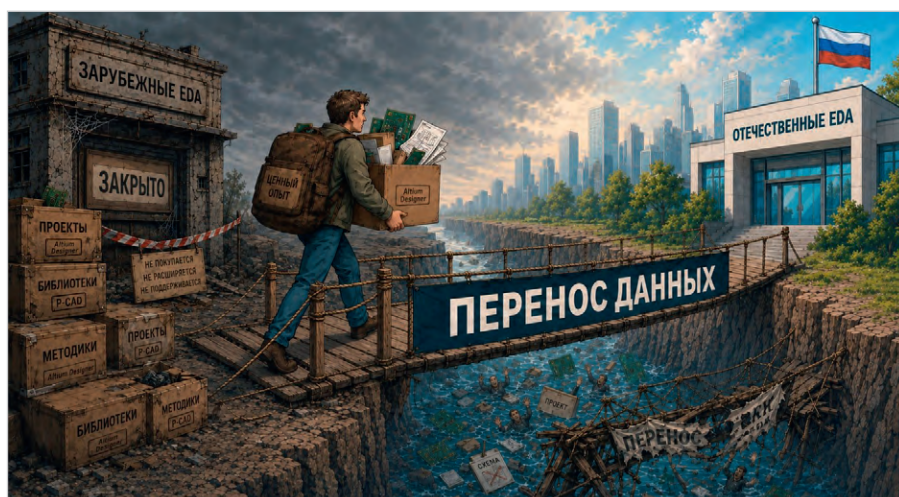


Рис. 1. Перенос наработок между системами практически всегда вызывает трудности



Рис. 2. Применимость различных инструментов компании «Цифровая Мануфактура» в рамках единой системы электрического проектирования

пут разработки, постепенно перенести данные и сохранить рабочую производительность.

Дополнительной предпосылкой стал накопленный опыт компании «Цифровая Мануфактура» в разработке инженерного программного обеспечения для промышленных задач. К таким решениям относятся САПР «Макс», применяемая для проектирования бортовых кабельных сетей, и ПК «Надёжность», предназначенный для расчёта показателей надёжности технических систем. Разработка «Макс.EDA» стала продолжением этого направления на уровне блоков и печатных плат, дополняя существующий контур инженерных решений компании. В результате формируется более целостный маршрут проектирования электроники: от уровня изделия, систем и шкафного проектирования до уровня печатных узлов с возможностью учитывать требования к конструкции, связям и надёжности на разных этапах разработки (рис. 2).

Первоначальный промышленный запрос на разработку подобной системы был сформирован со стороны ОКБ «Аэрокосмические системы», специализирующегося на разработке, интеграции и модернизации бортовых систем общесамолётного и радиоэлектронного оборудования летательных аппаратов. Благодаря этому запросу и плотной работе на начальных эта-

пах формирования требований «Макс.EDA» с самого начала рассматривалась как система для реальной инженерной работы, а не как изолированный редактор схем и плат.

При этом важно было не замкнуть продукт на одном предприятии или одном частном маршруте разработки. Опыт ОКБ «Аэрокосмические системы» используется как один из практических источников требований и проверочных сценариев, однако развитие «Макс.EDA» изначально ориентировано на более широкий круг промышленных пользователей. На сегодняшний день опытная эксплуатация системы ведётся на ряде предприятий, входящих в контур крупнейших российских корпораций, включая Роскосмос, Концерн ВКО «Алмаз-Антей», «Высокоточные комплексы», Росатом и другие организации. За счёт этого требования к продукту формируются не вокруг одного частного маршрута разработки, а на основе разных инженерных практик предприятий электронной промышленности.

Отдельную роль на этапе разработки сыграли примеры реальных проектов ОКБ «Аэрокосмические системы». Они использовались внутри «Цифровой Мануфактуры» как практический материал для проверки конкретных возможностей «Макс.EDA»: работы схемотехнического редактора, редактора печатных плат, механизмов импор-

та библиотек, обработки проектных данных и других ключевых функций системы.

Изначально часть сценариев имела технические ограничения, однако по мере развития продукта их становилось меньше: расширялись возможности редакторов, уточнялась логика работы с данными, дорабатывались механизмы переноса проектной информации. Наконец, команда разработки смогла не только воспроизвести аналогичный проект средствами «Макс.EDA», но и импортировать его так, чтобы с ним можно было работать как с проектом, изначально созданным в отечественной системе (рис. 3).

Следующим этапом стала опытная эксплуатация в ОКБ «Аэрокосмические системы». Это позволило передать систему самим инженерам предприятия и проверить её уже не во внутреннем контуре разработки, а на новых практических задачах.

Опытная эксплуатация в ОКБ «Аэрокосмические системы»

Опытная эксплуатация «Макс.EDA» в ОКБ «Аэрокосмические системы» включала в себя договорённость о том, что инженеры предприятия будут использовать САПР в прикладных задачах и фиксировать возникающие вопросы, замечания и пожелания по работе системы. Перед началом

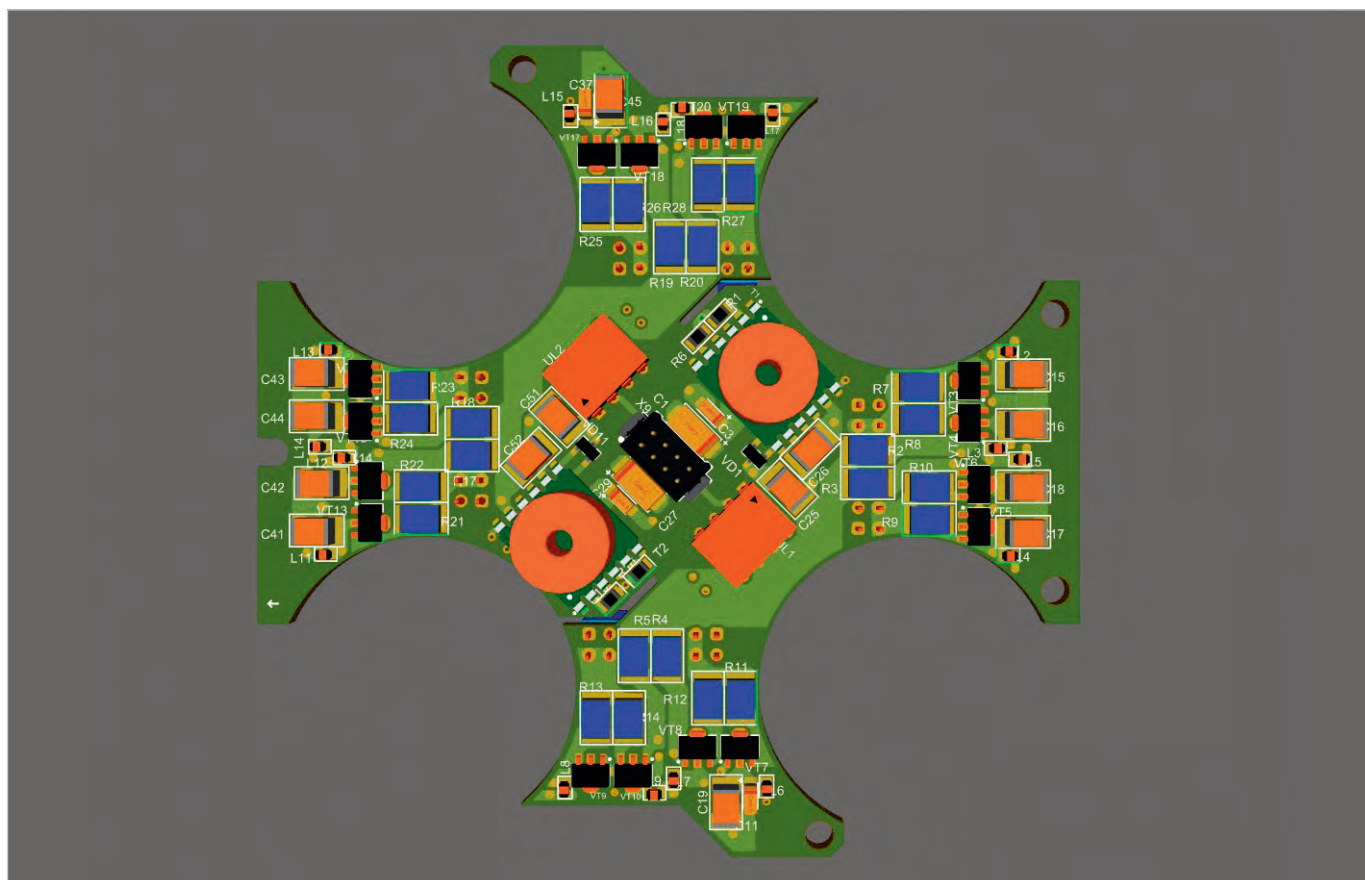


Рис. 3. Пример проекта ОКБ «Аэрокосмические системы», импортированного в САПР «Макс.EDA»

самостоятельной работы было проведено обучение инженеров ОКБ, которое прошло достаточно легко – во многом благодаря тому, что при разработке «Макс.EDA» сохранялись знакомые для пользователей зарубежных EDA-систем принципы работы и часть привычных горячих клавиш. Для инженера это оказалось важно на уровне ежедневной практики: знакомое сочетание клавиш или близкая логика команды позволяют быстрее понять систему, даже если раньше он в ней не работал. Такой подход снижает порог входа и положительно влияет на первое восприятие продукта.

После обучения специалисты предприятия приступили к самостоятельной работе в «Макс.EDA»: перенесли собственную компонентную базу, начали выполнять проектные задачи и проверять систему в рабочих сценариях. В рамках опытной эксплуатации инженерам ОКБ «Аэрокосмические системы» удалось выполнить пробный проект и пройти полный цикл разработки в отечественной системе: подготовить схему на 12 листах, спроектировать 4-слойную печатную плату, выполнить компоновку и трассировку, а затем сформировать комплект выходных файлов. Для текущего эта-

па это важный результат, поскольку система проверялась на связном проектном маршруте предприятия: от схемы и печатной платы до производственных данных.

Процесс не был идеальным, что ожидаемо для этапа опытной эксплуатации первых версий продукта. Возникли вопросы по переносу данных, отличиям в логике отдельных операций, поведению инструментов и недостающим возможностям. Команда «Цифровой Мануфактуры» оставалась на связи, помогала разбирать возникающие ситуации и оперативно отвечала на вопросы инженеров.

По итогам работы был сформирован перечень дополнений и пожеланий, полученных из реального рабочего цикла. Значительная часть этих пунктов уже реализована, часть запланирована к выпуску в ближайших версиях продукта или находится на дополнительной проработке, если требуется уточнить пользовательскую логику или выбрать оптимальный вариант реализации. Регулярный релизный цикл «Макс.EDA» с выпуском обновлений раз в три месяца позволяет достаточно быстро учитывать такие запросы и переводить их из общего обсуждения в конкретные задачи развития.

На текущем этапе работа в ОКБ продолжается параллельно в двух системах: в «Макс.EDA» выполняются новые проектные задачи, а Altium Designer используется для проектов, разработка которых уже была начата ранее. Такой подход позволяет не переносить незавершенные разработки в новую среду принудительно и не создавать рисков для текущих сроков, что тоже ожидаемо для планового перехода. Также опытная эксплуатация позволяет определить, какие сценарии уже могут целиком выполняться в отечественной системе, какие требуют доработки и при каких условиях можно расширять её применение без остановки текущих разработок.

Для ОКБ «Аэрокосмические системы» такой формат даёт возможность оценить «Макс.EDA» в реальной инженерной работе и понять его применимость под текущие задачи. Для нас, как разработчиков продукта, – получить прикладную обратную связь от инженеров и точнее определить приоритеты дальнейшего развития системы.

Импортозамещение ECAD как инженерный процесс

Описанный опыт показывает принципиальную разницу между внутрен-

ней проверкой продукта в рамках тестирования и опытной эксплуатации у промышленного пользователя. Внутри команды разработки можно проверить корректность отдельных функций, импорт данных или работу конкретного инструмента, или же попробовать сделать новую или повторить уже существующую печатную плату. Однако только работа инженеров предприятия со всеми своими нюансами показывает, насколько система применима в реальном проектом процессе: можно ли выполнить в ней реальную задачу с реальными сроками, получить пригодный результат и встроить его в существующий маршрут разработки. Для предприятия с действующими проектами такой переход не может быть одномоментным. В работе одновременно находятся изделия на разных стадиях готовности: часть проектов только начинается, часть проходит выпуск документации, часть уже связана с производством или сопровождением ранее разработанных изделий. Поэтому расширение применения отечественной ECAD-системы должно происходить планомерно, по мере подтверждения готовности отдельных сценариев и устранения ограничений, выявленных в ходе практической работы.

В этом смысле опытная эксплуатация становится полноценным рабочим механизмом подготовки к промышленному применению, так как она позволяет определить и фактически проверить, какие задачи уже могут выполняться в «Макс.EDA», какие сценарии требуют доработки, а какие особенности связаны с внутренней методикой конкретного предприятия. Такой разбор важен как для пользователя, так и для разработчика: предприятие получает понятные условия дальнейшего перехода, а команда продукта – приоритеты развития.

Для «Макс.EDA» опыт ОКБ «Аэрокосмические системы» является одним из практических контуров проверки системы на зрелость. Он помогает оценить, насколько реализованная функциональность соответствует ожиданиям промышленных пользователей и какие направления развития действительно важны для перехода от опытной к промышленной эксплуатации. При этом развитие продукта не замыкается на одном заказчике: требования и замечания, полученные в ОКБ АКС, рассматриваются как практический матери-

ал для развития кросс-индустриальной EDA-системы, применимой для широкого круга предприятий-разработчиков электроники. Именно такой подход позволяет использовать опыт конкретного предприятия без превращения продукта в частное решение под один маршрут разработки.

Заключение

Опыт ОКБ «Аэрокосмические системы» показывает, что импортозамещение EDA-системы требует плановой инженерной миграции, в которой важно сохранить накопленные данные, привычные рабочие сценарии и непрерывность текущих разработок. В такой задаче недостаточно оценить наличие отдельных функций: система должна пройти проверку на связанном проектном маршруте и показать, что инженер может получить результат, пригодный для дальнейшей работы. В рамках опытной эксплуатации «Макс.EDA» была проверена именно в таком формате: инженеры предприятия прошли обучение, перенесли собственную компонентную базу, выполнили пробный проект с разработкой схемы, печатной платы, компоновкой, трассировкой и формированием выходных файлов, что позволило оценить систему в условиях, приближенных к реальной проектной работе. При этом пока что сохраняется параллельная работа в двух системах проектирования, но инженеры отмечают, что большинство рабочих сценариев уже выполняется в «Макс.EDA». Такой подход позволяет расширять применение отечественной системы постепенно, без остановки действующих проектов и без искусственного форсирования перехода.

Отдельно специалистами ОКБ «Аэрокосмические системы», а также специалистами других организаций, где сейчас идут пилотные проекты, положительно отмечается подход к формированию единой среды электрического проектирования (ЕСЭП), предлагаемой «Цифровой Мануфактурой». В рамках контура ЕСЭП САПР «Макс.EDA» применяется не просто как отдельный инструмент проектирования печатных плат, а как часть сквозного проектирования изделия, систем, блоков и печатных узлов.

Особенно важным направлением становится проектирование печатных плат под заданные требования надёжности. В связке «Макс.EDA» и ПК

«Надёжность» расчёт всегда опирается на актуальную цифровую модель EDA-проекта: состав изделия, применённые ЭРИ, их параметры и связи. При размещении компонента в «Макс.EDA» используется не только его EDA-представление, но и связанная инженерная информация, включая параметры для расчётов надёжности и отказобезопасности, за счёт чего требования по надёжности обеспечиваются с первых этапов разработки, что снижает необходимость внесения изменений при проектировании печатной платы. В случае изменения состава изделия или замене компонента связанные данные также могут синхронизироваться с ПК «Надёжность», снижая риск расхождений между проектом печатной платы и его расчётом.

Дальнейшее развитие продукта должно идти в той же логике: через проверку на практических задачах, классификацию замечаний, доработку критичных сценариев и постепенное расширение области применения. Такой маршрут позволяет рассматривать «Макс.EDA» как универсальную отечественную EDA-систему, способную закрывать задачи проектирования печатных узлов для широкого круга предприятий радиоэлектроники. При этом развитие отечественного инженерного ПО невозможно без активного участия самих предприятий. Чем раньше промышленные пользователи включаются в опытную эксплуатацию, тестирование и формирование требований, тем быстрее продукт проходит путь от базовой функциональности к зрелому рабочему инструменту. Активное участие будущих пользователей ускоряет этот процесс: требования к промышленной EDA-системе формируются на реальных задачах, реальных данных и реальных ограничениях проектирования – именно такой формат взаимодействия между разработчиком и промышленными пользователями позволяет создавать отечественную инженерную среду, пригодную для реального применения в радиоэлектронной отрасли.



Цифровая мануфактура.
Главная страница



Цифровая мануфактура.
Мероприятия



Быстрый синтез схемного решения GaAs СВЧ ИС ступенчатого аттенюатора с фазовой коррекцией в интеллектуальной программе 50ohm Tech Circuit Studio

Александр Метель, Игорь Добуш, Алексей Калентьев,
Андрей Сальников, Александр Горяинов
(50ohm Technologies, info@50ohm.tech)

Применение методов искусственного интеллекта (ИИ) – перспективная стратегия для ускорения разработки СВЧ интегральных схем (ИС). В статье демонстрируется работа интеллектуальной программы 50ohm Tech Circuit Studio – она позволяет за считанные минуты синтезировать схемное решение СВЧ ИС одноразрядного ступенчатого аттенюатора с фазовой коррекцией по комплексу требований к электрическим характеристикам на технологическом процессе 0,25 мкм GaAs pHEMT (АО «Светлана-Рост»). Статья подготовлена при реализации проекта №23-91-06401 за счет средств гранта РНФ и АО «Светлана-Рост».

Введение

СВЧ интегральные схемы (ИС) на основе АЗВ5-материалов (GaAs, GaN, InP) широко применяются для построения радиочастотных трактов приёмопередающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решёток (АФАР). Процесс разработки СВЧ ИС для ППМ АФАР является итерационным, включает множество этапов и требует колоссальных трудозатрат команды высококвалифицированных разработчиков. По экспертным оценкам, среднее время проектирования однофункциональной СВЧ ИС составляет 2–4 месяца и распределяется примерно поровну на разработку схемного и топологического решения.

Многообещающей стратегией для повышения производительности труда и сокращения сроков разработки СВЧ ИС является применение методов искусственного интеллекта (ИИ) [1].

К середине 2020-х годов появились первые программные продукты [2–5], позволяющие по комплексу требований к электрическим характеристикам осуществить генерацию (синтез) схемного и/или топологического решения СВЧ ИС на заданном технологическом процессе.

В настоящей статье представлен пошаговый пример разработки СВЧ ИС одноразрядного ступенчатого аттенюатора (СА) с фазовой коррекцией на отечественном технологическом процессе 0,25 мкм GaAs pHEMT (АО «Светлана-Рост», г. Санкт-Петербург). Синтез схемного решения по комплексу требований к электрическим характеристикам реализуется в интеллектуальной программе 50ohm Tech Circuit Studio [5] и позволяет сократить длительность данного этапа проектирования с нескольких дней до нескольких часов/минут.

В результате синтеза программа предлагает множество подходящих под заданные требования схемных решений, отличных по структуре и параметрам, которые инженер-разработчик может проанализировать и выбрать наиболее перспективные для дальнейшей реализации в топологии.

Постановка задачи

Разработка СВЧ ИС одноразрядного СА с фазовой коррекцией представляет собой многокритериальную задачу, в рамках которой требуется одновременно обеспечить комплекс требований к электрическим характеристикам (уровни вносимого ослабления и коэффициента передачи в опорном состоянии ($|S_{21}|_{\text{опорн}}$), коэффициенты отражения по входу ($|S_{11}|$) и выходу ($|S_{22}|$), допустимые ошибки по ослаблению и фазе) в широком диапазоне частот на заданном технологическом процессе. Дополнительную сложность представляет многообразие возможных схемных решений данного класса устройств, отличающихся структурой, количеством коммутационных элементов (КЭ) и способами компенсации фазовой ошибки между опорным состоянием и состоянием ослабления.

В качестве примера рассмотрим разработку СВЧ ИС одноразрядного СА с фазовой коррекцией и вносимым ослаблением 16 дБ на основе 0,25 мкм GaAs pHEMT (АО «Светлана-Рост»).

Синтез схемного решения: требования и ограничения

В табл. 1 приведены требования к основным характеристикам СВЧ ИС СА, при этом высокие значения для коэффициентов отражения обусловлены возможностью последующей интеграции разряда 16 дБ в состав многоразрядного СА. Это позволит уменьшить

Таблица 1. Требования и характеристики СВЧ ИС СА 16 дБ

	Требования	Решение 1	Решение 2	Решение 3	Решение 4	Решение 5
Δf , ГГц	0,5–20	0,5–20	0,5–20	0,5–20	0,5–20	0,5–20
$ S_{21} _{\text{опорн}}$, дБ	$> -2,5$	-1,32	-1,48	-1,41	-1,35	-1,65
$ S_{11} $, дБ	< -20	-20,87	-20,40	-20,07	-20,64	-20,67
$ S_{22} $, дБ	< -20	-20,60	-20,40	-20,07	-20,64	-20,67
Ошибка ослабления, дБ	$\pm 0,15$	0,04	0,09	0,11	0,11	-0,09
Фазовая ошибка, град	± 5	12,55	4,45	4,21	4,32	1,93
$P_{\text{вх1дБ}}$, дБм	> 20	18,03	21,29	20,99	21,64	22,39

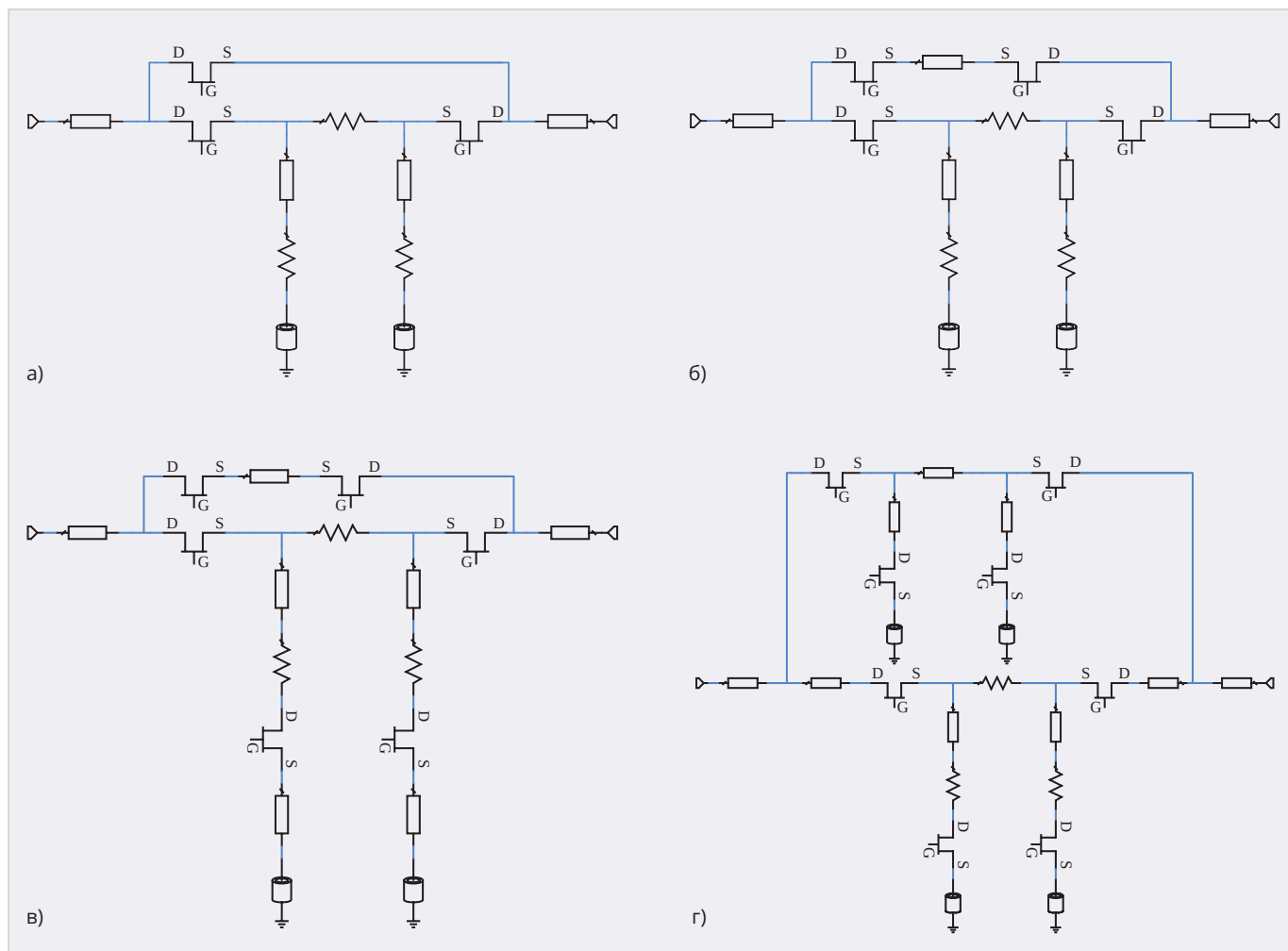


Рис. 1. Синтезированные схемы: а) решение 1; б) решение 2; в) решение 3; г) решение 4

взаимные переотражения при каскадировании разрядов, которые приводят к ухудшению амплитудно-фазовых характеристик аттенюатора в целом. В отличие от традиционного ручного проектирования, в котором инженер-разработчик последовательно анализирует ограниченное количество заранее известных схемных решений, используемый подход обеспечивает автоматическое исследование существенно более обширного пространства возможных структур за минимальное время.

Синтез схемного решения: анализ и обсуждение результатов

После задания исходных требований было выполнено несколько запусков процедуры синтеза. В результате работы программы 50ohm Tech Circuit Studio получено множество решений, которые отличаются электрическими характеристиками, количеством КЭ и сложностью структур для последующей топологической реализации. На рис. 1а–г приведены некоторые из синтезиро-

ванных схем, а в табл. 1 представлены их основные характеристики.

Решение 1 содержит 3 КЭ, отличается наименьшими вносимыми потерями, наиболее просто в последующей доработке и имеет минимальные габариты, но не удовлетворяет требованиям по фазовой ошибке и уровню входной мощности при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ ($P_{\text{вх1дБ}}$). Остальные решения обеспечивают выполнение всех требований, однако предполагают более сложные структуры и большее количество КЭ. Таким образом, результаты синтеза показали, что увеличение количества КЭ позволяет уменьшить фазовую ошибку, но приводит к усложнению схемы и потенциально к росту площади кристалла.

В некоторых случаях программа синтеза генерировала структуры с элементами, незначительно влияющими на характеристики устройства, например, короткими отрезками линий передачи. Такие элементы считались избыточными: они либо служили основанием для дополнительных ограничений

на структуру схемы, либо исключались на этапе подготовки топологии.

При выборе схемного решения учитывались не только электрические характеристики, но и факторы, влияющие на топологическую реализацию устройства: сложность трассировки и доработки топологии, а также ожидаемую устойчивость параметров после электромагнитного анализа (ЭМ-анализа). Некоторые решения, несмотря на удовлетворительные электрические характеристики, содержали структуры, неудобные для трассировки. Это могло привести к увеличению площади кристалла и росту паразитных связей. Из-за этого итоговые характеристики после разработки топологии и ЭМ-анализа могли существенно отличаться от результатов синтеза.

Таким образом, окончательный выбор схемного решения базировался не только на формальном соответствии установленным требованиям к электрическим характеристикам, но и на комплексной оценке практических факторов, влияющих на последующую реализацию устройства.

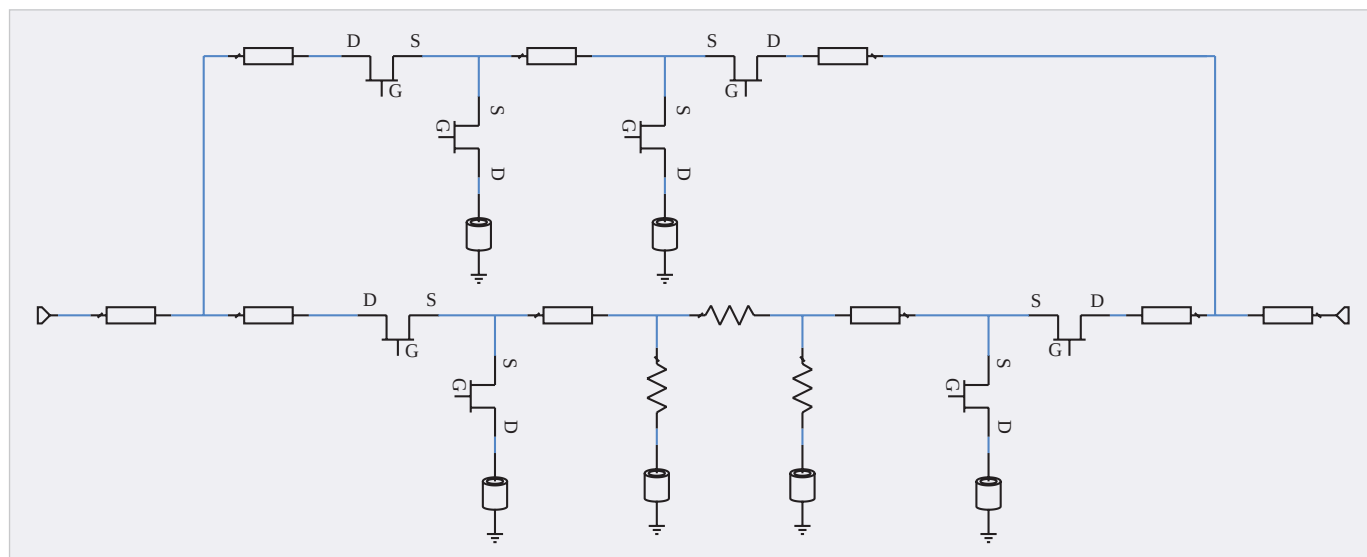


Рис. 2. Синтезированная схема (решение 5)

Синтез схемного решения: ужесточение требований

Одной из особенностей рассматриваемого подхода является возможность итеративного уточнения требований к устройству. По результатам анализа схемных решений, полученных при первых запусках программы синтеза, было принято решение ужесточить ряд требований для создания дополнительного запаса характеристик, в том числе: $|S_{21}|_{\text{опорн}}$ – не менее –2 дБ, ошибка ослабления – не более 0,1 дБ, фазовая ошибка – не более 2,5 град. Необходимость этого обусловлена возможным ухудшением параметров устройства после разработки топологии, ЭМ-анализа и изготовления.

Для получения более компактных решений были наложены дополнительные ограничения на диапазоны варьирования геометрических параметров элементов, участвующих в синтезе: ширина транзисторов от 25 мкм до 65 мкм, количество затворов от 2 до 6, ширина тонкоплёночных резисторов от 40 мкм до 80 мкм.

Следует отметить, что итеративное изменение требований и повторный запуск процедуры синтеза позволяют быстро получать новые схемные решения. По результатам нескольких запусков была выбрана схема (рис. 2), обеспечивающая наилучший компромисс между электрическими характеристиками (табл. 1, решение 5) и сложностью последующей топологической реализации.

В данной задаче один запуск программы синтеза в автоматическом режиме для 5000 итераций занимал менее 2 минут. Полный цикл анализа

линейных и нелинейных характеристик инженером-разработчиком всего множества решений, а также выбор итоговой схемы для дальнейшей реализации в топологии потребовали около 4 часов. На рис. 3б–е синей линией показаны частотные характеристики данного синтезированного решения.

Разработка топологии

На рис. 3а представлена разработанная топология СВЧ ИС СА 16 дБ. Для уменьшения габаритов кристалла были выполнены следующие действия: отрезки входной и выходной линии передачи свёрнуты в виде меандров; все заземляющие отверстия на стоках транзисторов объединены в одно. Наличие отрезков линий передачи упрощает интеграцию разряда 16 дБ в состав многоразрядного СА и обеспечивает большую гибкость компоновки, что дополнительно способствует уменьшению общих габаритов аттенуатора. На входе и выходе СА были добавлены контактные площадки и дополнительные отрезки линий передачи для выполнения процедуры L2L-деэмбеддинга.

Резисторы в цепях управления были расположены максимально близко к затворам транзисторов для снижения взаимовлияния СВЧ-тракта и тракта управления. Их размеры выбраны в соответствии с рекомендациями фабрики-изготовителя. Ввиду малых токов, протекающих по данным цепям, трассировка была выполнена в одном слое металлизации.

После завершения разработки топологии был выполнен 2,5D ЭМ-анализ, результаты которого показали необхо-

димость дополнительной коррекции длин отрезков линий передачи для сохранения соответствия с характеристиками схемного решения, полученного в программе 50ohm Tech Circuit Studio. Наибольшее влияние на изменение характеристик (увеличение фазовой ошибки) оказало объединение сквозных отверстий и возникновение паразитных связей в линиях передачи. Общее время разработки топологии, включая её коррекцию и проведение двухкратного ЭМ-анализа, составило менее 24 часов. На рис. 3б–е оранжевой линией показаны частотные характеристики ЭМ-анализа финальной топологии.

Изготовление и измерения

Топология СВЧ ИС одноразрядного СА с фазовой коррекцией была изготовлена по технологическому процессу 0,25 мкм GaAs pHEMT (АО «Светлана-Рост») и измерена на зондовой станции. На рис. 3б–е зелёной линией показаны измеренные частотные характеристики типового кристалла из выборки после L2L-деэмбеддинга.

Заключение

В статье представлен пошаговый пример разработки СВЧ ИС одноразрядного ступенчатого аттенуатора с фазовой коррекцией. Рассмотрены основные этапы: постановка задачи и уточнение требований, синтез и анализ схемных решений, разработка топологии, изготовление и измерения. Показано, что применение интеллектуальной программы 50ohm Tech Circuit Studio позволяет выполнить синтез схемного решения

Circuit Studio

50ohm Tech Circuit Studio – программная платформа для автоматизированного проектирования схемных решений, расширяемая модулями для синтеза целевых типов устройств:

- **LNA Designer** – синтез малошумящих усилителей (МШУ)
- **DSA Designer** – синтез секций ступенчатых аттенюаторов (СА)
- **DSP Designer** – синтез секций ступенчатых фазовращателей (СФ)
- **SW Designer** – синтез двухканальных коммутаторов

В чем отличие нашего решения?

Circuit Studio является САПР нового поколения, использующей методы искусственного интеллекта для поиска решения. Проектировщику необходимо задать требования к синтезируемому устройству, а программа сама найдет схемное решение под требуемый техпроцесс

1 Синтез структуры

Автоматическая генерация (синтез) структуры и параметров схемы СВЧ ИС на основе методов искусственного интеллекта позволяет получать рациональные, физически реализуемые схемные решения

2 Комплекс требований

Учет комплекса требований к электрическим характеристикам – коэффициенты передачи (усиления) и отражения по входу и выходу, коэффициенты шума и устойчивости. С помощью весов вы можете задать нужный компромисс для поиска оптимального решения

3 PDK фабрики

Синтез выполняется с использованием моделей элементов PDK фабрики. Вы получаете схему с элементами, для которых указаны значения их геометрических параметров

4 Множество решений

В результате синтеза программа предлагает множество решений, отличных по структуре и параметрам, подходящих под заданные требования

5 Быстрое моделирование

Алгоритм моделирования S-параметров и шумовых параметров разработан специально для структур МШУ, СА и СФ, что делает его быстрее, чем алгоритмы моделирования в традиционных САПР

6 Интеграция с САПР

Бесшовная интеграция с традиционными САПР СВЧ-устройств полного цикла проектирования позволит продолжить работу с полученными решениями в привычных для вас инструментах

Запишитесь на демо

Наши специалисты покажут вам, как ускорить процесс проектирования и улучшить качество получаемых решений:
info@50ohm.tech



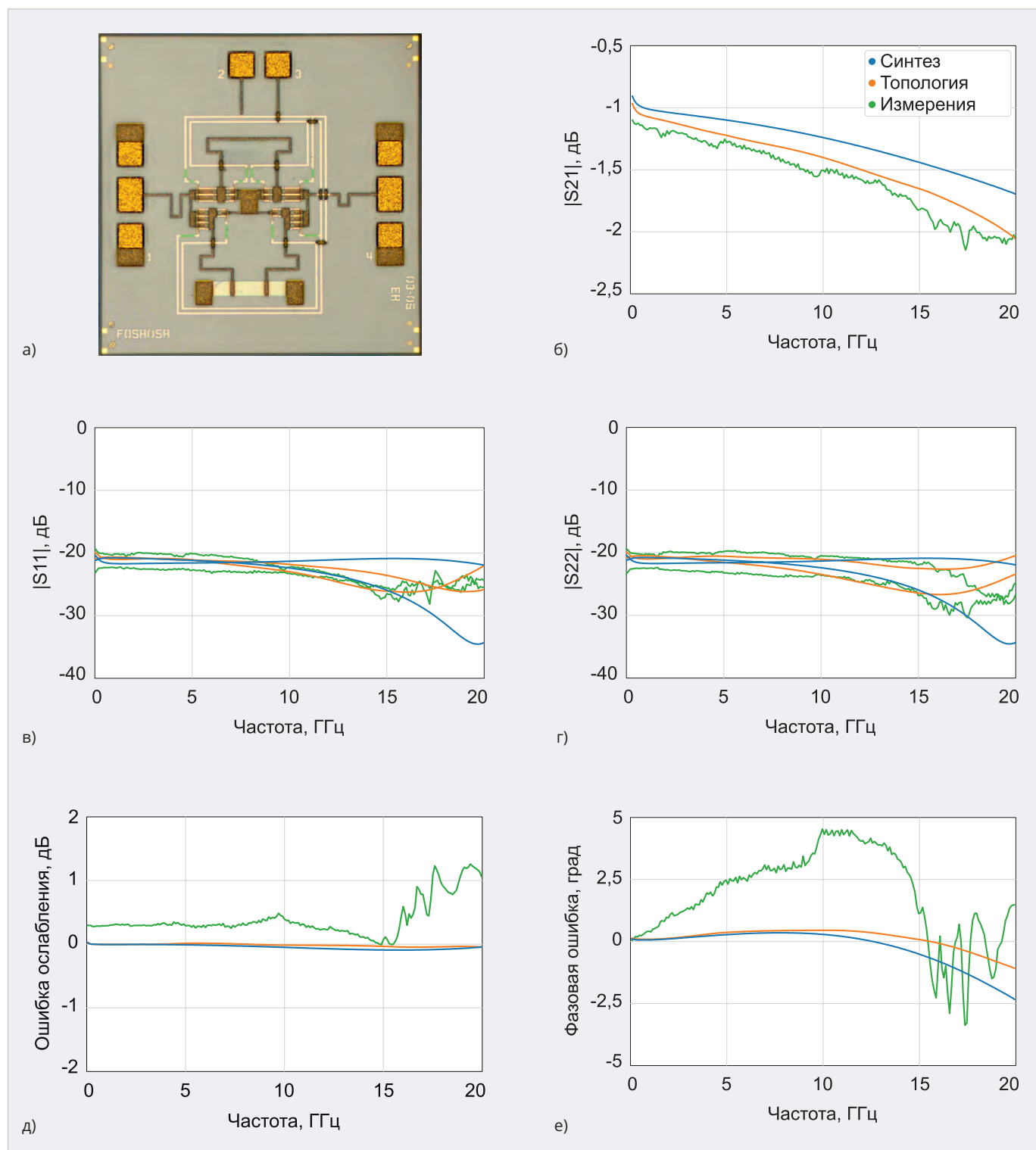


Рис. 3. СВЧ ИС СА 16 дБ: а) топология кристалла; б) $|S_{21}|_{\text{опорн}}$; в) $|S_{11}|$; г) $|S_{22}|$; д) ошибка ослабления; е) фазовая ошибка

одноразрядного ступенчатого аттенюатора за считанные минуты по комплексу требований к электрическим характеристикам на реальном технологическом процессе (0,25 мкм GaAs рНЕМТ, АО «Светлана-Рост»). Кроме того, программа предлагает множество схемных решений, отвечающих заданным требованиям и различающихся по структуре и параметрам, из которых инженер-разработчик может выбрать наиболее перспек-

тивные для реализации в топологии с обеспечением запаса по основным характеристикам.

Литература

1. Горяинов А.Е., Добуш И.М., Калентьев А.А. и др. 50ohm Tech Circuit Studio – платформа для автоматизированного проектирования схемных решений СВЧ интегральных схем с применением методов ИИ // Электроника СВЧ. 2025. № 2.

2. RapidRF [Электронный ресурс]. URL: <https://rapidrf.ai/> (дата обращения: 22.06.2026).
3. ZapRF [Электронный ресурс]. URL: <https://zaprf.com/> (дата обращения: 22.06.2026).
4. Gandalph.ai [Электронный ресурс]. URL: <https://gandalph.ai/> (дата обращения: 22.06.2026).
5. 50ohm Tech Circuit Studio [Электронный ресурс]. URL: <https://50ohm.tech/ru/circuit-studio> (дата обращения: 22.06.2026).



XXVI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА
**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА
& ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

ИСКУССТВЕННЫЙ
ИНТЕЛЛЕКТ
НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ
ПЕРЕДОВЫЕ АРХИТЕКТУРЫ
НОВЫЕ КОМПОНЕНТЫ
СУПЕРКОМПЬЮТЕРЫ

23-25
СЕНТЯБРЯ
2026

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
КВЦ ЭКСПОФОРУМ



СОЗДАВАЙТЕ НОВОЕ!

ОРГАНИЗАТОР:



Реклама

18+

Автоматизация выпуска КД в Delta Design

Анастасия Чекманова, Олег Сысоев

В статье рассматриваются преимущества автоматизации выпуска конструкторской документации (КД) в системе Delta Design. Описаны проблемы традиционного ручного формирования документации на печатный узел (ПУ), связанные с высокой трудоёмкостью процесса, необходимостью многократного выполнения однотипных операций и риском возникновения ошибок. Представлены функциональные возможности модуля КД, обеспечивающего автоматическое создание отчётов и графической документации в соответствии с требованиями ЕСКД. Рассмотрены механизмы генерации Перечня элементов, Ведомости покупных изделий, чертежа печатной платы, Спецификации на ПУ с учётом Исполнений ПУ, а также возможности их настройки и редактирования. Показано, что автоматизированный процесс разработки и единая проектная среда данных минимизируют риски рассогласования и сокращают трудоёмкость подготовки КД на 70–80%, что позволяет повысить качество проектирования и освободить инженерные ресурсы для решения задач более высокого уровня.

Введение

На любое изделие, в том числе и на Печатный узел (ПУ), необходимо изготовить комплект документации. Это

работа конструктора. Начинается она ещё при создании библиотеки компонентов: при разработке посадочного места и выбора способа монтажа

и установки компонента. Первично на данный процесс влияет техническое задание и определение габаритов и конструкции печатного узла для совмещения с основным устройством.

Но вот наша электронная версия проекта готова, и приходит черёд разработки на него комплекта конструкторской документации (КД). И тут конструктор начинает компоновать данные в отчёты, причём в разные отчёты данные компонуются по разным правилам. Перечень элементов (ПЭЗ), Ведомость покупных изделий (ВП), Спецификация на многослойную печатную плату (МПП), Спецификация на сборочные единицы и, наконец, главный документ – спецификация на ПУ – все они в соответствии с ГОСТ имеют разные способы представления данных, поскольку служат для разных целей. Конечно, вероятность допустить механическую ошибку в этой работе велика.

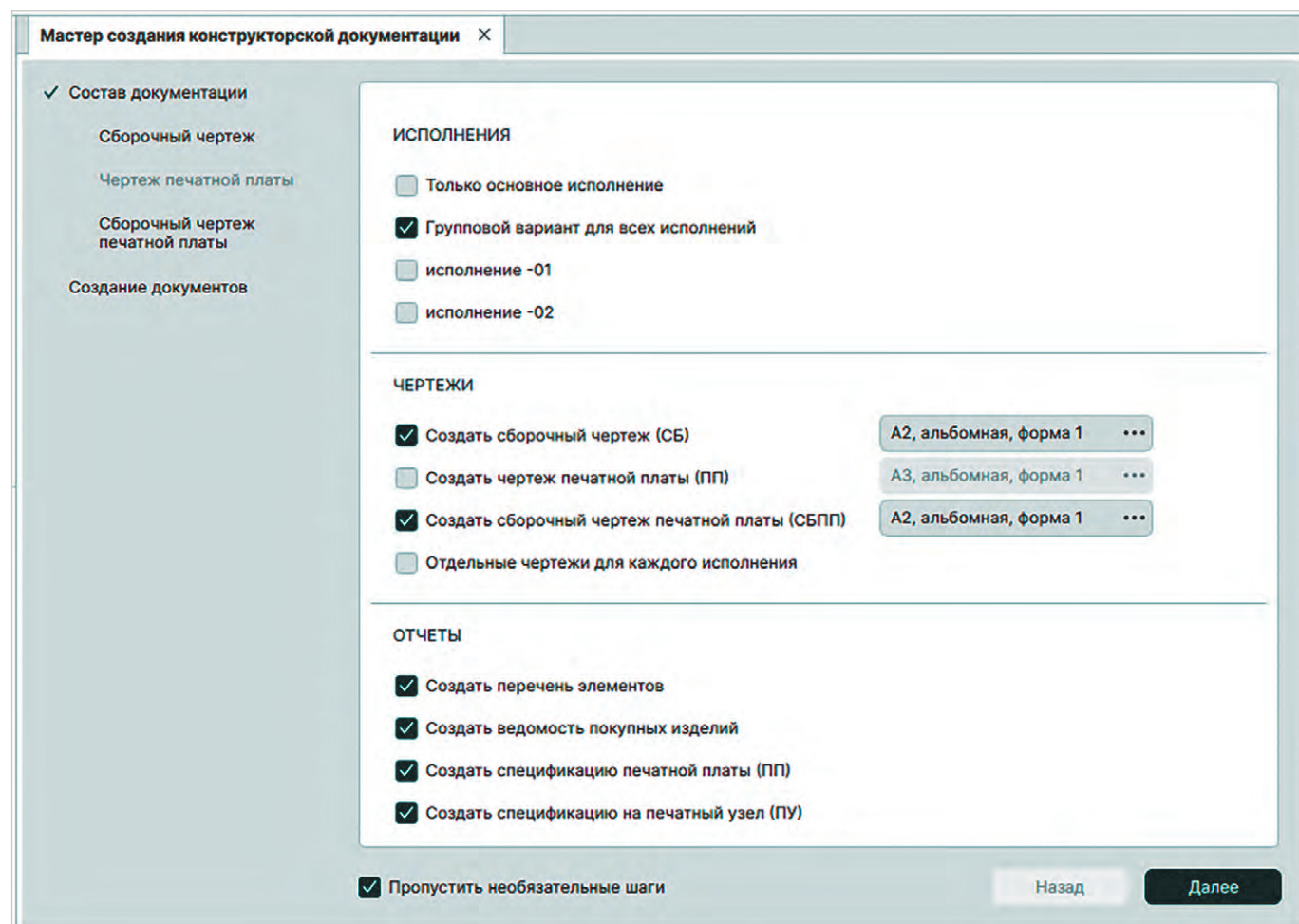


Рис. 1. Титульное окно Мастера создания КД

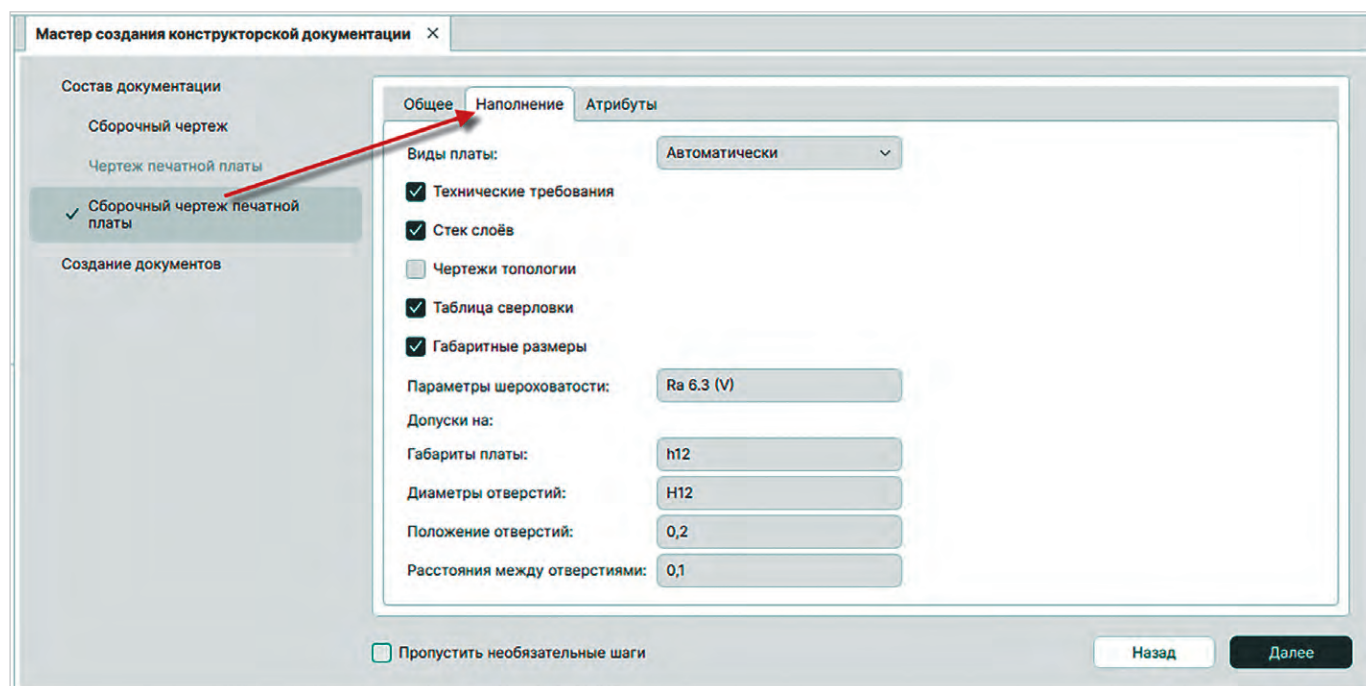


Рис. 2. Общие настройки и наполнение сборочного чертежа печатной платы

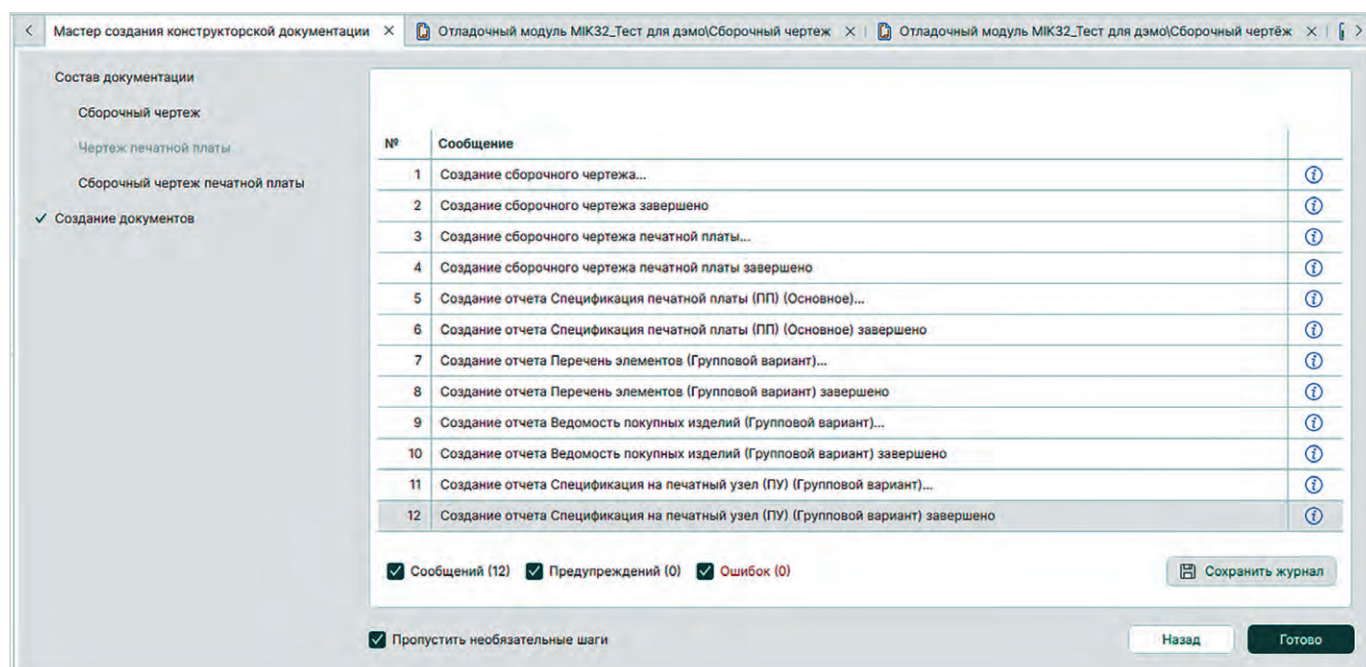


Рис. 3. Автоматически сформированный комплект КД

Следующий этап – чертежи. Сборочный чертёж МПП, Сборочный чертёж ПУ, чертежи деталей и сборочных единиц. Этот этап обычно делался в сторонних САД-системах. Графика видов конвертировалась в общий формат для экспорта, что всегда сопряжено с искажением информации.

Необходимо выполнить раскладку по видам, образмеривание в соответствии с качествами точности на печатные платы, причём, опять же, для каждого чертежа своя раскладка и своё оформление.

Это ещё не всё: также есть разработка технических требований, заполне-

ние таблицы сверловки, установка компонентов выносными видами – много работы.

В дальнейшем может быть такое, что изменился ряд компонентов на плате по разным причинам: схемотехник улучшил схему, нет в наличии, невозможно купить компоненты или просто найдена ошибка – обычные стадии разработки изделия.

Также комплект КД могут развернуть на исправление в момент проверки контролирующими органами. Приходится делать перекомпоновку данных в отчётах и экспортировать

новые виды, заново оформлять чертежи.

Причём стоит отметить, что многие из вышеперечисленных операций подготовки комплекта КД повторяются при разработке каждого нового изделия из раза в раз, поскольку они стандартны. Сортировки, компоновки, раскладки по видам и требования к оформлению чертежей и отчётов регламентирует ГОСТ, что и дало нам возможность их унифицировать, автоматизировать и тем самым значительно облегчить работу конструктора, дать ему возможность сосредото-

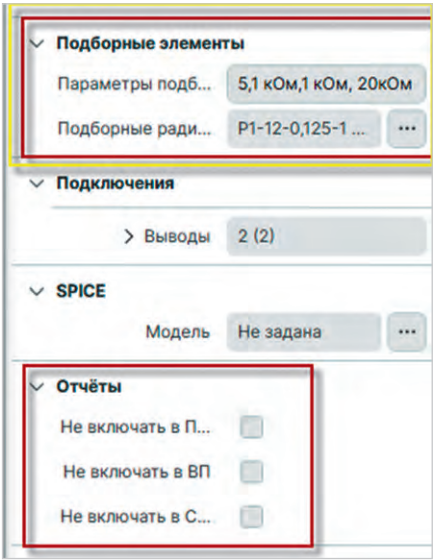


Рис. 4. Свойства компонента. Определение Подборных элементов. Исклучение из отчётов

читаться на сути разработки, а не тонуть в рутинной работе.

Далее в этой статье мы расскажем, как наш Модуль создания конструкторской документации справляется с этой задачей.

Самый лучший способ показать работу нашего «Мастера КД» – это пройтись по шагам создания комплекта КД на ПУ.

При вызове «Мастера КД» возникает форма, имеющая несколько вкладок, с основными параметрами чертежей, которые можно конкретизировать или оставить наш вариант (рис. 1, 2).

Далее комплект чертежей и отчётов сгенерируется и раскроется в виде вкладок в рабочей области (рис. 3).

Как уже говорилось во введении, выполнены основные операции унификации, и чертежи необходимо доработать, при этом чем подробнее вы

вначале указали ваши параметры в диалоге «Мастера КД», тем меньше доработок потребуется. Запустить создание любого отчёта, чертежа можно не только комплектом с помощью Мастера, но и по отдельности. Рассмотрим по отдельности автоматически сгенерированные отчёты и чертежи.

Оформление схемы проекта

Прежде чем перейти к ПЭЗ, стоит рассказать, что у нас есть в **схемотехническом редакторе для оформления схемы электрической принципиальной (ЭЗ)**. Во-первых, на схеме размещаются предустановленные УГО, выполненные в соответствии с ГОСТ, шаблон Технических требований, готовая к размещению Таблица силовых контактов (в ней содержатся скрытые на УГО выводы питания

№ строки	Наименование	Код продукции	Обозначение документа на поставку	Поставщик	Куда входит (обозначение)	Количество			
						на из- деле	в комп- лекты	на ре- гулир.	всего
11	P1-12-0,125-0	27.90.60	T A/ЯР434110.005ТУ	АО "НПО "ЭРКОН"		8			8
12					1111.222.333.440-01	6			6
13						14			14
14	P1-12-0,125-1 кОм±5 %	27.90.60	T A/ЯР434110.005ТУ	АО "НПО "ЭРКОН"		4	1		5
15	P1-12-0,125-20 кОм±5 %	27.90.60	T A/ЯР434110.005ТУ	АО "НПО "ЭРКОН"		5	1		6
16	P1-12-0,125-330 Ом±5 %	27.90.60	T A/ЯР434110.005ТУ	АО "НПО "ЭРКОН"		6			6
17	P1-12-0,125-5,1 кОм±5 %	27.90.60	T A/ЯР434110.005ТУ	АО "НПО "ЭРКОН"		2	1		3
18	P1-12-0,125-10 кОм±5 %	27.90.60	T A/ЯР434110.005ТУ	АО "НПО "ЭРКОН"		8			8
19	P1-12-0,125-100 кОм±5 %	27.90.60	T A/ЯР434110.005ТУ	АО "НПО "ЭРКОН"		16			16
20					1111.222.333.440-01	3			3
21						19			19

Рис. 5. Ведомость покупных. Подборные элементы, внешние блоки

Перф. номер	Формат	Зона	Пос	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
1111.222.333.440	A2			1111.222.333.001СБ	Сборочный чертёж		Документация
Стор. №							Материалы
Лист							

Рис. 6. Спецификация на МПП

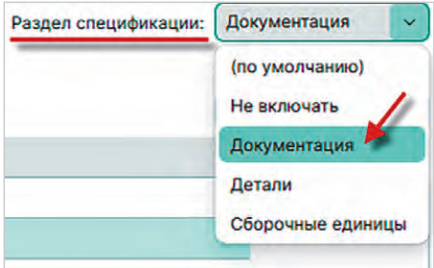


Рис. 7. Свойства чертежа. Выбор раздела спецификации на ПУ

компонентов и предназначенные им цепи). Для облегчения навигации по многолистовой схеме больших форматов разработан функционал разбиения схемы на зоны. Адрес зоны будут содержать и межлистовые порты.

Для компонента есть возможность определить элементы подбора, что корректно отобразится во всей документации. Также в Свойствах есть возможность исключить компонент

из отчётов, если это, например, Контактная площадка (рис. 4).

Если схема небольшая, а соответственно, и ПЭЗ не больше листа, его можно разместить прямо на схеме.

Начиная с версии Delta Design 4.2, в состав программы вошёл функционал исполнений ПУ, заведение переменных данных для исполнений, удобная визуализация и редактирование их на схеме. Таблица с переменными данными проекта доступна для размещения на схеме.

					<i>Стандартные изделия</i>		
					Винты ГОСТ 11644-75		
		3			Винт АМ10-6gx12.36.029	2	
		4			Винт АМ2,5-6gx3.36.093	4	
		5			Токоъемник /лестяк	11	XA1-XA5,
					2-10-3,0-9-03 ГОСТ 16840-78		XA7,XA9-
							XA13

Рис. 8. Спецификация на ПУ. Раздел «Стандартные изделия»

Рис. 9. Конфигурация представления отчёта

Рис. 10. Настройка колонок отчётов

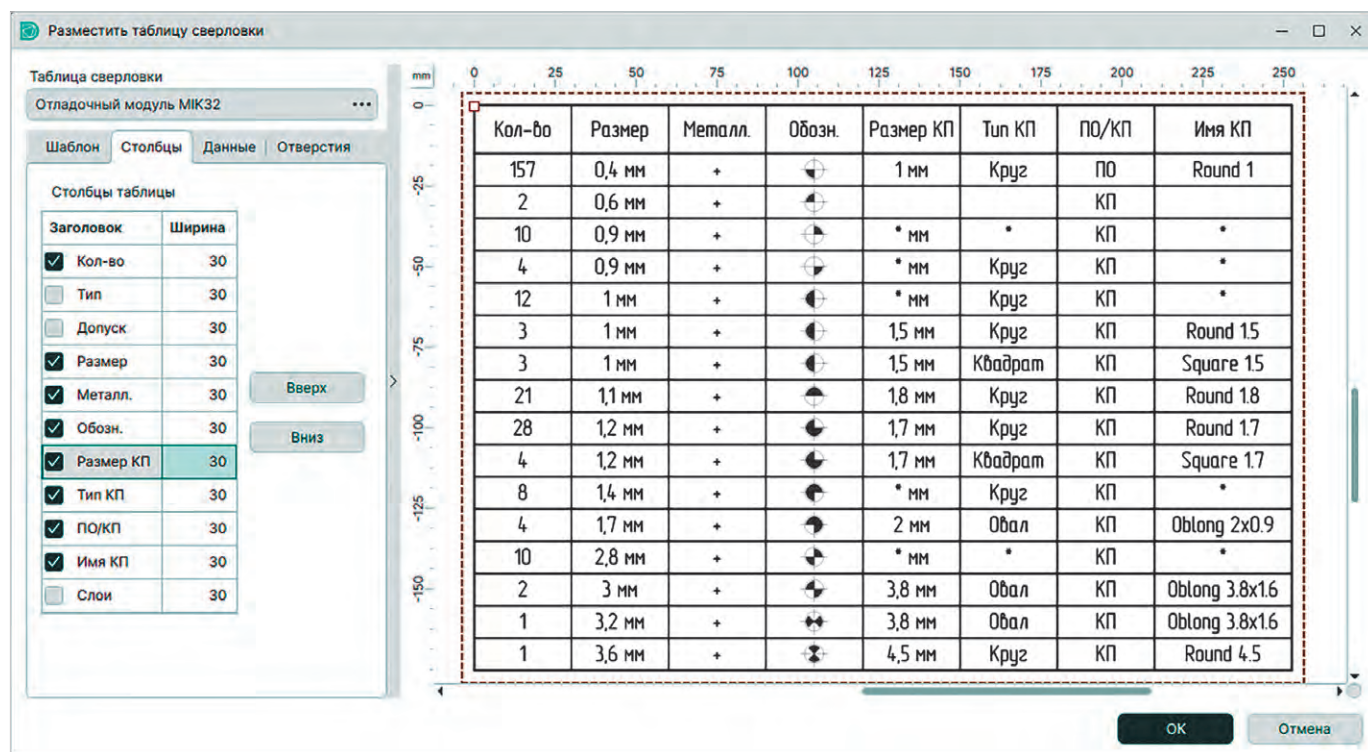


Рис. 11. Настройки Таблицы сверловки

Текстовая документация. Отчёты

Автоматически сгенерированный Перечень элементов содержит необходимые компоновки, и если на схеме выбран функционал зон для ПЭЗ, подставляется форматка с зонами.

Ведомость покупных изделий содержит информацию о внешних блоках схемы (имеющих собственный десятичный номер), о подборных элементах и исполнениях схемы (рис. 5).

Спецификация на многослойную печатную плату (МПП) содержит данные о сборочном чертеже МПП и материалах, из которых она изготовлена (рис. 6). Информация о материалах берётся из редактора стека слоёв, где они были определены.

Также есть возможность разработки «Пользовательской спецификации». Она нужна для того, чтобы включить Сборочные единицы в состав нашего изделия – Печатного узла.

Например, Трансформатор состоит из чашек, сердечника, проволоки и т.д. Это значит, что на него должен быть разработан сборочный чертёж, что возможно в нашем редакторе чертежей.

Соответственно, где-то должен быть записан этот чертёж, а также состав вышеперечисленных деталей и материалов данной сборочной единицы. Таким документом является «Пользовательская спецификация». Данный документ добавится автоматически в

раздел «Сборочные единицы» в спецификацию на печатный узел.

Разделы отчёта «Спецификация на ПУ» заполняются автоматически. В раздел «Документация» попадают все документы проекта, в том числе и дополнительные. Например, в состав документации на ПУ входит такой документ, как «Программы и методики испытаний». Данный документ – текстовый. Он создаётся на форматке с заполнением текстового поля по команде «Создать чертёж» и в своих свойствах имеет указание о разделе Спецификации на ПУ, в который он должен быть автоматически помещён (рис. 7).

Аналогичным образом можно выполнить чертёж детали и указать в его свойствах соответствующий раздел спецификации на ПУ.

Если в вашем проекте двусторонняя печатная плата, она автоматически будет определена в раздел «Детали» спецификации на ПУ. Если многослойная – в раздел «Сборочные единицы».

В случае наличия в вашем проекте компонентов с заполненными в Библиотеке атрибутами ГОСТ они автоматически поместятся в раздел «Стандартные изделия» (рис. 8).

Все «Прочие изделия» – компоненты, имеющие атрибут ТУ, попадут в соответствующий раздел.

Тут стоит побольше рассказать о возможностях представления и редактирования всех наших отчётов:

- все они: ПЭЗ, ВП, Спецификации – имеют два представления: табличное и форматное. В табличном представлении они доступны для ручного редактирования. Можно добавлять/удалять строки, текст и экспортировать данную таблицу в .CSV и Excel формат. В форматном представлении они наглядно представляют отчёт, как он есть: со штампом и полями;
- у наших отчётов есть «Настройки», которые пользователь может единожды задать, и они будут применяться для всех отчётов, созданных впоследствии. В частности, наши пользователи нередко, хоть это и не регламентирует ГОСТ, добавляют пустую строку после каждого компонента. Мы реализовали эту возможность (рис. 9).

Во вкладке «Колонки» можно определить, какие атрибуты компонентов будут помещены в колонки «Наименование» и «Примечание», а также Префиксы Допустимой замены и представление параметра «не устанавливать» для переменных данных Групповой спецификации (рис. 10).

В настройках Спецификации можно добавить пустые разделы и зарезервировать под них необходимое количество строк, например, для ручного добавления материалов. Позиции в зарезервированных строках раздела спецификации будут проставляться

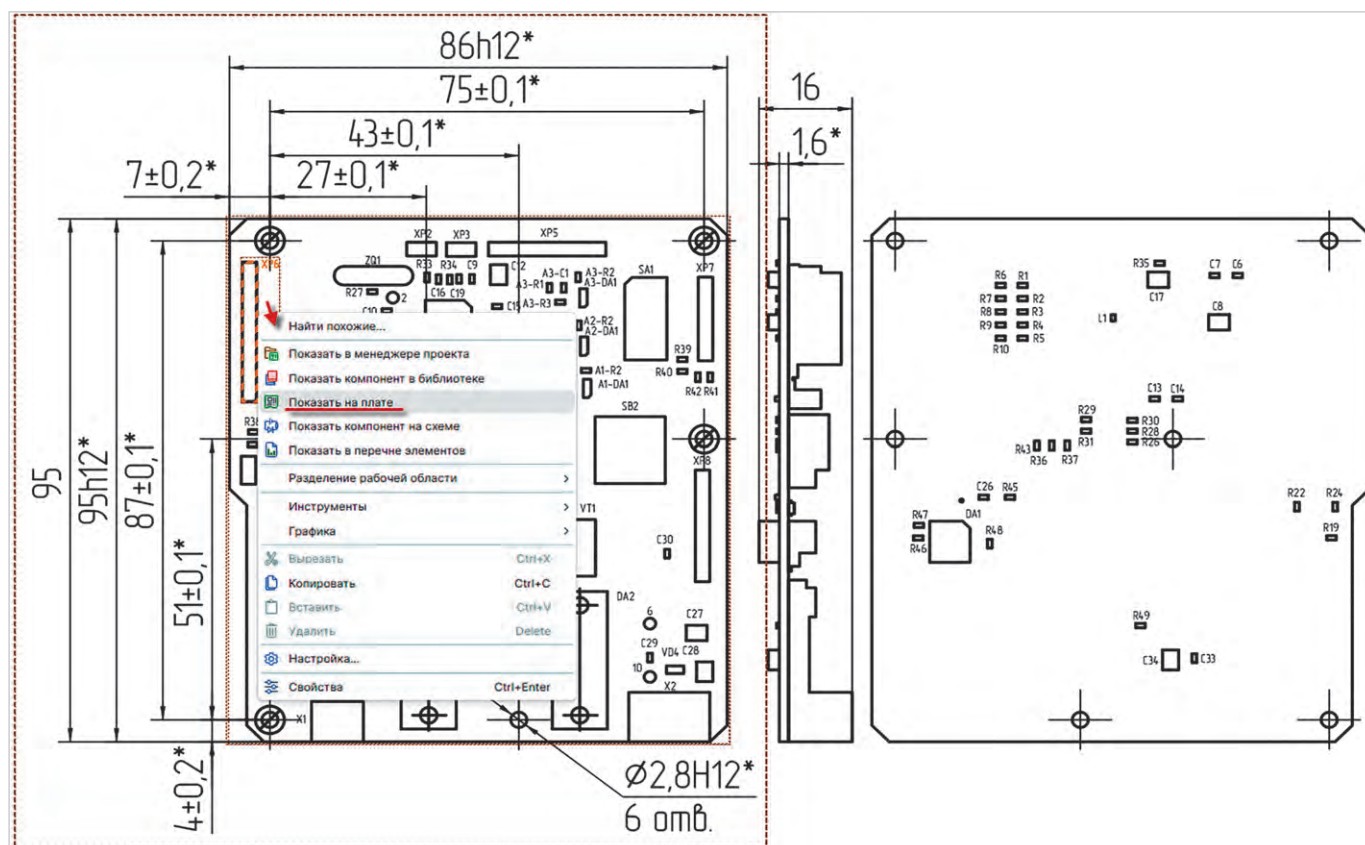


Рис. 12. Сборочный чертёж ПУ. Виды печатной платы с компонентами

автоматически. И конечно, в Настройках отчётов можно к каждому отчёту добавить Лист регистрации изменений.

Графические документы. Чертежи

При генерации чертежей из основного комплекта раскладка по видам, образмеривание, проставление допусков происходят автоматически.

Все шаблоны технических требований (ТТ), размещаемые на чертежах, доступны для редактирования. Они создавались на основе усреднённых требований предприятий разработчиков и предприятий изготовителей печатных плат. Сами шаблоны находятся в Стандартах нашей программы, и их всегда можно изменить под себя. Все установленные настройки типов линий чертежей соответствуют ГОСТ и тоже доступны для редактирования в Стандартах нашей программы.

Набор размещаемых объектов на чертеже печатной платы зависит от настроек чертежа при его генерации и от того, является ли сама плата одним материалом или сборкой (МПП) (рис. 2).

Многослойная плата или нет, автоматически определяет Мастер по принципу наличия в стеке более двух электрических слоёв.

Таблица сверловки размещается автоматически, и если выбрано создание чертежей топологии, то отверстиям в ней присваиваются символы. Также таблицу сверловки можно разместить в ручном режиме, определив свои настройки её представления и выбрав необходимые столбцы (рис. 11).

Автоматически сгенерированный Сборочный чертёж печатного узла содержит раскладку его по видам и технические требования. Направление раскладки, вверх или вниз, на нескольких листах или на одном и другие настройки задаются в стартовом окне. Масштаб в нём можно задать вручную, если масштаб не задан, Мастер определяет его самостоятельно кратно шагу 0,5, исходя из возможности размещения видов на формате чертежа А2.

Компоненты вида Сборочного чертежа ПУ поддерживают связь с проектом (рис. 12). Также раскладка по видам возможна и на основе 3D-модели ПУ.

Заключение

Автоматизация формирования конструкторской документации в Delta Design позволяет перейти от фрагментированного ручного оформления к сквозному цифровому процессу.

Отсутствие конвертации данных при переходе в другую САПР, использование проекта в качестве единого источника исходных данных, ассоциативная связь чертежей и отчётов с проектной базой, а также встроенные шаблоны, соответствующие требованиям ЕСКД, минимизируют риски несогласования и сокращают трудоёмкость подготовки КД на 70–80%.

Модуль автоматизации КД не только сокращает время разработки, но и высвобождает инженерные ресурсы для решения задач проектирования и оптимизации. В данный момент развитие модуля происходит в направлении расширения функционала. В том числе готовим к следующему выпуску построение выносных видов проекций от 3D-моделей, новые чертёжные инструменты, генерацию на проект комплекта Карт рабочих режимов, упрощённое размещение из библиотеки в Стандартах Delta Design деталей крепления на плате с автоматическим занесением в документацию.

Наша цель – максимально автоматизировать разработку конструкторской документации, поскольку в современных реалиях автоматизация инженерных процессов имеет ключевую роль в цифровой трансформации предприятий электронной отрасли.



Проектирование печатных плат для индивидуальных разработчиков: возможности новой редакции САПР Delta Design

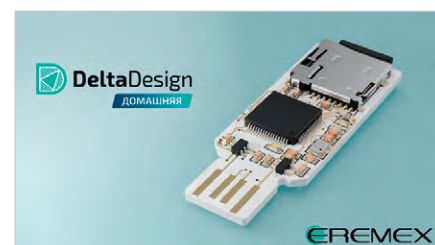
Илья Скворцов

В статье рассматривается новое предложение на рынке инструментов проектирования печатных плат – «Домашняя» САПР Delta Design, ориентированная на индивидуальных разработчиков и малые инженерные группы. Представлен подробный обзор её функциональных возможностей: от схемотехнического ввода и библиотек до трассировки и подготовки производственных данных. На трёх практических примерах (компактное USB-устройство, отладочная плата на отечественном микроконтроллере, специализированный датчиковый узел) демонстрируется применимость инструмента для решения различных задач. Отдельно обсуждаются функциональные ограничения данной САПР и целевые сценарии, при которых рекомендуется переход на корпоративную версию продукта. Делается вывод о практической нише продукта для локальной разработки, прототипирования и образовательных целей.

Введение

Рынок средств автоматизированного проектирования (САПР) печатных плат (ПП) традиционно поляризован. С одной стороны, существуют бесплатные или условно-бесплатные решения для радиолюбителей и студентов, часто обладающие существен-

ными ограничениями в функционале или удобстве. С другой – дорогостоящие корпоративные платформы, ориентированные на коллективную работу, сложные проекты и интеграцию в производственные цепочки. Для индивидуальных инженеров-предпринимателей, разработчиков в стартапах,



фрилансеров или небольших лабораторий выбор часто стоит между недостаточной функциональностью и избыточной стоимостью. Система Delta Design отечественной компании «Эремекс» долгое время позиционировалась исключительно как комплексное корпоративное решение. Появление САПР Delta Design «Домашняя» призвано заполнить существующий пробел. Данный продукт представляет собой полнофункциональный, но локально ориентированный инструмент для проектирования электроники, сохранивший ключевые техноло-

Набор функциональных модулей

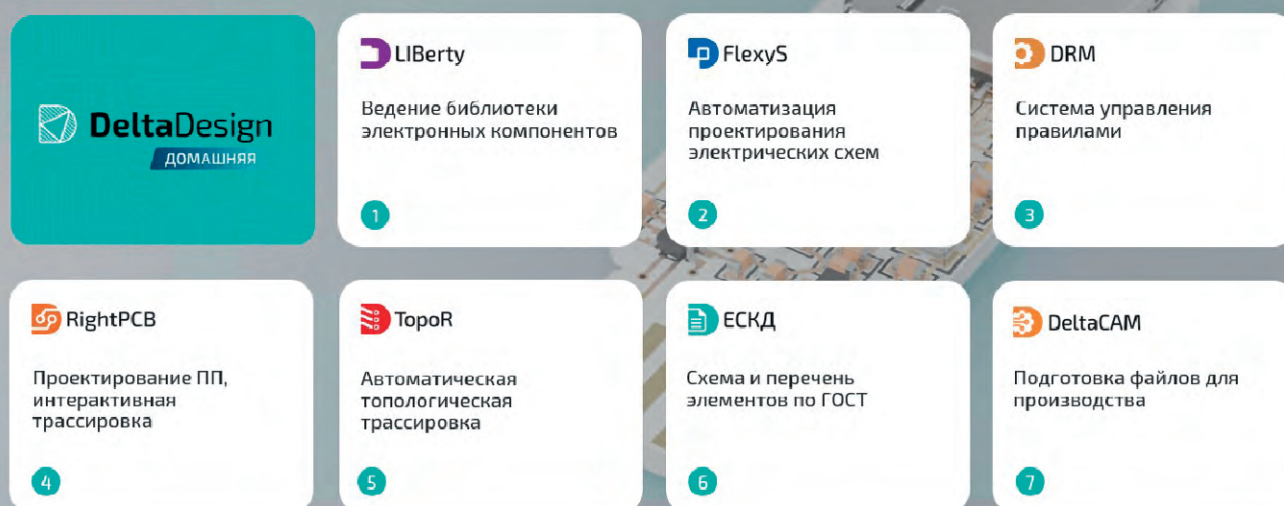


Рис. 1. Архитектура САПР Delta Design «Домашняя»

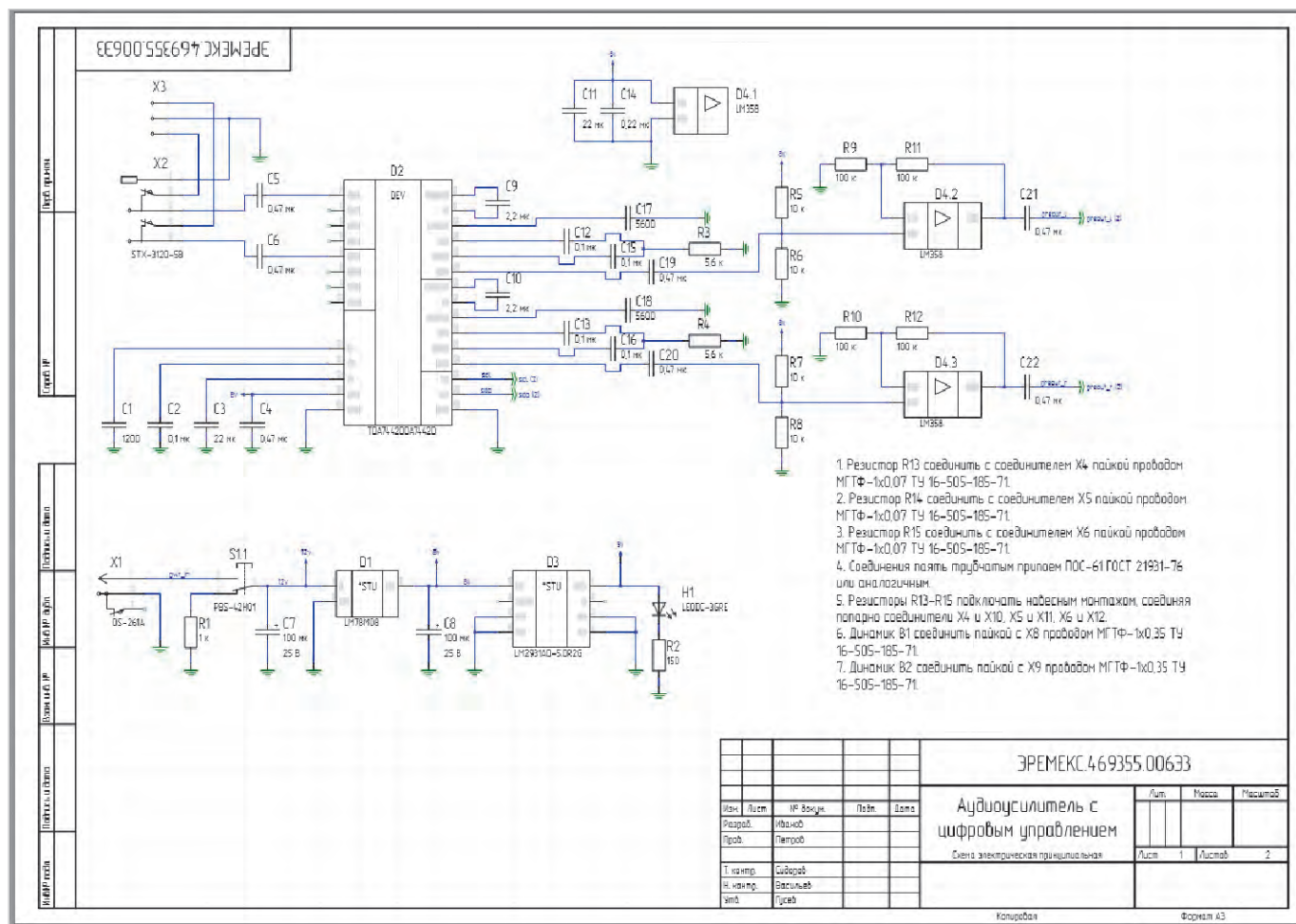


Рис. 2. Пример оформления электрической принципиальной схемы в Delta Design «Домашняя»

гии основной платформы. В статье мы детально рассмотрим архитектуру (рис. 1), возможности и практическую применимость этой редакции.

Архитектура и ключевые возможности Delta Design «Домашняя» – это самостоятельное настольное приложение, включающее полный цикл проектирования без подключения к серверным модулям, характерным для корпоративных развертываний.

Рассмотрим основные компоненты системы.

Схемотехнический редактор

Предоставляет классический набор инструментов для создания принципиальных электрических схем (рис. 2). Поддерживает иерархическое проектирование, позволяя группировать функциональные узлы в блоки. Интегрированная библиотека компонентов включает разнообразные условно-графические обозначения (УГО), что ускоряет начальные этапы проектирования. Система отслеживает соответствие цепей в схеме и на плате, автоматически обновляя нумера-

цию элементов и аннотации при изменении проекта.

Редактор печатной платы

Ядро системы. Поддерживает проектирование плат с количеством сигнальных слоёв до 4, что покрывает значительную часть потребностей индивидуальных разработчиков и малых серий. Система предоставляет

гибкие настройки слоёв (сигнальные, полигоны, паяльная маска, маркировка и т.д.). Интегрированные правила проектирования (Design Rules) позволяют задавать минимальные зазоры, ширину проводников для разных классов, ограничения по слоям, что критически важно для обеспечения технологичности и надёжности изделия.

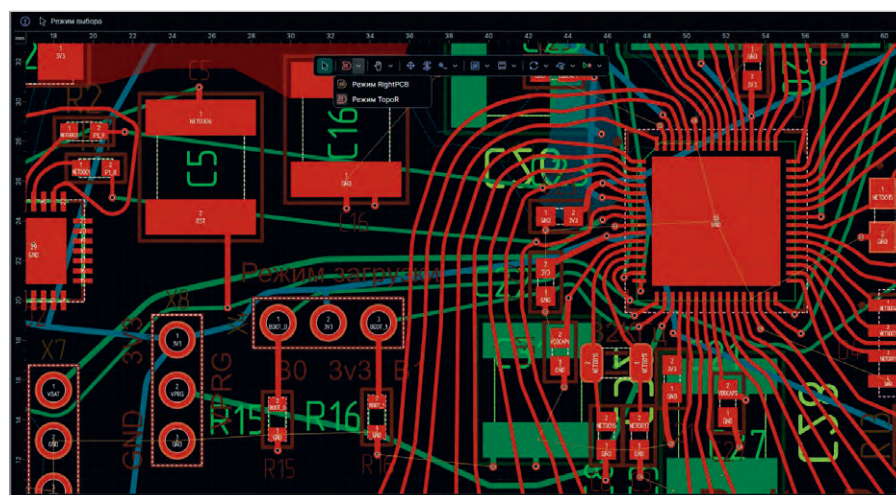


Рис. 3. Пример «классической» топологической трассировки под произвольным углом

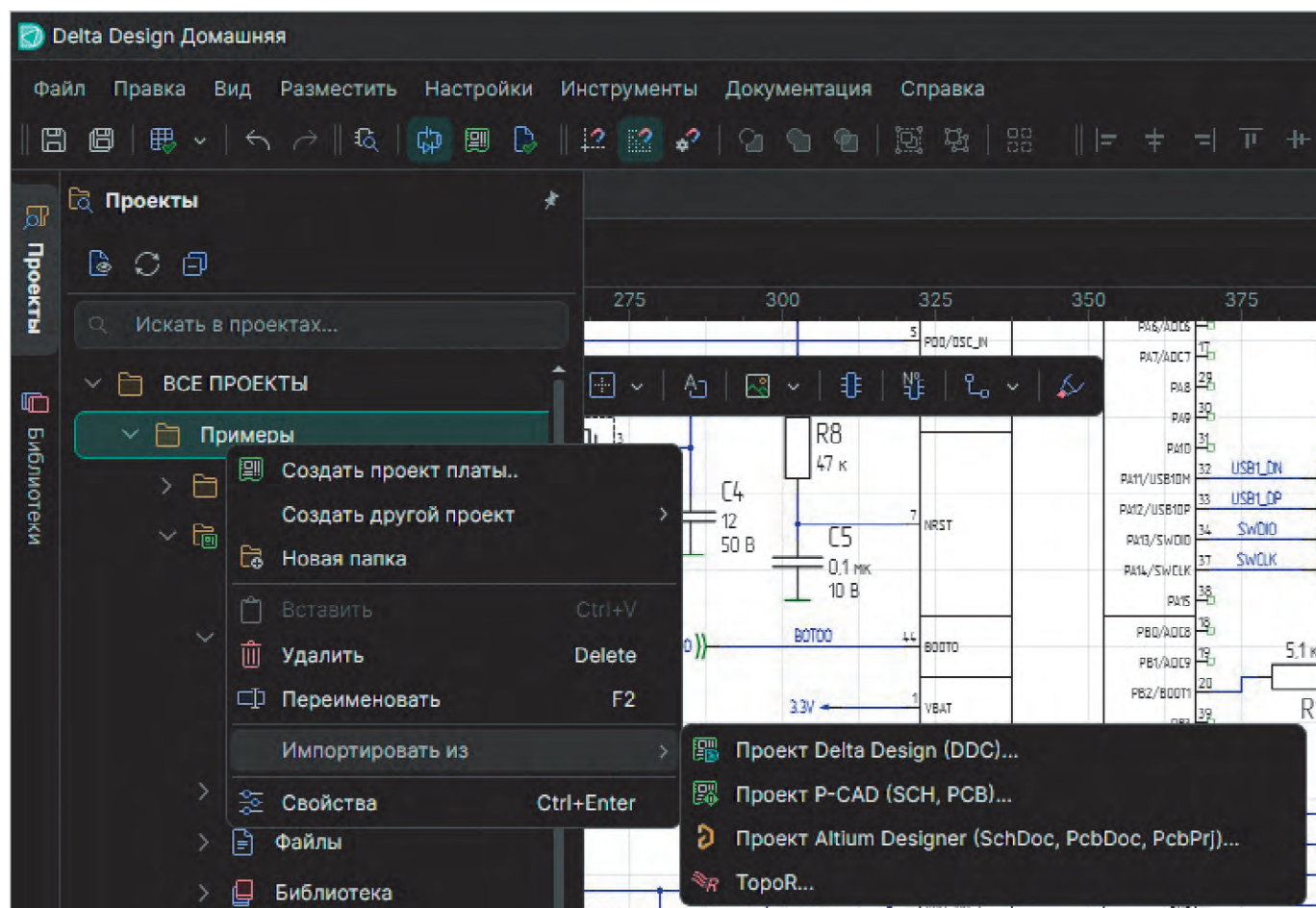


Рис. 4. Окно мастера импорта проектов

Средства трассировки

Здесь реализованы две ключевые технологии:

- RightPCB – интерактивная ручная и полуавтоматическая трассировка с поддержкой современного «push-and-shove» алгоритма, при котором уже проложенные проводники отодвигаются для размещения новых, соблюдая правила;
- ToroR – по праву считается одним из символов доступного и эффективного трассировщика для радиолюбителей и инженеров-разработчиков. Ключевое преимущество инструмента – кардинальное снижение трудозатрат на проектирование топологии печатных плат. Он использует топологический подход (рис. 3), не ограничиваясь ортогональными направлениями, что позволяет находить оптимальные пути для сложных разводок, что особенно полезно в плотных проектах. ToroR интуитивно понятен специалисту и берёт на себя всю рутинную работу, и это позволяет инженеру сосредоточиться на творческой части процесса – создании оптимальной и надёжной электрической схемы,

а не на утомительном «черчении линий» дорожек.

Несмотря на появление более современных и сложных систем автоматизированного проектирования, ToroR сохраняет за собой статус культового инструмента в радиолюбительской среде на протяжении десятилетий. Его популярность основана на идеальном балансе между функциональностью, простотой освоения и доступностью. Для поколений радиолюбителей он стал «рабочей лошадкой» – первым серьёзным инструментом, с помощью которого были созданы тысячи устройств, от простых усилителей до сложных контроллеров. ToroR полностью интегрирован в интерфейс Delta Design «Домашняя» и решает конкретную задачу по разводке плат быстро, качественно и без излишней сложности, что делает его незаменимым инструментом в домашней лаборатории и небольшом конструкторском бюро.

Контроль целостности проекта и документооборот

Встроенная система проверки правил проектирования (DRC) валиди-

рует проект на соответствие заданным ограничениям. Поддерживается экспорт производственных файлов в стандартных форматах Gerber (включая Gerber X2). Для работы с отечественными производителями или в образовательных проектах предусмотрен экспорт перечня элементов – начальной стадии конструкторской документации. Наличие встроенного 3D-модуля позволяет визуализировать и экспортировать в собранную 3D-плату, что помогает на этапе механического проектирования корпуса.

Совместимость и лицензирование

Система поддерживает импорт проектов из популярных форматов (Delta Design, Altium Designer, P-Cad) (рис. 4.). Лицензия «Домашней» является персональной и бессрочной, что выгодно отличает её от подписочных моделей.

Практическое применение на примерах

Для оценки практической полезности редакции проанализируем три типовых проекта, выполненных в ней.

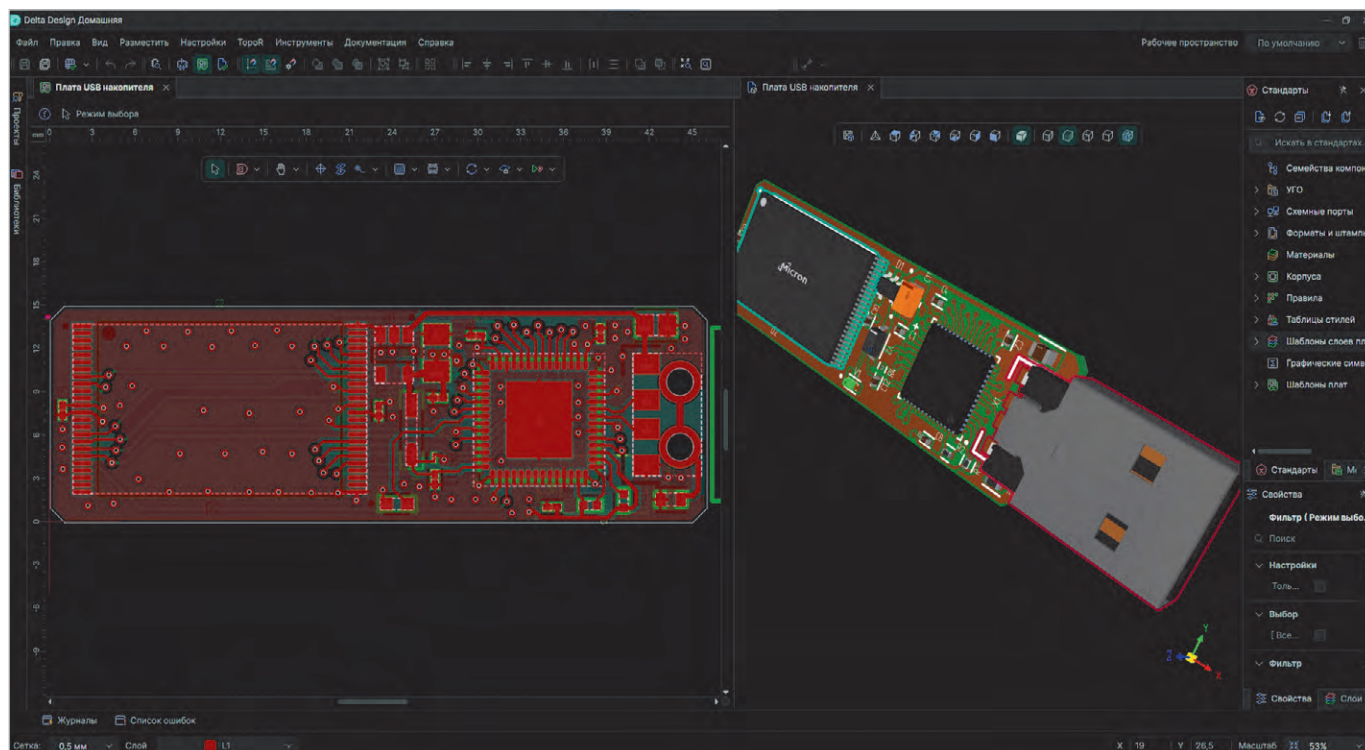


Рис. 5. Плата USB-устройства. Вид из редактора печатных плат и визуализация 3D-модели

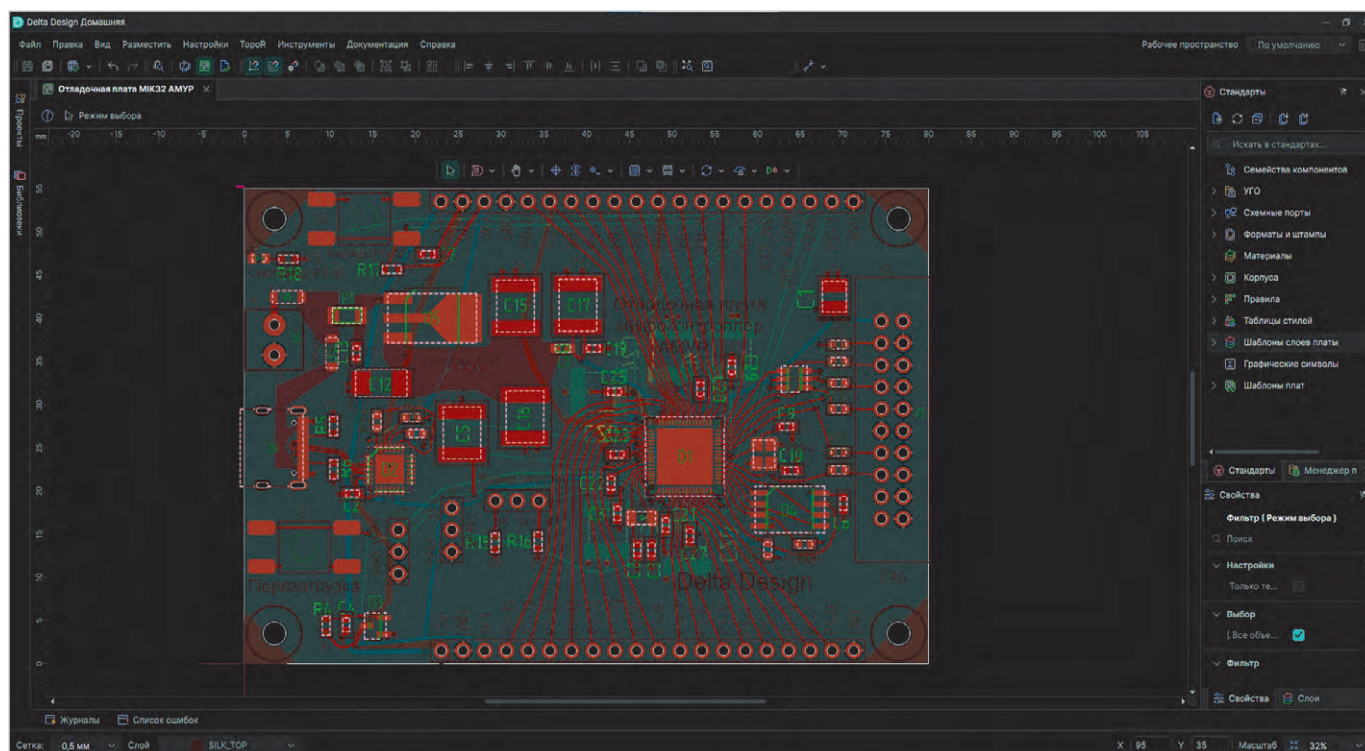


Рис. 6. Отладочная плата, разведённая с помощью топологического трассировщика

Пример 1. Компактное USB-устройство (рис. 5). Проект характеризуется высокой плотностью компоновки из-за малых габаритов платы. Здесь ключевую роль сыграла возможность точной настройки правил проектирования для USB-интерфейса и силовых цепей, а также гибкая работа с паяльной маской и шелкографией. Средства интерактивной трассировки

(RightPCB) позволили эффективно разместить все соединения в тесных условиях. Экспорт в Gerber и последующая сверка не выявили проблем с корректностью производственных данных.

Пример 2. Отладочная плата для отечественного микроконтроллера МΙΚ32 (рис. 6). Проект средней сложности с 4 слоями. Основной интерес

представляла работа с автотрассировщиком ТороR для разводки линий внешней памяти и периферии МК. Несмотря на сложную топологию, автотрассировщик успешно завершил 100% соединений с соблюдением заданных правил, что существенно сократило время разработки. Этап проверки DRC помог выявить и устранить несколько потенциальных оши-

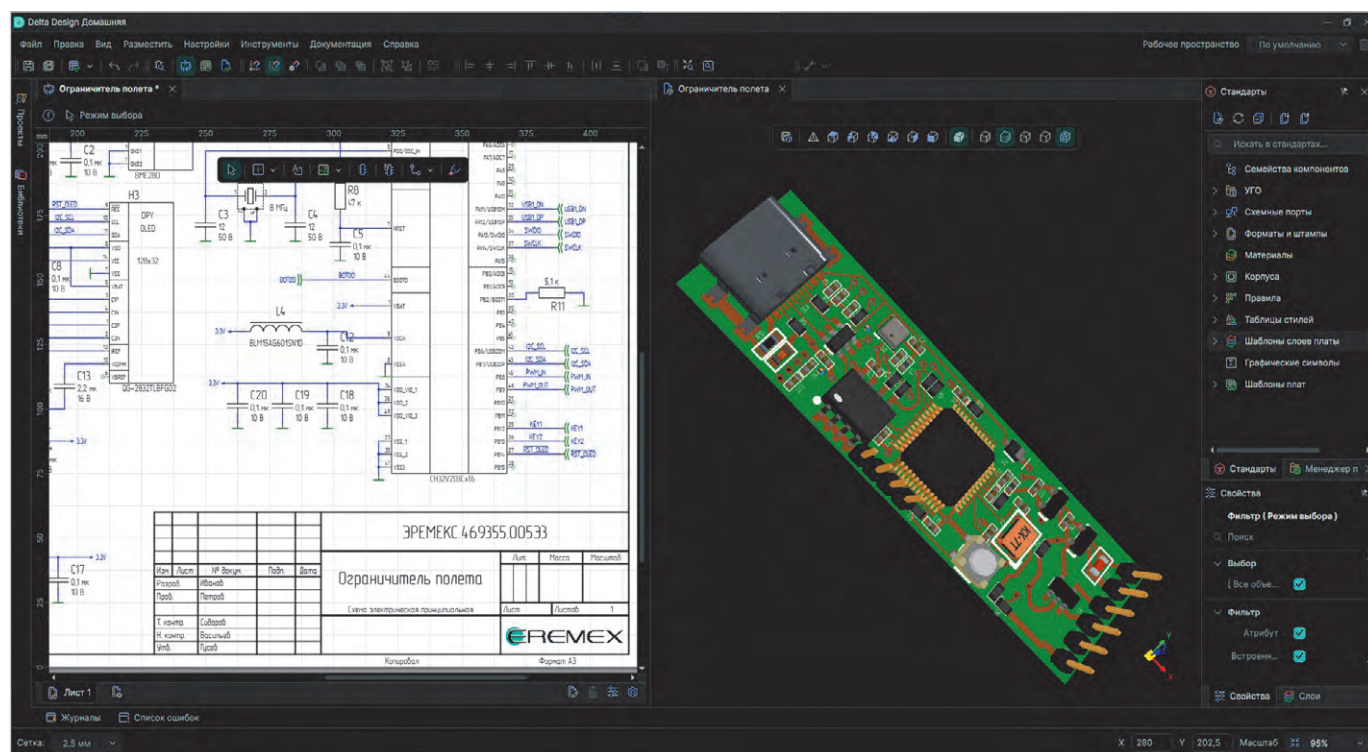


Рис. 7. Плата ограничителя полёта. Вид из редактора схем и визуализация 3D-модели

бок «короткого замыкания», не замеченных визуально.

Пример 3. Специализированный датчиковый узел с ограничителем полёта (рис. 7). Проект с дифференциальными парами для высокоточных аналоговых сигналов. В Delta Design «Домашней» реализована возможность задания правил для дифференциальных пар, включая требование к одинаковой длине и синфазному прокладыванию трасс. Данная функция была успешно применена для обеспечения целостности сигнала. Также проект потребовал создания неметаллизированных посадочных мест и управления формой полигонов под экранирование.

Ограничения и целевые сценарии для перехода

«Домашняя» имеет преднамеренные ограничения, отличающие её от корпоративной Delta Design.

- Максимальное количество сигнальных слоев – 4.
- Поддерживаются только сквозные (Through-Hole) переходные отверстия без возможности создания скрытых (Buried) и глухих (Blind) отверстий.
- Отсутствуют встроенные модули схемотехнического и топологического моделирования.
- Модуль подготовки КД ограничен созданием перечня элементов и

спецификации без возможности формирования полноценного комплекта конструкторской документации (КД) по ГОСТ Р 2.417-2002, включая чертежи и технические условия.

- Проект – единица работы. Нет встроенной системы контроля версий и полноценного управления правами для совместной работы большой команды.
- Исключительно локальная работа без интеграции с серверными хранилищами данных (PDM/PLM).

Эти ограничения четко определяют нишу продукта: индивидуальная разработка, создание прототипов, учебно-лабораторные работы, проекты для микропроизводства и малых партий. В случаях когда проект выходит за указанные рамки, требуется большее число слоёв, моделирование для ВЧ/ВХ-цепей, строгое документирование по ГОСТ или коллективная разработка – инженеру логично рассмотреть переход на корпоративную версию Delta Design, которая снимает все указанные ограничения и предоставляет дополнительные инструменты для управления жизненным циклом изделия.

Заключение

Представленная «Домашняя» САПР Delta Design является серьезным инструментом, способным закрыть потребности значительного сегмен-

та разработчиков электроники. Сочетание классического интуитивного интерфейса, поддержки современных форматов, мощных алгоритмов трассировки (ToroR, RightPCB) и наличия базовых средств контроля (DRC) делает её пригодной для реализации широкого спектра проектов – от простых двухслойных плат до относительно сложных многослойных устройств. Продукт предлагает разумный баланс между функциональностью и простотой освоения, что может сделать его привлекательным для индивидуальных инженеров, небольших команд, преподавателей технических вузов. Осознанно введенные ограничения служат не только коммерческим целям, но и помогают пользователю четко понимать границы применимости инструмента, своевременно оценивая необходимость миграции на более мощную промышленную платформу для масштабирования своих проектов (рис. 8).



Рис. 8. QR-код для перехода на страницу продукта Delta Design «Домашняя»

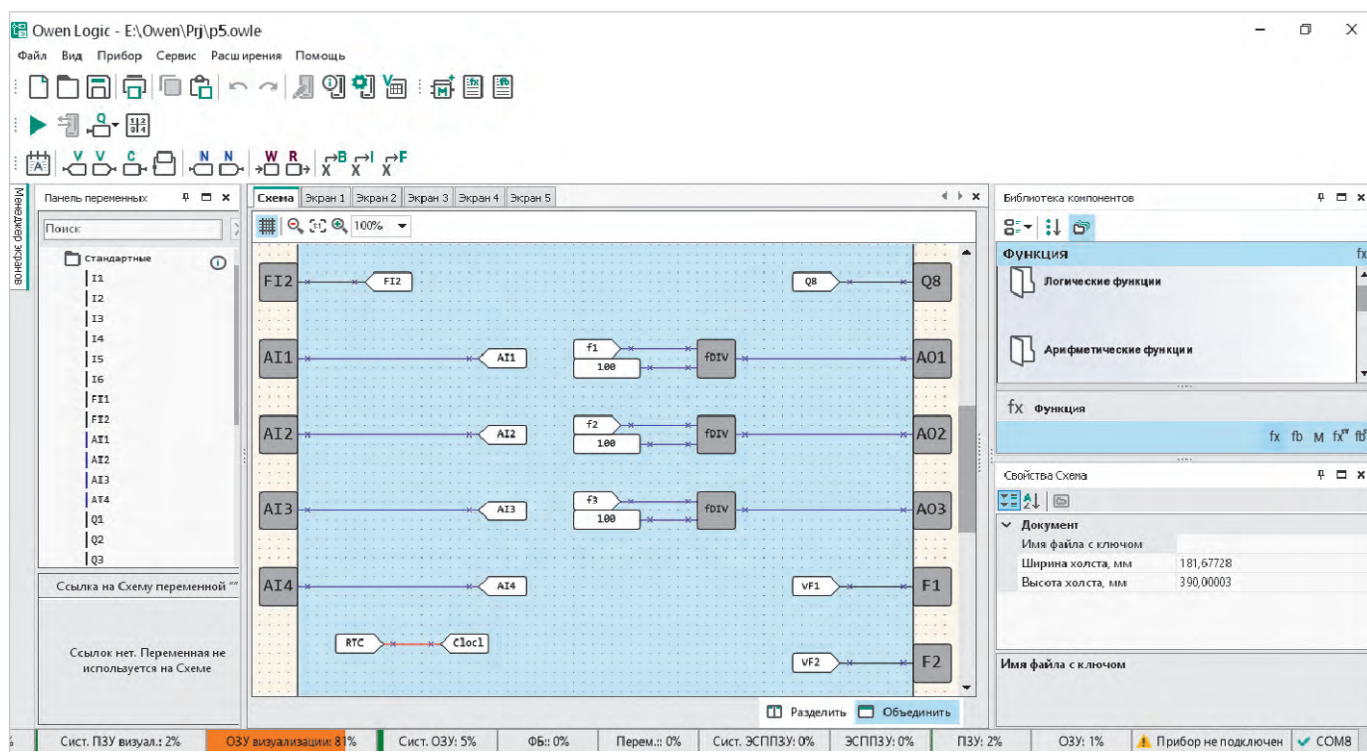


Рис. 2. Интерфейс среды разработки

частотой изменения сигнала не более 100 кГц и до двенадцати дискретных выходов электромеханических реле или транзисторных ключей.

Контроллер подходит для работы с различными нагрузками, включая освещение, насосы и электромоторы. Он сочетает в себе оптимальную конфигурацию аналоговых и дискретных входов и выходов для управления системами вентиляции, отопления, кондиционирования, а также для автоматизации и управления различными электроустановками. При необходимости количество входов и выходов можно увеличить с помощью модулей расширения ПРМ.

Это устройство имеет компактные размеры и легко монтируется на DIN-рейку, что обеспечивает удобство использования и экономию пространства.

Графический цветной экран позволяет создавать удобные и наглядные интерфейсы пользователей, что значительно упрощает настройку и восприятие информации. Интерфейс Ethernet позволяет интегрировать прибор в распределённые системы, увеличивать количество входов и выходов с помощью модулей ввода-вывода Mx210, реализовывать удалённый контроль и управление оборудованием с помощью облачного сервиса Owen Cloud. Для контроллеров ПР205 предусмотрены модификации с двумя интер-

фейсами RS-485 на борту для передачи данных на верхний уровень и управления другими элементами системы.

Кроме того, данный контроллер обладает высокой надёжностью и стабильностью работы.

Среда разработки

Алгоритм работы ПР205 создаётся пользователем в бесплатной среде программирования Owen Logic [2]. Данная среда позволяет разрабатывать уникальные пользовательские алгоритмы и учитывать все особенности системы.

Среда разработки Owen Logic имеет подробную встроенную справочную систему на русском языке со множеством примеров, позволяющую быстро освоить её за достаточно короткое время. Интерфейс среды разработки представлен на рис. 2.

Разработка программы осуществляется на главном большом поле путём размещения на нём библиотечных элементов, блоков переменных и организации связей между этими компонентами и портами контроллера. При необходимости можно создавать макросы на языке программирования ST для реализации необходимых алгоритмов программы.

Среда разработки позволяет выполнить симуляцию проекта программы с целью предварительной проверки до загрузки в контроллер. Это позво-

ляет быстро обнаружить и устранить программные ошибки и экономит время.

Программа

Рассматриваемая здесь программа для проверки контроллера разработана в бесплатной среде программирования Owen Logic на языке программирования FBD (Function Block Diagram) для конкретной модели контроллера ПР205-24.1211.02.2.0, но может быть легко адаптирована для других моделей ПЛК компании ОВЕН. Это делается путём изменения типа модели ПЛК в проекте с последующей трансляцией и записью в контроллер.

Предлагаемая программа позволяет проверить исправность экрана контроллера, его клавиатуру, часы и календарь, световые индикаторы, интерфейсы Ethernet и RS-485, а также все порты ввода и вывода.

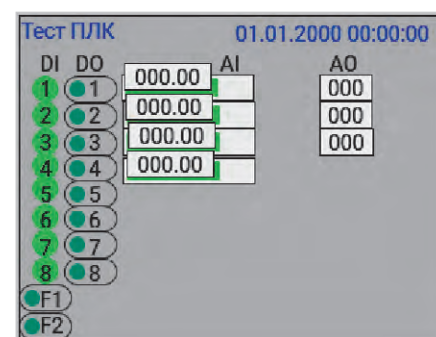


Рис. 3. Главный экран программы

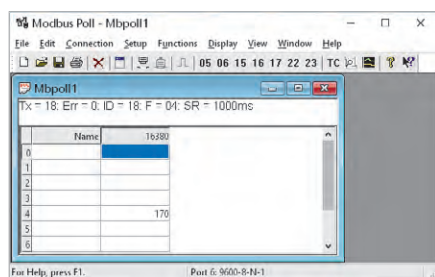


Рис. 4. Окно программы Modbus Pool

Интерфейс оператора программы разработан непосредственно в самой среде разработки Owen Logic и состоит из нескольких экранов, которые можно листать с помощью кнопок со стрелками вверх и вниз. Главный экран программы для проверки портов представлен на рис. 3.

Этот экран отображает текущее время и календарь, позволяя визуально проверить их работу. Ниже располагаются элементы, отображающие состояние дискретных входов DI1...8, переключатели для дискретных выходов DO1...8 и для индикаторов F1 и F2. Измеряемое значение для аналоговых входов AI1...4 отображается на экране в виде цифровых индикаторов и горизонтальных линейных индикаторов, заполняемых зелёным цветом. Выходные уровни сигналов AO1...3 можно задавать в соответствующих цифровых полях.

Прикладывая потенциал напряжения +24 В ко входам DI1...8, можно проверить их исправность по изменению цвета соответствующих индикаторов на экране программы. Выбирая с помощью кнопки контроллера «SEL» любой из переключателей и активируя его кнопкой «OK», можно включать и отключать дискретные выходы DO1...8, а также индикаторы F1 и F2. Проверку аналоговых входов AI1...4 можно производить, прикладывая к этим входам напряжение от 0 до 10 В и сравнивая это напряжение с показаниями на экране. Выходные порты проверяются вводом в соответствующие цифровые поля чисел от 0 до 100%. В результате на выводе портов AO1...3 должно появляться напряжение от 0 до 10 В. Следует учесть, что необходимо предварительно подать питание для выходных каскадов портов АО через соответствующие выводы контроллера. Таким образом проверяются все порты контроллера и два пользовательских индикатора.

Проверка экрана осуществляется путём смены экранов, отображающих красный, зелёный и синий цвета.

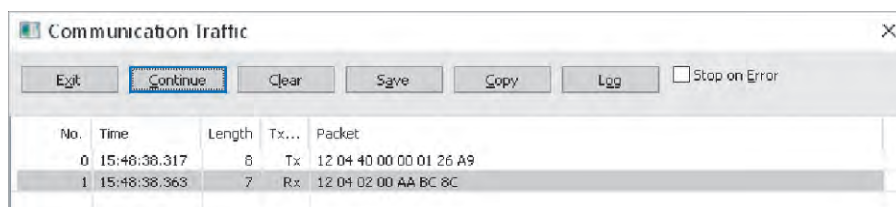


Рис. 5. Протокол обмена данными Modbus Pool

При разработке данной программы были использованы простейшие библиотечные элементы для преобразования сигналов и порты ввода-вывода с индикаторами.

Данный метод проверки позволяет осуществить поиск и обнаружение неисправностей контроллера, если они существуют, с помощью дополнительной контрольно-измерительной аппаратуры.

Для проверки двух последовательных портов RS-485 контроллера с назначенными ID 17 и ID 18 в программу добавлена сетевая ячейка памяти с проверочным кодом 10101010, соответствующим значению 0xAA в шестнадцатеричном коде или 170 в десятичном. Этот код доступен для чтения через любой из последовательных портов, функцией чтения регистров Input Reg по адресу 16384. Проверка последовательных портов производится чтением данного регистра и сравнением полученного кода с программным кодом 10101010. Для чтения можно использовать широко распространённую программу Modbus Pool или подобную ей. По результатам сравнения можно сделать вывод об исправности порта. На рис. 4 показано окно программы Modbus Pool, на котором видны показания счётчика Tx, равно 18 успешным опросам, ID18 второго порта RS-485 и значение 170 ячейки памяти с адресом 16384.

Развёрнутый протокол обмена данными Modbus Pool по интерфейсу RS-485 при чтении значения 170 из ячейки с адресом 16384 представлен на рис. 5.

Загрузка программы в контроллер ПР205 осуществляется из самой среды разработки Owen Logic через интерфейс MicroUSB или Ethernet.

Для загрузки программы через интерфейс MicroUSB необходимо предварительно установить на компьютер драйвер порта, свободно предоставляемый компанией ОВЕН в составе программного пакета Owen Configurator [3].

Owen Configurator является бесплатным программным обеспечением для

удобной настройки и параметрирования устройств ОВЕН. С его помощью можно изменять конфигурацию, задавать установки, просматривать текущие параметры и сохранять их в файлы для последующего использования.

Загрузка программы через интерфейс Ethernet производится после настройки IP адресов компьютера и контроллера. Например, для компьютера назначается адрес 192.168.1.100 с маской 255.255.255.0, а для контроллера – адрес 192.168.1.101 с маской 255.255.255.0.

Вход в системное меню настроек контроллера для настройки IP адреса осуществляется путём длительного удержания его кнопки «OK» в нажатом состоянии. В этом меню можно настроить часы, календарь, параметры портов RS-485 и многие другие установки. Выход из меню настроек контроллера производится длительным удержанием его кнопки «ESC» в нажатом состоянии.

Исправность интерфейса MicroUSB и Ethernet подтверждается также успешной загрузкой программы в контроллер.

Рассмотренный здесь проект программы размещён на сайте журнала [4] для свободного использования.

Заключение

Данная программа может послужить отправной точкой для разработки других проектов автоматизации, поскольку она уже имеет необходимые элементы рабочей программы, которые можно изменять и дополнять.

Библиотека компонентов среды разработки имеет достаточный набор компонентов и функциональных блоков для реализации самых разнообразных проектов для систем автоматики.

Литература

1. URL: <https://owen.ru/product/pr205>.
2. URL: https://owen.ru/product/sreda_programmirovaniya_owen_logic.
3. URL: https://owen.ru/product/owen_configurator.
4. URL: <https://www.cta.ru>.



Вольтметр действующего и средневыпрямленного значений напряжений в звуковом диапазоне частот с цветным 1,3" TFT-дисплеем и батарейным питанием. Часть 1

Алексей Кузьминов

В статье описан вольтметр, измеряющий действующее, U_d , и средневыпрямленное, U_c , значения напряжений входного сигнала звукового диапазона частот, а также его частоту и вычисляющий коэффициент формы, $K_f = U_d / U_c$. Прибор основан на преобразователе действующего значения напряжения в постоянное (RMS-to-DC converter) AD637 повышенной точности, микроконтроллере (МК) EFM8LB12F32, высокоскоростных (до 20 В/мкс) и широкополосных (до 10 МГц) ОУ ОРА1642, ТРАД8605 и ОУ с «нулевым» смещением (Zero-Drift) ОРА735. Для питания прибора используется аккумулятор 6LF22 форм-фактора «Крона» напряжением 9 В, ёмкостью 650 мА·ч, заряжаемый от любой зарядки для телефона через разъём USB Type C. Результаты измерений выводятся на 1,3" цветной TFT дисплей с IPS-матрицей и разрешением 240×240 пикселей. Приводятся принципиальная схема, разводка и внешний вид платы прибора, конструкция, внешний вид, программные средства, результаты испытаний и настройка прибора.



Дополнительные материалы к этой статье можно скачать, перейдя по ссылке в QR-коде

Резюмируя вышеизложенное, можно констатировать, что если сигнал синусоидальный, то

$$U_d \approx U_{\text{Амп}} \times 0,7071, U_c \approx U_{\text{Амп}} \times 0,6366 \text{ и } K_f \approx 1,11072.$$

Здесь необходимо заметить, что формулы (5) и (6) работают только в одну сторону, или, другими словами, если сигнал синусоидальный, то

$U_d \approx U_{\text{Амп}} \times 0,7071$ и $U_c \approx U_{\text{Амп}} \times 0,6366$, а вот обратное неверно, т.е. если $U_d \approx U_{\text{Амп}} \times 0,7071$ или $U_c \approx U_{\text{Амп}} \times 0,6366$, то сигнал необязательно синусоидальный. Например, если сигнал представляет собой прямоугольный меандр с постоянной составляющей, то можно найти такую постоянную составляющую, для которой $U_d \approx U_{\text{Амп}} \times 0,7071$. Другими словами, такое действующее значение сигнала в общем случае не означает, что сигнал синусоиден (такой меандр, естественно, не является синусоидой).

А вот формула (7) работает в обе стороны, т.е. если сигнал синусоиден, то $K_f \approx 1,11072$, и если $K_f \approx 1,11072$, то сигнал синусоиден. Как можно заметить из (7), коэффициент формы не зависит ни от амплитуды сигнала, ни от его частоты. В связи с этим K_f может быть использован как средство определения синусоидальности сигнала. Например, измерив U_d , U_c , рассчитав $K_f = U_d / U_c$ и сравнив K_f со значением 1,11072, можно сделать вывод о том, синусоиден сигнал или нет. Кстати, на этом принципе и работает описываемый прибор (см. далее).

В большинстве случаев требуется измерение действующего значения переменного напряжения сетевой частоты (50 Гц). Это может быть само сетевое напряжение (напри-

Введение

Прежде всего, приведём некоторые известные соотношения, которые помогут понять принцип функционирования описываемого далее прибора.

Действующее значение напряжения сигнала, U_d , в общем случае принято рассчитывать по формуле

$$U_d = \sqrt{U_{d1}^2 + U_{d2}^2 + \dots + U_{dN}^2} \quad (1),$$

где U_{d1} , U_{d2} , ..., U_{dN} – действующие значения соответствующих гармоник, входящих в состав сигнала.

Средневыпрямленное значение напряжения сигнала, U_c , также в общем случае принято рассчитывать по формуле

$$U_c = U_{c1} + U_{c2} + \dots + U_{cN} \quad (2),$$

где U_{c1} , U_{c2} , ..., U_{cN} – средневыпрямленное значение каждой из гармоник, входящих в состав сигнала.

Коэффициент формы сигнала, K_f , принято рассчитывать по формуле

$$K_f = \frac{U_d}{U_c} = \frac{\sqrt{U_{d1}^2 + U_{d2}^2 + \dots + U_{dN}^2}}{U_{c1} + U_{c2} + \dots + U_{cN}} \quad (3).$$

Каждая из гармоник $U(t)$, входящая в состав сигнала и имеющая свою частоту, представляет собой синусоиду (соответствующей частоты) с ампли-

тудным значением $U_{\text{Амп}}$. Для единичной частоты это обычная синусоида

$$U(t) = U_{\text{Амп}} \sin(t) \quad (4).$$

Действующее значение, U_d , такой синусоиды за полпериода (0– π) равно действующему значению за период (0– 2π) и рассчитывается по формуле

$$U_d = U_{\text{Амп}} \sqrt{\int_0^\pi \sin^2(t) dt} = U_{\text{Амп}} \sqrt{\int_0^{2\pi} \sin^2(t) dt} = U_{\text{Амп}} \frac{1}{\sqrt{2}} \approx U_{\text{Амп}} \times 0,7071 \quad (5).$$

Средневыпрямленное значение, U_c , синусоиды (4) за полпериода (0– π) равно средневыпрямленному значению модуля (или абсолютного значения) синусоиды ($|\sin(t)|$) за период (0– 2π) и рассчитывается по формуле

$$U_c = U_{\text{Амп}} \int_0^\pi \sin(t) dt = U_{\text{Амп}} \int_0^{2\pi} |\sin(t)| dt = U_{\text{Амп}} \frac{2}{\pi} \approx U_{\text{Амп}} \times 0,6366 \quad (6).$$

Для синусоидального сигнала числовое значение коэффициента формы, K_f , в соответствии с (3), может быть получено из формулы

$$K_f = U_d / U_c = (U_{\text{Амп}} \frac{1}{\sqrt{2}}) / (U_{\text{Амп}} \frac{2}{\pi}) = (\frac{1}{\sqrt{2}}) / (\frac{2}{\pi}) = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11072 \quad (7).$$

мер, ~220 В) или напряжения со вторичных обмоток трансформаторов. Простейший случай измерения действующего напряжения сетевой частоты – это измерение выпрямленного (с помощью обычных диодов) значения такого напряжения U_c . Поскольку $U_d / U_c = \pi/2\sqrt{2} \approx 1,11072$ (см. (7)), то $U_d \approx U_c \times 1,11072$.

Таким образом, измерив U_c и проинтегрировав измерительный прибор под U_d , т.е. умножив изменённое напряжение на 1,11072, можно получить действующее значение напряжения. На этом принципе основан способ измерения действующего значения напряжения простейших и дешёвых вольтметров и стрелочных тестеров. Существуют цифровые вольтметры действующего значения напряжения, которые измеряют реальное действующее значение напряжения (true RMS). Однако они на порядок дороже первых; кроме того, они измеряют действующее значение напряжения частотой не выше 1 кГц. И наконец, существуют приборы, которые измеряют действующее значение напряжения (true RMS) частотой до 100 кГц. Однако их цена просто зашкаливает, так как они стоят уже под десятки, а то и сотни тысяч рублей.

Здесь может возникнуть вопрос: а зачем вообще измерять действующее и средневыпрямленное значения напряжений в звуковом диапазоне частот? Ведь обычно действующее значение напряжения измеряют на сетевой частоте 50 Гц (см. выше). Для ответа на этот вопрос сделаем некоторое отступление.

Как известно, то или иное устройство звукотехники (УМЗЧ, различные звуковые мониторы и т.п.) имеет искажения. Другими словами, подав на такое устройство чисто синусоидальный сигнал, на выходе получим усиленный сигнал, но с некоторыми искажениями. Эти искажения принято характеризовать коэффициентом нелинейных искажений (КНИ), K_H , который в общем случае рассчитывается по формуле (8)

$$K_H = \frac{\sqrt{U_{d2}^2 + U_{d3}^2 + \dots + U_{dN}^2}}{\sqrt{U_{d1}^2 + U_{d2}^2 + \dots + U_{dN}^2}} \quad (8),$$

где $U_{d2}^2, U_{d3}^2, \dots, U_{dN}^2$ – квадраты действующих значений напряжений всех гармоник, кроме первой (основной, U_{d1}^2), а $U_{d1}^2, U_{d2}^2, \dots, U_{dN}^2$ – квадраты действующих значений всех без исключения гармоник.

Кроме K_H искажения принято ещё характеризовать коэффициентом гармонических искажений (КГИ, в зарубежной литературе THD – Total Harmonic Distortion), K_T , который вычисляется по формуле:

$$K_T = \frac{\sqrt{U_{d2}^2 + U_{d3}^2 + \dots + U_{dN}^2}}{U_{d1}} \quad (9).$$

Связь между K_T и K_H определяется формулой (10):

$$K_T = \frac{K_H}{\sqrt{1 + K_H^2}} \quad (10).$$

Причём, если $K_H \ll 1$, то $K_T \approx K_H$ (см. (10)), т.е. при их малых значениях они приблизительно равны.

Для получения K_T или K_H требуется достаточно дорогая звуковая карта и также недешёвое программное обеспечение.

Теперь возвратимся к прерванной последовательности изложения. Как было отмечено выше, коэффициент формы, K_F , так же, как и K_T, K_H , определяет искажения, или, другими словами, K_F, K_T и K_H выполняют приблизительно одну и ту же функцию, но по-разному. Тогда возникает вопрос: а можно ли вместо K_T и K_H использовать K_F ? И есть ли связь между ними? Можно ли рассчитать, например, K_T по K_F , т.е. есть ли зависимость $K_T = f(K_F)$? К сожалению, такой прямой связи нет. Однако, если взглянуть на формулы (3), (7) и (9), то можно констатировать однозначно, что если $K_F = \pi/2\sqrt{2} (\approx 1,11072)$, то $K_T = K_H = 0$. Другими словами, чем ближе K_F к $\pi/2\sqrt{2} (\approx 1,11072)$, тем ближе K_T и K_H к нулю.

Пусть выходной сигнал с выхода, например, УМЗЧ состоит из двух гармоник: первая с действующим значением 10 В и частотой, например, 1 кГц, вторая – с действующим значением 0,1 В (т.е. 0,1% от первой) и частотой 2 кГц. По формулам (3) и (9) можно точно рассчитать значения K_F и K_T соответственно и сравнить их между собой.

Итак, пусть $U_{d1} = 10$ В, $U_{d2} = 0,1$ В. Тогда, в соответствии с (9), рассчитаем K_T . Имеем:

$$K_T = \frac{\sqrt{0,1^2}}{10} = \frac{0,1}{10} = 0,01,$$

что соответствует 1%.

Теперь рассчитаем K_F по (3). Имеем:

$$K_F = \frac{\sqrt{10^2 + 0,01^2}}{10 + 0,1} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{10,0004999}{10,1} = 1,09972.$$

Теперь рассчитаем относительную ошибку ΔK_F , имея в виду, что истинное значение $K_F = 1,11072$:

$$\Delta K_F = \frac{1,11072 - 1,09972}{1,11072} = 0,009934,$$

что соответствует 0,99% $\approx 1\%$.

Как видим, $K_T = 1\%$ и $\Delta K_F \approx 1\%$, или, другими словами, они достаточно близки.

Если взять действующее значение второй гармоники на порядок меньше, т.е. если $U_{d1} = 10$ В и $U_{d2} = 0,01$ В, то по расчётам автора (они опущены) $K_T = 0,1\%$, а $\Delta K_F = 0,00099935 = 0,099935\% \approx 0,1\%$, т.е. и в этом случае K_T и ΔK_F так же близки. Автор оставляет такой расчёт читателю.

Кроме того, если подходить чисто формально, то из (3) следует, что $K_F = U_d / U_c$, из чего следует, что $U_d = K_F U_c$. А из (9) следует, что

$$K_T = \frac{\sqrt{U_{d2}^2 + U_{d3}^2 + \dots + U_{dN}^2}}{U_d} = \frac{\sqrt{U_{d2}^2 + U_{d3}^2 + \dots + U_{dN}^2}}{U_c K_F} \quad (11).$$

Но эта связь чисто формальная и не подходит для расчёта, поскольку для вычисления числителя (11) опять потребуются дорогая звуковая карта и дорогое программное обеспечение.

Резюмируя всё вышесказанное, можно отметить, что измерение U_d и U_c и расчёт по ним K_F является альтернативным способом определения искажений устройств звукотехники. Описываемый далее прибор как раз и выполняет такую функцию. Прибор имеет небольшой размер, полностью автономен и относительно недорог.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. Вначале приводится принципиальная схема прибора, затем – разводка и внешний вид его платы и далее – его конструкция и внешний вид. В конце статьи приводятся результаты испытаний прибора, его настройка и порядок работы с ним.

Принципиальная схема

Функцию преобразования входного сигнала в действующее и средневыпрямленное значения и вывод постоянных напряжений, численно равных этим значениям, выполняет микросхема AD637 (DA1). Если, например, входной сигнал синусоидальный с амплитудой 1 В, то его действующее значение будет приблизительно равно 0,7071 В (формула (5)), а средневыпрямленное – приблизительно 0,6366 В (формула (6)). Эти напряжения появляются на выводе V_{out} (11-й вывод DA1) в зависимости от того, подклю-

чѐн ли конденсатор C_{AV} (C_{AV} и C_{AV1}) между выводами V_{OUT} и C_{AV} (10-й вывод) или нет. А подключением этих конденсаторов управляет коммутатор RS2103 (DA2) в зависимости от сигнала C , подаваемого на его вывод In (1-й вывод DA2) с МК. Конденсатор $C3$ ёмкостью около 8 пФ (рекомендуемый производителем для блокировки ВЧ составляющей выходного сигнала) постоянно подключѐн между 11-м и 10-м выводами DA2. Подстроечный резистор $R1$ совместно с $R2$ предназначен для подстройки нуля выходного сигнала DA1. Резистор $R3$, подключѐнный одним концом к напряжению питания (+3 В), а другим – ко входу разрешения CS (5-й вывод DA1), постоянно разрешает работу DA1. Подстроечный резистор $R4$ предназначен для регулировки коэффициента усиления DA1 (около 1). Конденсаторы $C1$ и $C2$ – блокировочные. Конденсатор $C4$, подключѐнный ко входу питания DA2 (2-й вывод), также блокировочный.

Входной сигнал подключается к прибору с помощью разъѐма XBX (гнездо RCA) – см. пунктирный прямоугольник, обозначенный как «Вход RCA» в середине правой части схемы. К этому разъѐму одним концом подключѐн кабель, на втором конце которого расположен разъѐм SIP-02 (XUvx'), который подключается к штыревому разъѐму PSLM-02 (XUvx), расположенному на плате. К этому разъѐму подключѐн делитель напряжения $R1d$ – $R4d$, который определяет диапазон подключаемых напряжений (0,2 В, 1 В, 10 В и 20 В). Эти 4 сигнала, «земля» и сигнал V_{in} подключены к штыревому разъѐму PSLM-06 (XDV). К этому разъѐму подключѐн кабель, на одном конце которого расположен ответный разъѐм SIP-06 (XDV) в пунктирном прямоугольнике с надписью «Переключатель диапазонов», а провода второго его конца непосредственно припаяны к одному направлению переключателя диапазонов RS1010 24 (4 положения, 2 направления) – ПД1. Ко второму направлению этого переключателя припаяны провода с сигналами DIAP0, DIAP1, DIAP2 и «земля» (GND) одного конца кабеля, на втором конце которого расположен гнездовой разъѐм XDIAP', который подключѐн к штыревому разъѐму XDIAP, расположенному на плате. Сигналы DIAP0, DIAP1 и DIAP2 подключены к соответствующим выводам МК (18-й, 17-й и 16-й выводы МК EFM8LB12F32-QFN24 (DD1)).

Эти сигналы служат для того, чтобы МК определял, какой из диапазонов выбран. Когда сигнал DIAP0 подключѐн к «земле», т.е. $DIAP0 = 0$, сигнал V_{in} подключается к сигналу 0,2 В, отмеченному на делителе $R1d$ – $R4d$. При $DIAP1 = 0$ к V_{in} подключается сигнал 1 В, при $DIAP2 = 0$ к V_{in} подключается сигнал 10 В. Если все сигналы (DIAP0, DIAP1 и DIAP2) отключены, т.е. находятся в состоянии «лог. 1» на МК (благодаря слаботочковым подтяжкам к питанию), V_{in} подключается к сигналу 20 В. Номиналы резисторов делителя выбраны так, что на любом диапазоне (0,2 В, 1 В, 10 В и 20 В) при подключении ко входу сигнала с действующим значением напряжения, равным максимальному напряжению диапазона, напряжение V_{in} будет составлять 0,2 В. Вот пример. Пусть на диапазоне 10 В действующее значение напряжения на входе (U_{BX}) будет 10 В. Тогда в точке «10 В» напряжение составит: $U_{10B} = [10 \text{ В} \times (R3d + R4d)] / (R1d + R2d + R3d + R4d) = [(10 \text{ В} \times (0,15K + 0,15K))] / (12K + 2,7K + 0,15K + 0,15K) = (10 \text{ В} \times 3K) / 15K = 0,2 \text{ В}$.

Сигнал V_{in} (с разъѐма XDV) подключѐн к одному из входов сдвоенного ОУ ОРА1642 (3-й вывод DA5.1) через резистор $R3m$. ОУ DA5.1 представляет собой неинвертирующий ОУ с коэффициентом усиления K , равным: $K = R2m / R1m + 1 = 20K / 5K + 1 = 5$. Для баланса токов на входе ОУ резистор $R3m$ должен быть равен: $R3m = R2m \parallel R1m = 4 \text{ K}$, поэтому номинал этого резистора выбран равным 4,02K (из 1%-го ряда E96). Кроме того, этот резистор ещё выполняет роль защиты ОУ от высокого входного напряжения (если, не дай бог, при установке диапазона на 0,2 В на вход ОУ будет подан сигнал с амплитудой 20 В или более, чего автор категорически не советует делать).

Выходной сигнал ОУ DA5.1 (V_{inOPA}) подключѐн ко входу V_{in} DA1 (15-й вывод). Второй ОУ (DA5.2) инвертирует и поднимает сигнал V_{inOPA} на 1,5 В, т.е. с его выхода поступает сигнал $V_{inOPA} + 1,5 \text{ В}$. В этом участвуют резисторы $R4m$ и $R5m$ (поднимают сигнал на 1,5 В вверх), а также резисторы $R6m$ и $R7m$ (инвертируют сигнал с коэффициентом усиления, равным –1). С выхода DA5.2 сигнал поступает на неинвертирующий вход компаратора, построенного на ОУ ТРАД8605 (DA6). А его инвертирующий вход подключѐн к делителю $R8m$ – $R9m$, который подключѐн к напряжению питания (+3 В) и делит его попо-

лам (т.е. до +1,5 В). В результате, если входное напряжение компаратора превышает 1,5 В, его выходное напряжение становится почти равным напряжению питания (+3 В), в противном случае оно составляет почти 0 («земля»). Таким образом, входной синусоидальный сигнал преобразуется в прямоугольный меандр. Это требуется для измерения частоты с помощью МК (см. далее). Выходной сигнал компаратора (F) подключается к двум входам МК DD1 (19-й и 7-й выводы). Конденсаторы $C2m$, $C3m$ и $C5m$ – блокировочные, $C4m$ устраняет ВЧ-составляющую выходного сигнала.

Сигнал V_{out} с выхода DA1 (11-й вывод) подключается к неинвертирующему входу ОУ ОРА735 (DA4) через резистор $R4a$. Этот ОУ включѐн по схеме неинвертирующего усилителя с коэффициентом усиления, равным $KU = R2a / R1a + 1 = 10K / 10K + 1 = 2$. Для сохранения баланса токов на входах ОУ резистор $R4a$ должен быть равен: $R4a = R1a \parallel R2a = 10 \text{ K} \parallel 10 \text{ K} = 5 \text{ K}$. Помимо усиления входного сигнала в 2 раза, ОУ выполняет ещё роль своеобразного интегратора (или ФНЧ) с помощью конденсатора $C2a$, включѐнного в ОС ОУ. Такой интегратор требуется, чтобы существенно снизить пульсации напряжения при измерении средневыпрямленного значения напряжения (при измерении действующего значения напряжения). К выходу DA1 подключаются конденсаторы CAV и $CAV1$, которые исключают подобную пульсацию выходного напряжения DA1). С выхода ОУ DA4 через RC-цепочку $R3a$ – $C4a$ сигнал ADCinA поступает на первый вход АЦП МК (ADC0.1) и одновременно на тестовый разъѐм PLL-02 (XTST), к которому ответным разъѐмом может подключаться кабель, который своей второй стороной может быть подключѐн к цифровому тестеру. Это требуется, например, для установки нуля выходного сигнала ADCinA и вообще для сравнения показания прибора с измеренным значением тестера (см. далее). Таким образом, учитывая, что коэффициенты усиления ОУ DA5.1 и DA4, а также встроенного в DA1 ОУ равны соответственно 5, 2 и 1, получаем, что общий коэффициент усиления сигнала схемы составляет $5 \times 2 \times 1 = 10$. Если, например, на диапазоне 0,2 В действующее значение напряжения будет 0,2 В, то входное напряжение на входе ADCinA МК будет составлять 2 В.

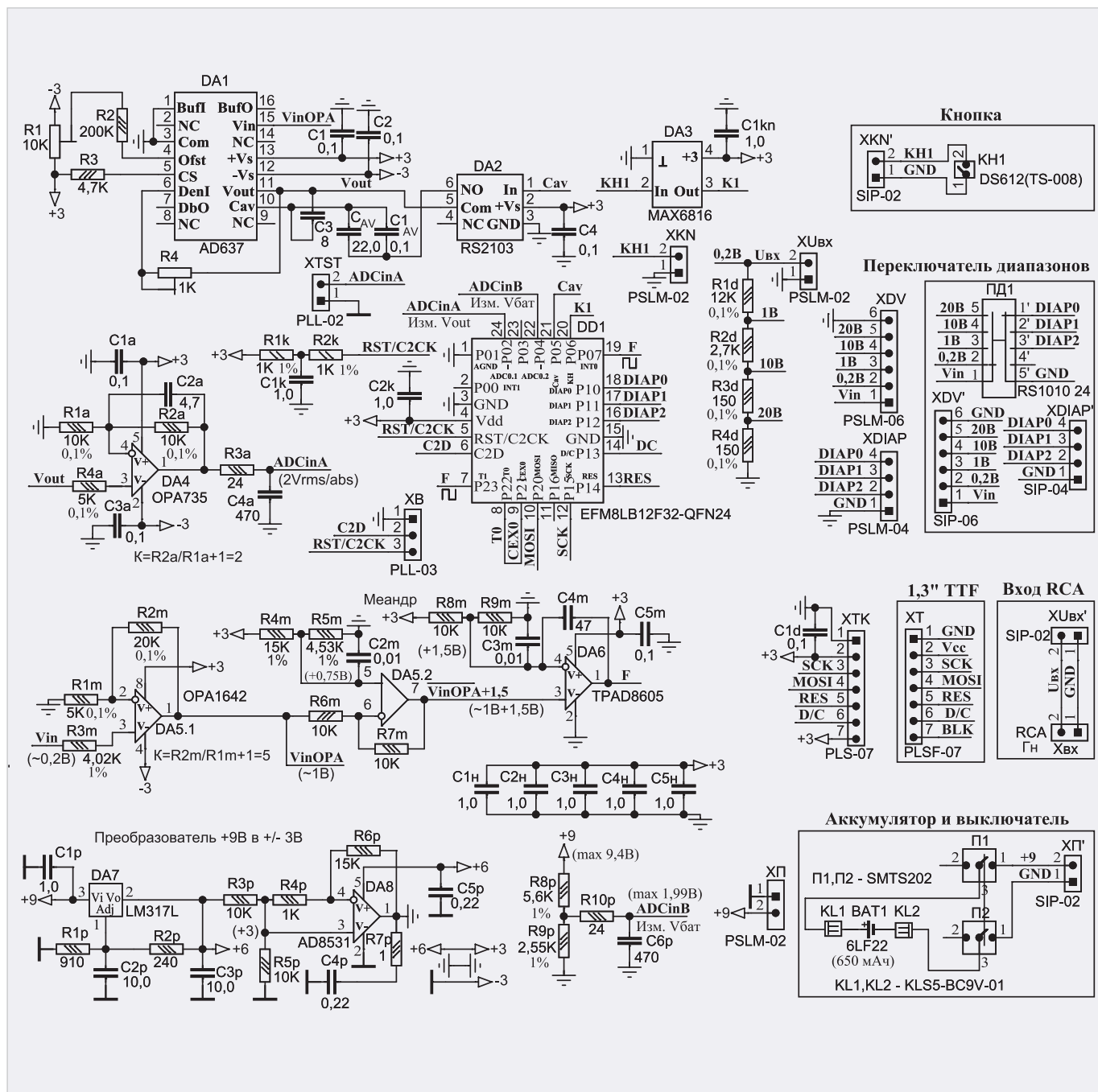


Рис. 1. Принципиальная схема прибора

Максимальное значение напряжения, подаваемого на вход ADCinA, составляет 2,2 В (см. далее), так что АЦП МК будет работать в стандартном режиме и с максимальным разрешением. Конденсаторы C1a и C3a, подключённые к напряжениям питания DA4, – блокировочные.

Для запуска и остановки процесса измерений в приборе предусмотрена кнопка с фиксацией DS612 (KH1 – в верхнем правом пунктирном прямоугольнике схемы), при нажатии (и отпускании) на которую начинается процесс измерений и вывод показаний на экран дисплея, а при следующем нажатии (и отпускании)

кнопки процесс измерений останавливается (например, для переключения диапазонов измерения и в некоторых других случаях). К этой кнопке одним концом припаян кабель, на втором конце которого установлен гнездовой разъём SIP-02 (XKN'), подключаемый к штыревому разъёму PSLM-02 (XKN), расположенному на плате. С этого разъёма сигнал от кнопки (KH1) подключается к микросхеме MAX6816 (DA3), являющейся антидребезговой схемой, которая подавляет дребезг контактов кнопки (Debounce), а сама микросхема называется «Debouncer». С выхода DA3 сигнал K1, очищенный от дребезга, под-

ключается МК (20-й вывод DD1) для анализа. Конденсатор C1kn – блокировочный.

1,3" TTF-дисплей с IPS-матрицей и разрешением 240×240 пикселей сопрягается с МК по интерфейсу SPI на скорости 36 Мбод. Сигналы SPI (SCK и MOSI), управляющие сигналы (RES, D/C и BLK), питание +3 В (Vcc) и «земля» (GND) подключаются к гнездовому разъёму PSLF-07 (XT – в пунктирном прямоугольнике схемы с надписью 1,3" TTF) платы дисплея. Этот разъём подключается к ответному штыревому разъёму платы PLS-07 (XTK на схеме), с которого соответствующие сигналы подключаются к МК. Конденсатор

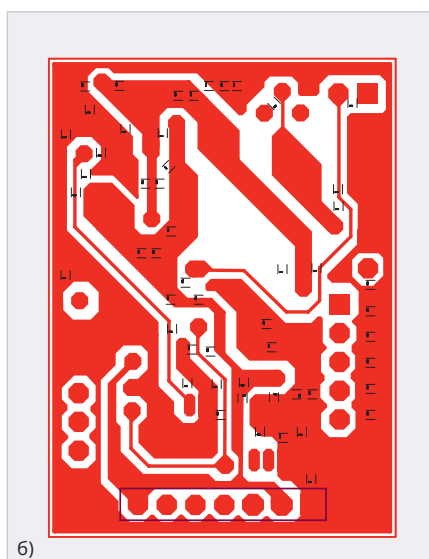
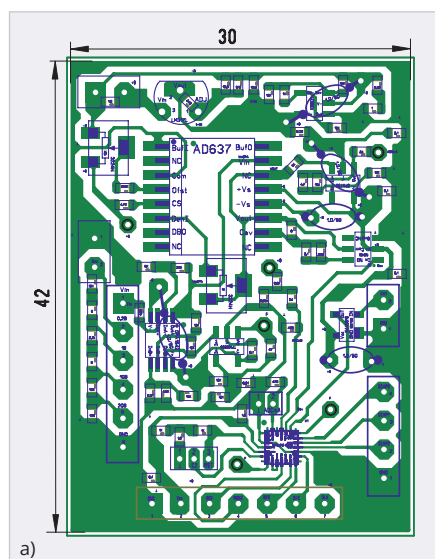


Рис. 2. Разводка платы прибора: а) вид со стороны расположения компонентов; б) вид с обратной стороны

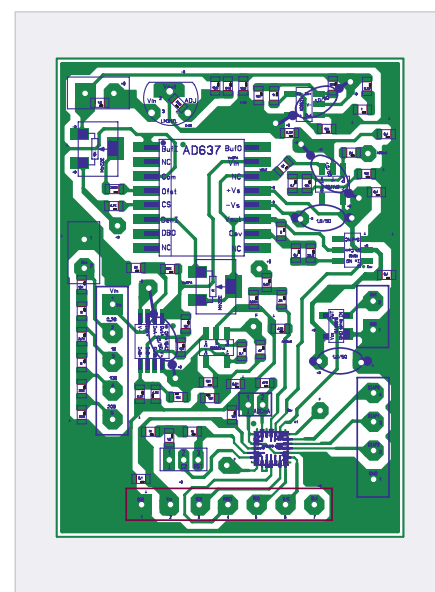


Рис. 3. Укрупнённый вид на МК

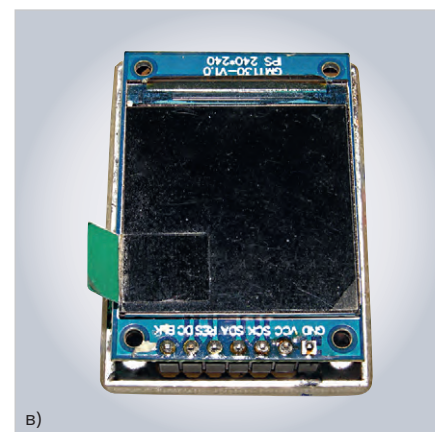
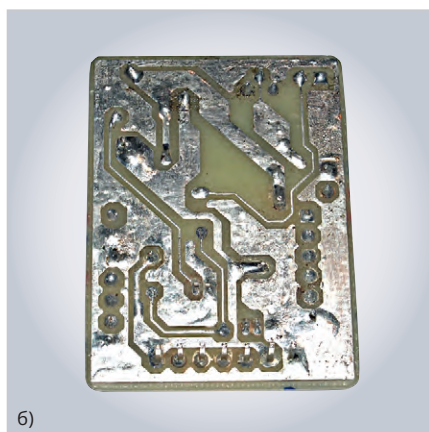
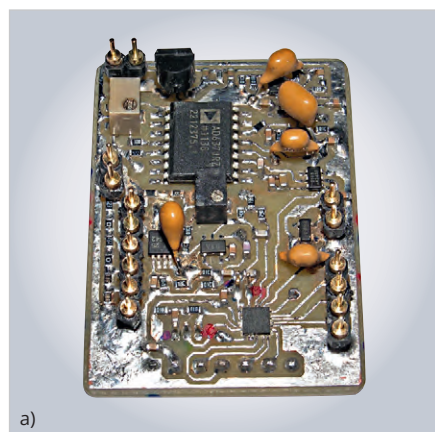


Рис. 4. Общий вид платы прибора: а) вид со стороны расположения компонентов; б) вид с обратной стороны без подключения дисплея; в) вид с обратной стороны с подключённым дисплеем

C1d – блокировочный. Поскольку плата дисплея жёстко закреплена на внутренней поверхности корпуса прибора (см. далее), фактически плата прибора одной своей стороной вставляется с натягом своим разъёмом ХТК в разъём ХТ платы дисплея и достаточно надёжно держится на нём. Противоположная сторона платы прибора приклеена к плате дисплея с помощью двух квадратных пластиковых пластин размером 6×6×3 мм, к которым с двух сторон приклеена пористая лента с двусторонним липким слоем.

Для программирования МК по интерфейсу C2 используется штыревой разъём PLL-03 (ХВ), к которому ответным разъёмом подключается кабель, соединённый с USBDEBUG-адаптером, который, в свою очередь, подключается к интерфейсу USB компьютера. На разъём ХВ выведены сигналы интерфейса C2 – RST/C2CK, C2D и «земля», которые подключаются к выводам

МК (5-й, 6-й выводы DD1). RC-цепочка R1k–R2k–C1k одним концом подключается к напряжению питания (+3 В), а вторым – к 5-му выводу МК (сигнал RST/C2CK). Это требуется для стандартного запуска МК при включении питания (PowerOnReset – POR). Конденсатор C2k – блокировочный.

Питается прибор от аккумулятора 6LF22 (BAT1) форм-фактора «крона» напряжением 9 В и ёмкостью 650 мА·ч (см. нижний правый пунктирный прямоугольник на схеме). К аккумулятору подключаются клеммы KLS5-BC9V-01 (KL1, KL2), предназначенные для этого аккумулятора. Включение питания осуществляется двухканальным и двухпозиционным выключателем SMTS-202 (П1, П2), к которому одним концом припаян кабель, на втором конце которого установлен гнездовой разъём ХП, который, в свою очередь, подключается к штыревому разъёму PSLM-02 (ХП), расположенному на

плате. Для получения двуполярного питания +3 В...–3 В (оно требуется для работы прибора) используется регулируемый стабилизатор LM317L (DA7) и резистивный делитель напряжения R2p–R1p, номиналы которых подобраны так, чтобы выходное напряжение стабилизатора составляло 6 В. Конденсаторы C1p–C3p – блокировочные. Далее с помощью схемы формирователя искусственной земли (или преобразователя однополярного напряжения в двуполярное), построенного на базе ОУ AD8531 (DA8), резисторов R3p–R6p и RC-цепочки R7p–C4p напряжение 6 В преобразуется в +3 В, искусственную «землю» (перевёрнутая «ёлочка») и –3 В. Максимальный ток ОУ AD8531 составляет 250 мА, что в 5 раз больше тока, потребляемого прибором (около 50 мА). Таким образом, максимальное время непрерывной работы прибора от аккумулятора составляет: 650 мА·ч / 50 мА = 13 часов.



Рис. 5. Прибор в корпусе:

а) без крышки; б) с защёлкнутой крышкой (дно прибора)

Рис. 6. Общий вид работающего прибора

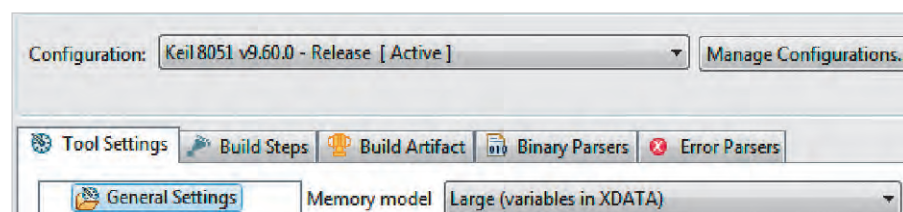


Рис. 7. Конфигурация транслятора C51

Но аккумулятор требуется подзаряжать в зависимости от степени его разрядки. А для определения степени разрядки аккумулятора используется делитель напряжения R8p–R9p и стандартная RC-цепочка R10p–R6p, которая используется для подключения измеряемого напряжения к АЦП МК – сигнал ADCinB, который подключается к ADC0.2 (22-й вывод DD1). Номиналы резисторов подобраны таким образом, чтобы при максимальном напряжении аккумулятора (около 9,4 В) напряжение с делителя не превышало 2,2 В. Это напряжение разбито на три части, и в зависимости от его значения на экран дисплея выводится рисунок аккумулятора с 3 сегментами. Если горят все 3 сегмента, то аккумулятор полностью заряжен, если не горит ни один сегмент, то аккумулятор разряжен и нуждается в подзарядке. Пороги этих трёх напряжений будут описаны далее в программных средствах.

Выводные конденсаторы C1н–C5н – блокировочные, кроме того, их выводы припаяны с двух сторон платы к соответствующим контактным площадкам. То есть они выполняют роль металлизации отверстий, которая в

домашних условиях весьма проблематична и поэтому исключена (рис. 1).

Разводка и внешний вид платы прибора

Разводка платы прибора (рис. 2, рис. 3) сделана автором с помощью программы SprintLayout 6.0. Файл разводки в формате *.lay6 приведён в дополнительных материалах к статье на сайте журнала. На рис. 2а чёрными кружками отмечены контактные площадки, в отверстия которых необходимо вставить медный лужёный провод и пропасть его с двух сторон платы, чтобы не делать металлизацию отверстий (см. выше). Кроме того, выводы всех разъёмов, микросхемы стабилизатора и выводных конденсаторов необходимо пропасть с двух сторон платы. Плата сделана на стеклотекстолитовой пластине толщиной 1,5 мм с двусторонним медным покрытием размером 42×30 мм (рис. 4).

Конструкция прибора

Прибор расположен в пластиковом корпусе AK-S-38 размером 92×58×31 мм (рис. 5, рис. 6). Плата дисплея с укрепленной на ней платой прибора приклеена к внутренней стороне корпу-

са каплями термоклея (рис. 5а). Для дисплея в корпусе прорезано прямоугольное окно по размерам видимой части экрана дисплея (рис. 6). Кнопка вставлена с натягом в прямоугольное окно, прорезанное на лицевой стенке прибора. Переключатель диапазонов укреплен на лицевой стенке прибора через отверстие и зажат гайкой. На лицевой поверхности корпуса на шток переключателя надета и укреплена винтом ручка, с помощью которой осуществляется выбор диапазонов измерений (рис. 6). Хотя на нижней металлической части ручки выгравирована метка, она плохо заметна, если на прибор смотреть несколько сбоку. Поэтому на верхней поверхности ручки маркером дополнительно нарисована точка чёрного цвета (рис. 6). Выключатель питания укреплен на лицевой стенке прибора через отверстие и зажат гайкой. Разъём RCA укреплен на передней боковой стенке прибора через отверстие и зажат гайкой. Аккумулятор укреплен в нижней части прибора рядом со стенкой, для чего к внутренней поверхности лицевой стенки прибора приклеена L-образная пластиковая пластина (рис. 5а). Чтобы корпус не скользил, к его крышке, являющейся дном прибора, приклеены самоклеящиеся резиновые ножки (рис. 5б). Кроме того, в крышке прорезано овальное окно как раз над разъёмом USB Type-C аккумулятора, чтобы его заряжать, не открывая крышку (рис. 5б). Кабели от переключателя диапазонов пропущены через экран из сви-



Рис. 8. Общее меню настроек периферийных устройств МК

тых между собой медных лужёных жил. Экран соединён с «землёй». Он сверху обмотан фторопластовой лентой, использующейся для герметизации стыков труб (ФУМ-лента). Кабель от разъёма RCA до прибора также является коаксиальным с внешним слоем изоляции из ПВХ. Экран кабеля также соединён с «землёй». Цифровые значения напряжений 4 диапазонов (0,2 В, 1 В, 10 В и 20 В) напечатаны на прозрачной пленке (зеркально), которая выдержана в атмосфере дихлорметана в течение часа (так же как и фотошаблон для изготовления печатной платы). Далее эта пленка напечатанной стороной приклеена к лицевой поверхности корпуса тонкой лентой белого цвета с двусторонним липким слоем (рис. 6). Таким образом, стереть надпись на пленке при всём желании невозможно, так как эта надпись расположена на обратной стороне прозрачной плёнки.

Программные средства

Программа в уже загрузочном формате приведена в дополнительных

материалах на сайте журнала, однако для тех, кто хочет самостоятельно написать свою программу, ниже приведены некоторые её ключевые моменты.

Программирование МК проводилось в среде Simplicity Studio v.4 от компании Silicon Labs на языке Keil 8051 v9.60. Использовалась Large Memory Model, когда переменные располагаются во «внешней» памяти XDATA (рис. 7).

Вначале необходимо настроить все периферийные устройства МК, которые используются в программе. В общем меню настроек (рис. 8) галочками отмечены те периферийные устройства, которые используются.

В самом начале необходимо выбрать внутренний высокоскоростной генератор (HFOSC1) частотой 72 МГц, делитель частоты генератора, равный 1, чтобы системная тактовая частота (SYSCLK) была равна 72 МГц и скорость чтения флеш-памяти менее 75 МГц (рис. 9), иначе все дальнейшие настройки будут давать ошибки.

HFOSC 0/1 a)	
Property	Value
High Frequency Oscillator Control	
24.5 MHz Oscillator (HFOSC0)	On When Needed
72 MHz Oscillator (HFOSC1)	Always On

Clock Control 6)	
Property	Value
Clock Select	
SYSCLK	72.000 MHz
Select Clock Source	Internal High Frequenc...
Clock Source Divider	SYSCLK / 1

Core B)	
Property	Value
Prefetch Engine Control	
Flash Read Timing	SYSCLK is below 75 MHz

Рис. 9. Выбор генератора (а), системной тактовой частоты (б) и скорости чтения флеш-памяти (в)

Properties of ADC 0	
ADC 0	Autoscan
Property	Value
View	
View	Advanced
Enable	
Enable ADC	Enabled
Control	
Start of Conversion	Write to 1 of ADBUSY
Resolution	14-Bit mode
Result Shift and Justify	Right justified
Input Selection	
Positive Input Selection	ADC0.1 (P0.2)
Analog Ground Reference	P0.1 / AGND pin
Enable Temperature Sensor	Disabled
Voltage Reference	
Select Voltage Reference	Internal VREF
Reference Voltage	1.65
Gain Control	0.75x gain
Full Scale Voltage	2.200
Clock Configuration	
Select ADC Clock	SYSCLK
ADC Clock Divider	4 (0x4)
SARCLK Frequency	18.000 MHz
Power Control	
Enable Low Power Mode	Disabled
Enable Idle Powered-off	Always on
Throughput	
Conversion Time	833.333 ns
Conversion Tracking Time Settling	4 (0x4)
Conversion Tracking Time (Actual)	222.222 ns
Minimum Tracking Time	0 s
Total Conversion Time	1.167 us
Maximum Throughput	857.143 ksps
Accumulator Configuration	
Repeat Count	1 conversion
Enable Preserve Accumulator	Disabled
Window Compare	
Greater-Than Value	65535 (0xFFFF)
Less-Than Value	0 (0x0)

Рис. 10. Настройка АЦП ADC0

Самым первым устройством в меню настроек (рис. 8) является АЦП (ADC0), который необходимо настроить в соответствии с рис. 10. Здесь необходимо обратить внимание, что АЦП разрешён (Enabled), применён 14-разрядный режим работы (14-Bit Mode), для измерения напряжения используется канал ADC0.1 (порт P0.2), аналоговая «земля» (AGND pin) подключается к порту P0.1, используется внутренний источник опорного напряжения (Internal VREF) с напряжением 1,65 В,

Properties of SPI 0	
SPI0	FIFO
Property	Value
View	Advanced
Control	
SPI Enable	Enabled
Bus Mode (Master)	Master 3-wire mode
Configuration	
SPI Mode	Master
Clock Phase	Data sample on first edge
Clock Polarity	High in idle state
Clock Rate	
SYSClk	72.000 MHz
SPI Clock Frequency (Actual)	36.000 MHz
SYSClk Divider Coefficient (SPID)	0 (0x0)
SPIO Pin Configuration	
Select Master Data Input	Crossbar
Select Slave Clock Input	Crossbar
Select Slave Data Input	Crossbar

SPI 0	
☒ Clock / Data	
SPIO_SCK	P15
SPIO_MISO	P16
SPIO_MOSI	P20
SPIO_NSS	

Рис. 11. Настройка интерфейса SPI:
а) настройка режима работы;
б) порты работы (выводы) SPI

PCA 0 Setup	Channel 0	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Property	Value			
PCA Counter/Timer Run Control	Start			
PCA Counter/Timer Configuration				
PCA Clock Frequency	6.000 MHz			
PCA Clock Period	166.667 ns			
PCA Counter/Timer	0 (0x0)			
PCA Counter/Timer Idle Control	Normal			
Enable PCA Counter/Timer Overflow Interrupt	Disabled			
Select PCA Counter/Timer Pulse	SYSClk / 12			
PCA PWM Configuration				
Select Cycle Length	11 bits			
Enable Cycle Overflow Interrupt	Disabled			
PCA Comparator Clear Control				
Clear Comparator Polarity	Low			
Clear Select Comparator	Comparator 0			

PCA 0 Setup	Channel 0	Channel 1	Channel 2	Channel 3
Property	Value			
PCA Control				
Channel Capture/Compare Mode	Frequency Output			
PCA Channel				
Output Frequency	1.000 MHz			
Capture/Compare Flag Interrupt	Disabled			
Capture/Compare Register	768 (0x300)			
CEX0 Output Polarity	Default			
Clock Divider	3 (0x3)			

Рис. 13. Настройка опций программируемого массива счётчиков (PCA):
а) настройка таймера PCA;
б) настройка канала 0 PCA для вывода частоты (Frequency Output) 1 МГц;
в) установка галочки для вывода сигнала PCA0_CEX0 в порт МК (P2.1)

коэффициент усиления внутреннего ОУ (Gain Control) установлен на значение 0,75, что даёт полную шкалу входных напряжений (Full Scale Voltage) 2,2 В. Делитель системной тактовой частоты установлен на 4, что даёт максимальную тактовую частоту АЦП (SARCLK Frequency) 18 МГц. Остальные

External Interrupts	
Property	Value
INT0/INT1 Configuration	
INT0 Polarity	Active high
INT0 Port Pin Selection	P0.7
INT1 Polarity	Active high
INT1 Port Pin Selection	P0.0

External Interrupts	
Property	Value
INT0/INT1 Configuration	
INT0 Polarity	Active low
INT0 Port Pin Selection	P0.7
INT1 Polarity	Active high
INT1 Port Pin Selection	P0.0

Рис. 12. Настройка полярности INT0:
а) высокий уровень; б) низкий

TIMER Setup	TIMER 0/1	TIMER 2	TIMER 3	TIMER 4
Property	Value			
Control 0				
Timer 0/1 Prescale	EXTOSC / 8			
Timer 0				
Mode	Mode 1, 16-bit Counter...			
Timer or Counter	Counter mode (Count si...			
Timer Running State	Stopped			
Timer Switch 1: Run Control	Stop			
Timer Switch 2: Gate Control	Enabled			
Timer 0 Firmware Control				
Timer Start or Stop	TR0 (TC0N4)			
Timer Interrupt Cleared by	By Hardware			
Timer Interrupt Enable Flag	ET0 (IE3)			
Timer Interrupt Pending Flag	IH0 (IC0N5)			
Timer Overflow Flag	TF0 (TC0N3)			
Timer 1				
Mode	Mode 1, 16-bit Counter...			
Timer or Counter	Counter mode			
Timer Running State	Stopped			
Timer Switch 1: Run Control	Stop			
Timer Switch 2: Gate Control	Disabled			
External Interrupt Settings				
INT0 Trigger Sensitivity	Level-triggered			
INT1 Trigger Sensitivity	Level-triggered			

TIMER Setup	TIMER 0/1	TIMER 2	TIMER 3	TIMER 4
Property	Value			
Timer 0 Mode 1: 16-Bit Counter/1				
Timer Init Value	0 (0x0)			
Timer or Counter	Counter mode (Count sk...			
Timer 1 Mode 1: 16-Bit Counter/T				
Timer Init Value	0 (0x0)			
Timer or Counter	Counter mode (Count sk...			

Timers	Property	Value
☒ Timer0 Input	TIMER0_T0	P2.2
☒ Timer1 Input	TIMER1_T1	P2.3

Рис. 14. Настройка опций таймеров/счётчиков T0/T1: а) основные настройки T0/T1; б) нулевые значения при инициализации T0/T1; в) установка галочки для вывода входов T0/T1 в порты P2.2 и P2.3 МК соответственно

параметры АЦП должны быть установлены, как на рис. 10.

Далее в меню (рис. 8) из отмеченных галочками следует настройка интерфейса SPI (рис. 11). Здесь необходимо обратить внимание (рис. 11а), что SPI разрешён (Enabled), используется 3-проводный режим Master, данные тактируются по первому фронту – фаза SPI (Clock Phase – Data Sample on First Edge), а полярность SPI (Clock Polarity – High in Idle State). Необходимо отме-

TIMER Setup	TIMER 0/1	TIMER 2	TIMER 3	TIMER 4
Property	Value			
Control				
Clock Source	SYSClk / 12			
Clock Source Frequency	6.000 MHz			
Clock Source Period	166.667 ns			
Enable Low Byte Interrupt	Disabled			
Mode	One timer, 16-bit auto-r...			
Run Control	Start			
Timer Running State	Timer is Running			
Init and Reload Value				
Target Overflow Frequency	100000			
Timer Init Overflow After	10.000 ms			
Timer Init Value	5536 (0x15A0)			
Timer Reload Overflow Frequency	100.000 kHz			
Timer Reload Overflow Period	10.000 us			
Timer Reload Overflow Period (L...	10.000 us			
Timer Reload Value	63476 (0x1F7C4)			
Timer 3 Control 1				
Select Force Reload	None			
Suspend Timer Synchronization	0 (0x0)			
Timer Overflow for Peripherals Cl...				
ADC0 Conversion Start Signal	100.000 kHz			
SMBus0 SCL Low Timeout	10.000 us			

TIMER Setup	TIMER 0/1	TIMER 2	TIMER 3	TIMER 4
Property	Value			
Control				
Clock Source	Timer 3 Overflows			
Clock Source Frequency	100.000 kHz			
Clock Source Period	10.000 us			
Enable Low Byte Interrupt	Disabled			
Mode	One timer, 16-bit auto-r...			
Run Control	Stop			
Timer Running State	Stopped			
Init and Reload Value				
Target Overflow Frequency	2			
Timer Init Overflow After	500.000 ms			
Timer Init Value	15536 (0x3CB0)			
Timer Reload Overflow Frequency	2.000 Hz			
Timer Reload Overflow Frequency	1.250 kHz			
Timer Reload Overflow Period	500.000 ms			
Timer Reload Overflow Period (L...	800.000 us			
Timer Reload Value	15536 (0x3CB0)			
Timer 4 Control 1				
Select Force Reload	None			
Suspend Timer Synchronization	0 (0x0)			

Рис. 15. Настройка опций таймеров T3/T4: а) таймера T3; б) таймера T4

тить, что если выбрать противоположную полярность (Clock Polarity – Low in Idle State), которая указана в справочном листке (Datasheet) на дисплей, то он работать не будет (автор не сразу это понял). Частота тактирования (скорость обмена) выбрана максимальной и составляет 36 МГц (SPI Clock Frequency (Actual) 36.000 MHz). Далее необходимо поставить галочку в поле Clock/Data, чтобы данные (SPI0_MOSI) и тактовая частота (SPI0_SCK) SPI выводились в соответствующие порты МК (рис. 11б).

Далее необходимо настроить опцию внешних прерываний (рис. 12). Хотя в программе сами прерывания не используются (они запрещены), сигнал INT0 применяется для определённого режима работы таймера T0, что требуется для измерения частоты НЧ-сигналов (см. далее). Высокий уровень сигнала INT0 (Active High, рис. 12а) установлен изначально. Вариант, когда используется низ-

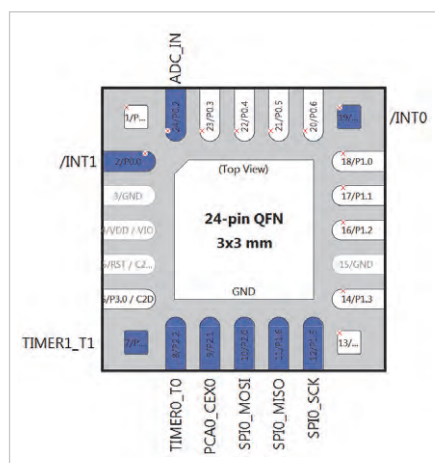


Рис. 16. Настройка портов МК

Properties of P0.2 a)

Property	Value
Settings	
IOMode	Analog I/O
Latch	High
Mask Value	Ignored
Match Value	High
Skip	Skipped
Label	

Properties of P1.5 б)

Property	Value
Settings	
IOMode	Digital Push-Pull Output
Latch	High
Mask Value	Ignored
Match Value	High
Skip	Not skipped
Label	

Properties of P0.7 в)

Property	Value
Settings	
IOMode	Digital OpenDrain I/O
Latch	High
Mask Value	Ignored
Match Value	High
Skip	Skipped
Label	

Рис. 17. Примеры настройки портов МК: а) аналоговые входы (Analog I/O); б) цифровые выходы (Digital Push-Pull Output); в) цифровые входы (Digital OpenDrain I/O)

Port Config

Property	Value
Settings	
Disable Port I/O Weak Pullup	Pull-ups enabled
Enable Crossbar	Enabled
Port 0 Drive Strength	High drive
Port 1 Drive Strength	High drive
Port 2 Drive Strength	High drive
Port 3 Drive Strength	High drive

Рис. 18. Разрешение матрицы соединений (Enable Crossbar)

кий уровень INT0 (Active Low, рис. 12), требуется, чтобы определить значение регистра IT01CF, которое прописано в подпрограмме инициализации устройств (см. далее).

Далее необходимо настроить опции программируемого массива счётчиков (Program Counter Array – PCA) – рис. 13. Здесь необходимо обратить внимание на настройку основного счётчика/таймера PCA Counter/Timer (рис. 13а). Этот счётчик/таймер постоянно работает в режиме автоперезагрузки. При выборе выходной частоты, соответствующей SYSCLK/12, она равна 6 МГц. Прерывания по перезагрузке не требуются, поэтому они запрещены (Disable). Эта частота передаётся на все каналы PCA, в том числе на канал 0 (Channel0 – рис. 13б), который работает в режиме вывода частоты (Frequency Output). При выборе делителя (Clock Divider), равного 3, выходная частота, выводимая с его выхода PCA_CEX0, равна 1 МГц (1.000 MHz). Для того чтобы она выводилась с порта P2.1, необходимо установить галочку в поле PCA0_CEX0 (рис. 13в). Частота 1 МГц требуется для измерения низкой частоты входного сигнала (см. далее). Эта частота подаётся на вход таймера/счётчика T0.

Далее необходимо настроить опции работы таймеров/счётчиков T0/T1 (рис. 14). Здесь следует обратить внимание, что T0/T1 работают в режиме 16-разрядных счётчиков (Counter Mode). Разница заключается в том, что у T0 разрешён Gate Control (Enabled), т.е. счётчик будет считать, если на входе INT0 высокий или низкий уровень (Level-Triggered) в зависимости от полярности INT0 (рис. 12). А у T1 Gate Control запрещён (Disable), т.е. этот счётчик будет считать входные импульсы независимо от состояния INT1 (рис. 14а). Как будет описано далее, оба счётчика применяются для измерения частоты входного сигнала прибора. Инициализированные значения счётчиков – нулевые (рис. 14б). Чтобы сигнал поступал в счётчики T0 и T1 с портов P2.2 и P2.3 соответственно, необходимо установить галочки (рис. 14в).

Далее необходимо настроить опции работы таймеров T3 и T4 (рис. 15). Эти два таймера используются для получения точного времени задержки в полсекунды. Таймер T3 постоянно работает как 16-разрядный таймер в режиме автоперезагрузки (Auto-Reload). Источником входной частоты для него служит SYSCLK/12, т.е. 6 МГц (6.000 MHz). Его выходная частота равна 100 000 Гц, т.е. 100 кГц, которая получается при его инициализированном значении 5536 (рис. 15а). Источником входной

частоты для таймера T4 (рис. 15б) служит выходная частота T3 (Timer3 Overflows). При инициализированном значении T4, равном 15536, его выходная частота (Target Overflow Frequency) будет равна 2 Гц, т.е. время перезагрузки составит полсекунды. В начальном состоянии T4 не запущен (Stop). После запуска по прошествии полсекунды T4 перезагружается, и его необходимо остановить (см. далее), в результате чего получается точная временная задержка в полсекунды.

Далее необходимо настроить порты МК (рис. 16). Для этого с помощью опции Skip все сигналы необходимо передвинуть так, как это установлено на рис. 16. «Сдвинутые» сигналы на корпусе МК обозначены красными крестиками. Порты P0.1, P0.2 и P0.3 необходимо настроить как аналоговые входы (Analog I/O), как, например, на рис. 17а. Порты P0.5, P1.4, P1.5, P1.6, P2.0 и P2.1 необходимо настроить как цифровые выходы (Digital Push-Pull Output), как, например, на рис. 17б. Остальные порты P0.0, P0.3, P0.6, P0.7, P1.0, P1.1, P1.2, P1.3, P2.2 и P2.3 необходимо настроить как цифровые входы (Digital OpenDrain I/O), как, например, на рис. 17в. Такая настройка портов соответствует схеме МК на рис. 1 и укрупнённому виду МК на разводке (рис. 3). Точнее, исходной точкой настройки портов является рис. 16, на основании которого получена схема МК на рис. 1 и укрупнённый вид МК на разводке рис. 3.

И последнее, что следует сделать, – разрешить матрицу соединений (рис. 18), иначе работать ничего не будет. О настройке программного обеспечения более подробно будет рассказано во второй части статьи.

Литература

1. Кузьминов А. Генератор гармонических колебаний звукового диапазона на базе синтезатора частоты AD9837В, микроконтроллера EFM8SB10 и LCD Nokia-5110 с батарейным питанием // Современная электроника. 2023. № 6.
2. Кузьминов А. Распирение возможностей генератора на DDS AD9837 по амплитуде выходного сигнала // Современная электроника. 2026. № 2.
3. Кузьминов А. Новые усовершенствования аудиоусилителя на базе ОУ LM3886, включённого в мостовом режиме работы // Современная электроника. 2025. № 9.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

ИИ впервые создал вакцину, испытанную на людях: технология нацелилась на будущие пандемии

Исследователи из Кембриджского университета впервые провели клинические испытания вакцины, ключевой компонент которой был полностью разработан с помощью искусственного интеллекта. Эксперимент подтвердил безопасность препарата и показал, что он способен вызывать иммунный ответ против широкого спектра коронавирусов, открывая путь к созданию универсальных вакцин, защищающих не только от известных, но и от потенциальных будущих вирусов.

Главная идея разработки заключается в отказе от традиционного подхода, при котором вакцина нацелена на конкретный вариант вируса. Вместо этого искусственный интеллект проанализировал генетические последовательности тысяч представителей семейства сарбековирусов – группы, включающей возбудителей SARS, COVID-19 и многочисленные коронавирусы летучих мышей. Алгоритмы выявили наиболее консервативные участки вирусных белков, практически не изменяющиеся в ходе эволюции,

и именно они стали основой новой вакцины. Такой подход потенциально позволяет обеспечить защиту сразу от целого семейства вирусов, включая те, которые пока не передавались человеку, но могут стать причиной будущих пандемий.

В отличие от широко известных мРНК-вакцин, новая разработка относится к классу ДНК-вакцин. Они обладают рядом практических преимуществ: лучше переносят хранение при обычных температурах, не требуют столь строгой холодовой цепи и могут применяться в странах с ограниченной медицинской инфраструктурой. Кроме того, препарат вводится без использования иглы – специальный инжектор доставляет ДНК через кожу мощной струей жидкости под высоким давлением, что упрощает массовую вакцинацию и делает процедуру менее болезненной.

Первое клиническое исследование показало, что вакцина хорошо переносится добровольцами и стимулирует выработку антител, способных распознавать различные представители семейства сарбековирусов. Однако исследователи подчеркивают, что иммунный ответ пока оказался умеренным. На данном этапе также неизвестно,

насколько продолжительной будет защита и потребуются ли регулярная ревакцинация.

Разработчики рассматривают новую платформу значительно шире борьбы с коронавирусами. Аналогичный подход может использоваться для создания универсальных вакцин против быстро эволюционирующих инфекций, включая сезонный грипп, где ежегодно приходится прогнозировать наиболее вероятные варианты вируса. Перспективной областью применения называют и вирус Эбола: недавние вспышки в Африке показали, что новые штаммы способны обходить существующие вакцины, тогда как универсальный препарат мог бы обеспечить защиту сразу от всей группы родственных вирусов.

Впервые искусственный интеллект не просто помог проанализировать данные, а сыграл ключевую роль в проектировании вакцины, успешно прошедшей испытания на людях. Если дальнейшие исследования подтвердят эффективность такого подхода, ИИ может стать одним из главных инструментов создания универсальных вакцин нового поколения, способных существенно сократить время подготовки к будущим эпидемиям и пандемиям.



РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 3,2 ... 485
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 1,0 ... 470 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 125

Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 3,2 ... 200
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 1,5 ... 60 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 175

Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 2,5 ... 63
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ, 0,033 ... 2 200
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 175

Суперконденсаторы K58-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 2,5 ... 2,7
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф, 1,0 ... 4 700
Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 65

Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В, 5,0 ... 48
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф, 0,08 ... 783
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C -60 ... 65



Россия, 427968, Удмуртская Республика, г. Сарапул, ул. Калинина, 3
Тел.: (34147) 2-99-53, 2-99-89, 2-99-77, факс: (34147) 4-32-48, 4-27-53
e-mail: elecond-market@elcudm.ru, www.elecond.ru



Реклама

Сопряжение контроллеров разных производителей по интерфейсу RS-485

Олег Вальпа

Приведена методика дополнения контроллера одного производителя портами ввода-вывода контроллера другого производителя по интерфейсу RS-485 на основе конкретного проекта, разработанного автором статьи.



Дополнительные материалы к этой статье можно скачать, перейдя по ссылке в QR-коде

Введение

Довольно часто в практике разработчиков автоматических систем управления встречается дилемма выбора контроллера, когда производительный контроллер имеет достаточно ресурсов и органов визуализации и управления, но не имеет достаточного количества портов ввода-вывода. Поскольку не все производители контроллеров заботятся о выпуске дополнительных модулей расширения портов ввода-вывода для своих контроллеров, приходится искать нестандартные решения такой задачи. Здесь рассмотрен простой способ решения подобной проблемы на примере контроллеров разных производителей.

Проект сопряжения

Приведённый здесь проект позволяет выполнить сопряжение контроллеров разных производителей. В качестве ведущего устройства обычно выбирается довольно производительный контроллер, имеющий большой объём памяти, встроенный цветной графический сенсорный дисплей и современные коммуникационные порты. Для данного проекта был выбран контроллер SMH5 компании Segnetics [1]. Внешний вид этого контроллера представлен на рис. 1.

Довольно подробное знакомство с этим контроллером приведено в источнике [2]. При всех неоспоримых достоинствах этого контроллера он имеет ограниченный набор портов ввода-вывода. Это не является его недостатком, просто разработчиками был создан оптимальный продукт. Более того, производители данного контроллера предлагают множество модулей расширения MRL с различным набором портов ввода-вывода. Но данный проект преследует своей целью рассмотреть возможность сопряжения выбранного контроллера с контроллерами других производителей.

В качестве дополнительных контроллеров были выбраны: модуль контроллера и модуль расширения компании АМС-МЗМО [3]. Выбор в пользу этих контроллеров объясняется тем, что они имеют полный и большой набор из 32 портов ввода-вывода.

Модуль расширения (МР) и модуль контроллера (МК), используемые в качестве ведомых устройств, позволяют увеличить количество портов ввода и вывода для систем управления с помощью интерфейса RS-485, используя протокол Modbus.

Питание модулей может осуществляться от источника постоянного или

переменного тока напряжением 24 В с током потребления не более 100 мА.

Модуль МР имеет 32 порта ввода-вывода, в составе которых 8 универсальных аналоговых входов AI1...AI8, 8 дискретных входов DI1...DI8 и 16 дискретных выходов DO1...DO16. Внешний вид модуля МР приведен на рис. 2.

Модуль МК имеет 32 порта ввода-вывода, в составе которых 8 универсальных аналоговых входов AI1...AI8, 8 дискретных входов DI1...DI8, 8 дискретных выходов DO1...DO8 и 8 аналоговых выходов AO1...AO8. Внешний вид модуля МК приведен на рис. 3.

Модули конструктивно размещены в пластиковом корпусе с габаритными размерами 157×86×59 мм, имеющем элементы крепления для установки на DIN-рейку.

Все модули имеют встроенный индикатор зелёного цвета с обозначением «Режим» для контроля подключения питания и индикации активности обмена данными по интерфейсу RS-485.

Карта регистров для портов AI1...AI8, DI1...DI8, DO1...DO8 и AO1...AO8 или DO9...DO16 имеет упорядоченную нумерацию от 0 до 31. Чтение регистров входных портов поддерживается функцией 0x3, а запись в регистры выходных портов поддерживается функцией 0x10 Modbus. Скорость обме-



Рис. 1. Внешний вид контроллера SMH5



Рис. 2. Внешний вид модуля МР



Рис. 3. Внешний вид модуля МК

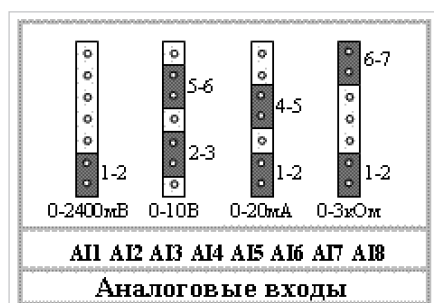


Рис. 4. Перемычки аналоговых входов AI

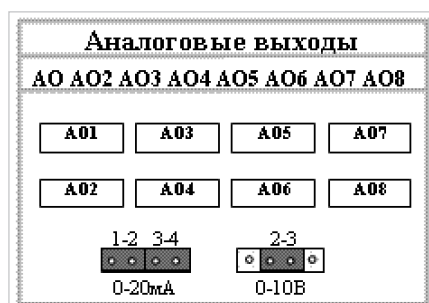


Рис. 5. Перемычки аналоговых выходов AO

Alias	00000	Alias	00010	Alias	00020	Alias	00030
AI1	1023	DI3	1	DO5	0	AO7	255
AI2	1023	DI4	1	DO6	0	AO8	255
AI3	1023	DI5	1	DO7	0		
AI4	1023	DI6	1	DO8	0		
AI5	1023	DI7	1	AO1	255		
AI6	1023	DI8	1	AO2	255		
AI7	1023	DO1	0	AO3	255		
AI8	1023	DO2	0	AO4	255		
DI1	1	DO3	0	AO5	255		
DI2	1	DO4	0	AO6	255		

Рис. 6. Окно проверки МК

Alias	00000	Alias	00010	Alias	00020	Alias	00030
AI1	1023	DI3	1	DO5	0	DO15	0
AI2	1023	DI4	1	DO6	0	DO16	0
AI3	1023	DI5	1	DO7	0		
AI4	1023	DI6	1	DO8	0		
AI5	1023	DI7	1	DO9	0		
AI6	1023	DI8	1	DO10	0		
AI7	1023	DO1	0	DO11	0		
AI8	1023	DO2	0	DO12	0		
DI1	1	DO3	0	DO13	0		
DI2	1	DO4	0	DO14	0		

Рис. 7. Окно проверки МР

на по интерфейсу RS-485 для обоих модулей составляет 9600 бод. Формат данных: 8 бит, 1 стоп, без паритета.

Смена адреса в модуле осуществляется функцией 0x6 Modbus путём записи нового значения адреса модуля в регистр с адресом 9999.

Входные порты DI1...DI8 имеют оптронную развязку с резистивным

ограничением проходящего через них входного тока не более 8 мА от внутреннего источника питания 24 В. В разомкнутом состоянии все входы DI1...DI8 имеют значение логической единицы. При замыкании любого входа DI1...DI8 на общую цепь GND через оптрон протекает ток 8 мА, и выходной сигнал оптро-

на формирует сигнал логического нуля для этого входа.

Входные порты AI1...AI8 настраиваются внутренними переключателями модулей в режим измерения: сопротивления, напряжения или тока. На рис. 4 приведено соответствие переключателей аналоговых входов режимам измерений.

В зависимости от разрядности АЦП входной сигнал будет преобразовываться в цифровое значение от 0 до 1023 для 10-разрядного АЦП или в цифровое значение от 0 до 4095 для 12-разрядного АЦП.

Выходные порты AO1...AO8 настраиваются внутренними переключателями модулей в режим формирования выходного напряжения 0–10 В или тока 0–20 мА. На рис. 5 приведено соответствие переключателей аналоговых выходов режимам выходного сигнала.

Максимальному значению выходного сигнала АО соответствует цифровое значение 255 применённого в модуле 8-разрядного ЦАП.

Выходные порты DO1...DO16 имеют коммутационный элемент в виде симистора BT134-600D или в виде твердотельного реле PVT312L, в зависимости от модели модуля. Логический сигнал нуля отключает, а логический сигнал единицы включает выход порта DO. Симистор позволяет управлять мощной нагрузкой с переменным напряжением питания, а твердотельное реле способно управлять слаботочной нагрузкой с постоянным и переменным напряжениями питания.

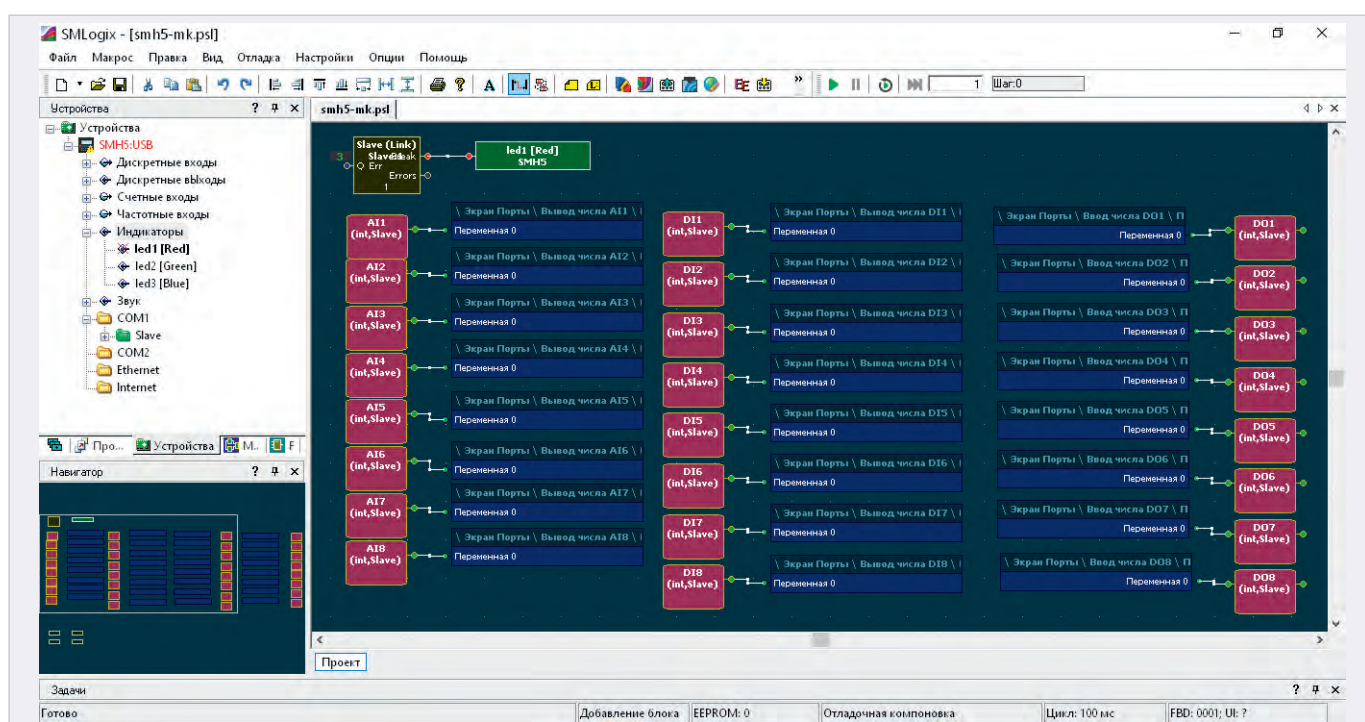


Рис. 8. Внешний вид среды разработки SMLogix

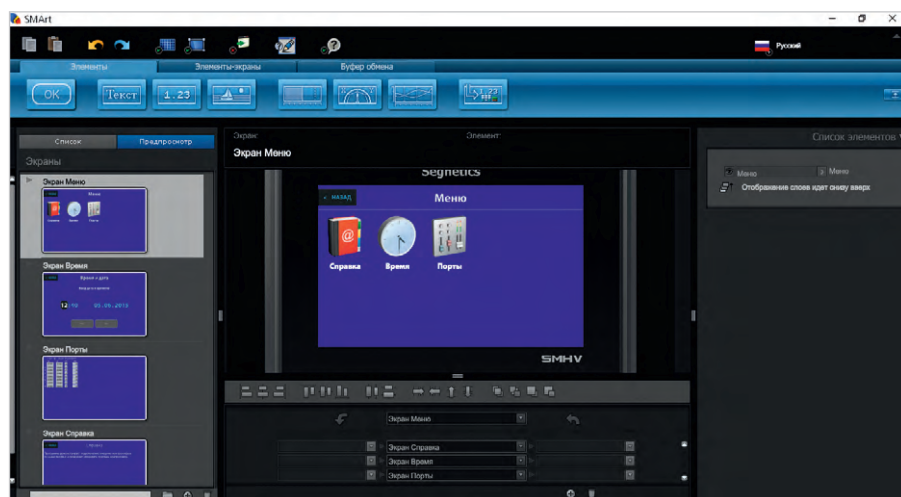


Рис. 9. Интерфейс программы

Таблица. Основные технические характеристики модулей МК и МР

Модуль	Количество портов: AI+DI+DO+AO	Разрядность АЦП	Выходной элемент портов DO	Тип процессора
МК	8+8+8+8	10	BT134-600D	LPC2148
МР	8+8+16+0	10	BT134-600D	ATmega8
МК2	8+8+8+8	10	PVT312L	LPC2148
МР2	8+8+16+0	10	PVT312L	ATmega8
МК3	8+8+8+8	12	BT134-600D	LPC2148
МР3	8+8+16+0	12	BT134-600D	STM32

В табл. 1 приведены основные технические характеристики модулей МК и МР.

Такой богатый набор портов модулей позволяет использовать их в качестве ведомых устройств управления в самых разнообразных системах автоматизации, создаваемых на базе персональных компьютеров, панелей операторов, контроллеров с дисплеем и прочих устройств.

Кроме того, модуль МК имеет опциональную возможность дополнения интерфейсом RS-232 и Ethernet с помощью встраиваемых submodule. Использование данных интерфейсов возможно в случае применения МК в качестве ведущего устройства с соответствующей программой.

Простую предварительную проверку работоспособности модулей легко выполнить с помощью любого компьютера, подключив к нему модуль МК или МР через преобразователь USB-RS485 и запустив на компьютере программу Modbus Poll. Внешний вид программных окон для каждого из модулей приведён на рис. 6 и рис. 7.

Готовые файлы для программы Modbus Poll с заполненными полями названий регистров для модулей МК и МР можно скачать с сайта редакции журнала.

Программа проекта

Для сопряжения мощного контроллера SMH5 с контроллером МК и МР была разработана специальная программа на языке функциональных блоков FBD в среде разработки SMLogix [4]. Данная среда свободно предоставляется компанией производителей контроллеров SMH5 разработчикам. Знакомство с данной средой разработки приведено в источнике [5].

Внешний вид среды разработки с программой проекта представлен на рис. 8.

Интерфейс программы разработан с помощью встроенного в среду разработки программного инструмента SMArt и представлен на рис. 9.

Интерфейс состоит из нескольких окон, на которых располагаются графические элементы, программные органы управления и индикации, а также справочные тексты. Внешний вид главного окна программы представлен на рис. 10.

Это окно содержит графические элементы меню для справки, настройки времени и отображения портов подключённых контроллеров. Окно портов ввода-вывода приведено на рис. 11.

В этом окне можно наблюдать за изменением значений входных портов и задавать произвольные значения для выходных портов подключённого контроллера. Количество

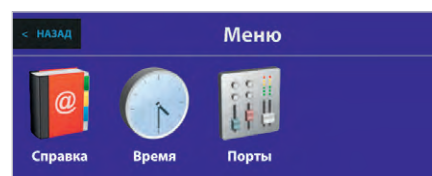


Рис. 10. Главное окно программы

	ПОРТЫ КОНТРОЛЛЕРА			
	AI	DI	DO	AO
1	0000	0000	0	0
2	0000	0000	0	0
3	0000	0000	0	0
4	0000	0000	0	0
5	0000	0000	0	0
6	0000	0000	0	0
7	0000	0000	0	0
8	0000	0000	0	0

Рис. 11. Окно портов ввода-вывода

подключаемых портов определяется требованиями разрабатываемой системы управления.

Диспетчеризация

Поскольку контроллер SMH5 имеет необходимые свободные интерфейсы RS-485 и Ethernet, с их помощью можно легко организовать диспетчеризацию системы управления. В приведённом проекте уже заложены регистры с картой памяти, которые позволяют дистанционно собирать информацию о состоянии всех портов контроллеров по интерфейсу RS-485 или Ethernet и отображать её на персональном компьютере.

Кроме того, можно воспользоваться встроенной в контроллер функцией VNC с заводским паролем «segnetics» и получить на удалённом устройстве дубликат графического дисплея контроллера системы управления шлюзом.

Файл проекта можно загрузить с сайта редакции журнала.

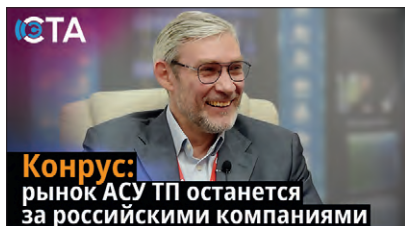
Заключение

Подобным образом можно сопрягать контроллеры разных производителей, используя преимущества каждого контроллера в отдельности и объединяя их для создания автоматических систем управления различными объектами.

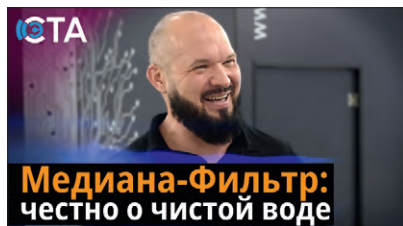
Литература

1. URL: <https://segnetics.com>.
2. URL: <https://segnetics.com/ru/smh5>.
3. URL: <https://www.laminar.ru/product/sistema-upravleniya-kchp/avtomatika/>.
4. URL: <https://www.segnetics.com/ru/smlogix>.
5. Вальна О. Программирование логических контроллеров // СТА. 2025. № 1. С. 18.

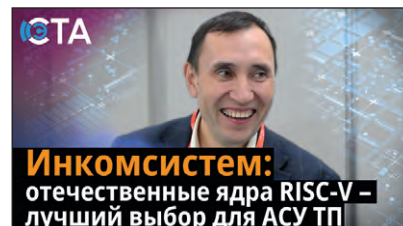




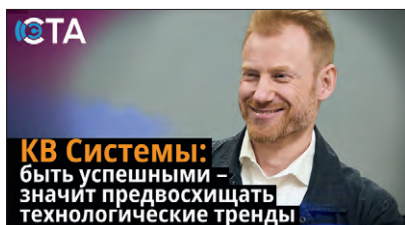
Интервью с Алексеем Турундаевым –
генеральным директором АО НПП «Конрус»



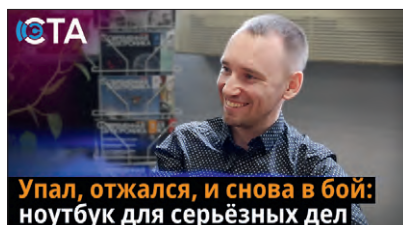
Интервью с Владимиром Смирновым –
генеральным директором
и с Андреем Саловым –
заместителем главного инженера,
АО «НПК Медиана-Фильтр»



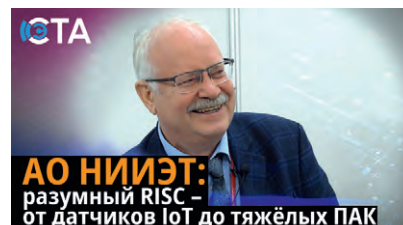
Интервью с Александром Тяплашкиным –
директором по разработке и
технологическому развитию департамента
ПТК АО НИЦ «ИНКОМСИСТЕМ»



Интервью с Николаем Калугиным –
руководителем направления по НТР,
ООО «KB Системы»



Интервью с Александром Кузнецовым –
бренд-менеджером по направлению
защищённые и мобильные решения,
ПРОСОФТ



Интервью с Иваном Фефиловым –
Советником генерального директора
АО «НИИЭТ»

СМОТРИТЕ НА КАНАЛЕ СЭТА



СЛУШАЙТЕ В ПОДКАСТЕ СЭТА



Инновационные технологии для повышения противопожарной надёжности АКБ и РЭА

Андрей Кашкаров

Тушение возгораний аккумуляторных батарей (АКБ), особенно литий-ионных, является актуальной проблемой из-за растущего распространения аккумуляторов в различных сферах жизни: от бытовой электроники до транспортных систем и систем хранения энергии. Системы пожаротушения литиевых АКБ развиваются параллельно с электромобилями. Тем не менее перспективы применения систем пожаротушения намного шире и охватывают полный спектр электронных устройств и АКБ разного назначения. В статье рассказывается об инновационной российской технологии, а также об известных и применяемых способах безопасной эксплуатации АКБ.

Причины возгораний литий-ионных АКБ

Обеспечение безопасной эксплуатации литиевых аккумуляторов – серьёзная проблема, над ней работают в разных странах мира. В частности, из открытых результатов исследований вызывают интерес анализы состояния аккумуляторов в случае перезаряда, короткого замыкания, механического повреждения и внешнего огневого воздействия. Особенностью является их весьма высокая пожароопасность и взрывоопасность. Самовоспламенение литий-ионных батарей – весьма распространённое явление. При этом тушение возгораний литиевых АКБ затруднено, а иногда и невозможно с использованием воды, водопенных или порошковых огнетушащих соста-

вов, поскольку очаг возгорания литий-ионных АКБ отличается очень высокой температурой.

Исследования проблемы постоянно проводятся как в международных компаниях, таких как FM Global, GWL, так и в России, к примеру, в корпорации «Росатом Химия», ОА «ТВЭЛ», компании «Элехим».

Особенности химических составов АКБ

Сегодня распространены литий-полимерный (Li-Pol); литий-никель-марганец-кобальт-оксидный (LiNiMnCoO_2 , NMC); литий-титанатный ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO); литий-железо-фосфатный (LiFePO_4 , LFP) типы аккумуляторов. Литий-ионные элементы состоят из катода (оксид лития-кобальта, литий-железо-фосфат или оксид

лития-марганца и литий-никель-марганец-кобальта в качестве положительных электродов) и анода (отрицательный электрод: пористый углерод), когда графит является наиболее часто используемым материалом.

Наибольшую пожарную опасность представляют Li-Pol- и NMC-аккумуляторы (рис. 1).

Параметры различных литий-ионных аккумуляторов приводят к выводу, что варианты исполнения LTO и LFP представляют наименьшую пожарную опасность.

На инфографике (рис. 2) показано распределение основных характеристик литий-ионных аккумуляторов.

В современных аккумуляторах количество «чистого» лития мало (2–3% от общей массы ячейки), в среднем 0,08 г на 1 Вт/ч энергии или 80 г на 1 кВт/ч. Такую массу называют эквивалентным содержанием лития (LEC).

На рис. 3 показано распределение состава аккумуляторной батареи электромобиля (тип NMC).

Аккумуляторные батареи электромобилей способны запасать номинальную энергию 40–100 кВт/ч, при этом их масса составляет 300–600 кг. Суммарная масса лития в таких батареях составит приблизительно 3,2–8 кг. Остальная масса батареи –

Вид испытаний	Тип аккумулятора			
	Li-Pol	NMC	LTO	LFP
	Результаты испытания			
Перезаряд/Внешнее короткое замыкание	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вскрытие предохранительного клапана с выбросом электролита без воспламенения	Вздутие корпуса со вскрытием предохранительного клапана без воспламенения
Сквозное механическое повреждение корпуса	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Вздутие корпуса с последующим выбросом газа и воспламенением	Выброс электролита без воспламенения	Вздутие корпуса с выбросом дыма, внутреннее тление
Вывод	Высокая пожароопасность	Высокая пожароопасность	Низкая пожароопасность	Средняя пожароопасность

Рис. 1. Результаты испытаний различных типов литиевых АКБ

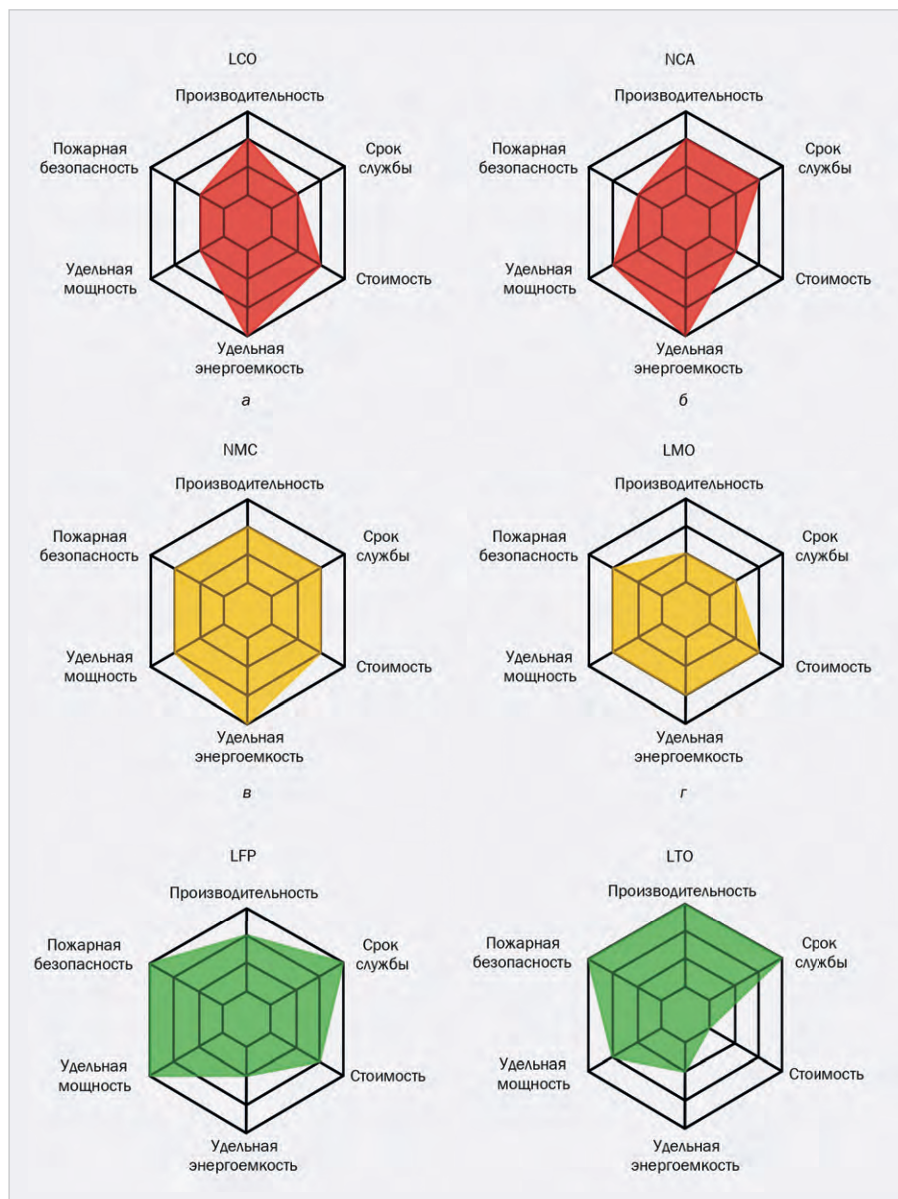


Рис. 2. Распределение основных характеристик литий-ионных аккумуляторов: а – литий-кобальтовые; б – литий-никель-кобальт-алюминий-оксидные; в – литий-никель-марганец-кобальт-оксидные; г – литий-марганцево-оксидные; д – литий-железо-фосфатные; е – литий-титанат-оксидные

это алюминий, графит, никель, медь, пластик и другие материалы.

В небольших АКБ суммарное содержание лития всех элементов не превышает 500 г, а номинальная энергия не более 6200 Вт/ч. Для небольших АКБ на 1 Вт/ч энергии приходится примерно 0,08 г лития.

Большинство литий-ионных батарей не имеет в своём составе пожароопасного металлического лития в чистом виде. Литий присутствует в виде солей (соединения, получаемые из карбоната лития) как часть электролита и катода (анода) аккумулятора. Растворы гексафторфосфата лития LiPF_6 используются в электролите аккумуляторной батареи, оксид лития-кобальта (LiCoO_2) или феррофос-

фат лития (LiFePO_4) – материал катода, а пентатитанат лития ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$) – материал анода.

Механизм теплового разгона

Общий вид системы пожаротушения электромобилей разработки компании Rosenbauer показан на рис. 4. На рис. 5 представлен принцип подачи воды на тушение батареи.

Распыление воды считается доступным экономичным и экологически безопасным способом тушения аккумуляторов, обеспечивает высокую эффективность охлаждения, подавляя процесс саморазгона соседних ячеек в аккумуляторной сборке и даже их взрыв. Пожары с участием литий-ион-

ных аккумуляторов считают сложными ввиду повторных возгораний батарей. Это связано с тем, что стандартные способы тушения позволяют снизить температуру в месте горения и временно приостановить химическую реакцию с выделением тепла, но процесс тления во внутреннем корпусе повреждённых ячеек остановить полностью не удаётся.

В результате через некоторое время потушенный очаг вновь переходит в активную фазу горения. Однако тушение водой очага возгорания LFP аккумуляторов нежелательно, ибо в результате химической реакции гексафторфосфата лития LiPF_6 с водой выделяется токсичный газ (фтористый водород HF) в диапазоне от 20 до 200 мг/Вт/ч номинальной энергоёмкости батареи.

Огнетушащие средства в виде сухих порошков, углекислого газа (CO_2) и хладагona (гептафторпропан или HFC-227) уменьшают последствия развития теплового разгона, но не препятствуют гарантированно повторному возгоранию. Сухие порошки для всех условий возгорания по классификации АВСЕ обладают менее выраженным охлаждающим эффектом, чем CO_2 и HFC-227, а использование пены действительно охлаждает и изолирует поверхность горения, хотя и не обеспечивает длительную защиту из-за разрушения внутренних элементов за счёт выброса струй горючего газа при выгорании ячейки литий-ионных АКБ.

В сравнении с этим более надёжный способ – применение микрокапсул для самозатухания возгорания литий-ионных аккумуляторов в период их теплового разгона.

Способ апробирован введением термочувствительных микрокапсул в электролит и полиэтиленовый сепаратор АКБ, уже содержащих огнетушащее вещество Novec 7300 (HFE-7300) в виде жидкости, окружённой внешним слоем полиметилметакрилата (ПММА). При высокой температуре, превышающей 120°C , ПММА разрушается и высвобождает жидкость, активно поглощающую тепло. Это позволяет в критической ситуации снизить температуру литий-ионной ячейки до 74% от стандартного значения. Система по функционалу получила название микрокапсулирования.

Другим эффективным способом тушения литий-ионных АКБ стало

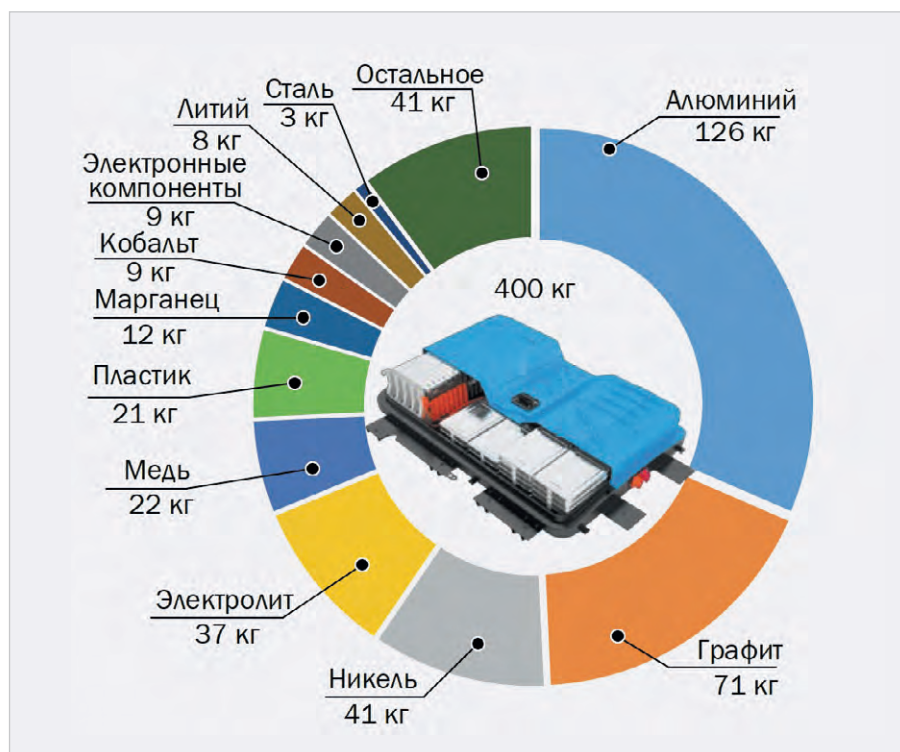


Рис. 3. Распределение состава аккумуляторной батареи электромобиля (NMC)

применение водной дисперсии вермикулита (AVD) в виде мелких частиц размером менее 0,18 мм. Состав дисперсии в пропорции 17% вермикулита и 83% очищенной воды. При распылении состава AVD на литий-ионную ячейку вода охлаждает зону горения, а вермикулит моментально высыхает, образуя плёнку, отделяющую доступ кислорода в очаг возгорания. На рис. 6 представлен самый простой способ применения противопожарного полотна для тушения автомобиля, а также проиллюстрирован разный характер температурного нагрева очага возгорания – автомобиля до и после применения противопожарного полотна.

Существующие методы тушения и их эффективность

Для устранения имеющихся пробелов в нормативной литературе интересен опыт других стран по тушению очагов возгорания литий-ионных аккумуляторов. Во многих странах Европы, Северной Америки и в КНР проблема тушения литий-ионных пожаров обозначена остро. В разных странах применяют как свои стандарты, так и технические регламенты по требованиям пожарной безопасности и правила противопожарного режима. В стандартах, как правило, дано разграничение между большими и небольшими аккумуляторными сборками.

Горение элементов литий-ионных аккумуляторов рассматривают как возгорание «смешанных» классов: А (горение твёрдых веществ), В (горение жидких веществ); С (горение газообразных веществ); Е (пожары электрооборудования, находящегося под напряжением).

Разные разработанные ранее способы тушения возгораний имеют специфические особенности и выбираются в зависимости от типа и количества литий-ионных аккумуляторов, условий эксплуатации, хранения и транспортировки. Для тушения литий-ионных аккумуляторов используют воду, водную дисперсию вермикулита (AVD), химические и сухие порошки (аэрозоли), углекислый газ (CO_2), аэрозоли, пены-хладоны, специализированные составы HFC-227, Novec 1230, F-500, специальное гелеобразное огнетушащее вещество SB 1500 Plus производства России, применяемое в автоматических и ручных системах пожаротушения низкого и высокого давления, а также огнетушащие микрокапсулы.

Выбор типа и количества огнетушащего вещества зависит от размеров аккумуляторных сборок и их типов, особенностей хранения, транспортировки и области применения.

Среди приведённых в пример устройств применяют модули порошкового пожаротушения (МПП), «самосрабатывающие» автономные устройства в виде дисков и шарообразной формы с огнетушащим порошком, пожарные гранаты, порошковые огнетушители, противопожарные ампулы, срабатывающие без участия человека в виде стеклянных капсул (в том числе вбрасываемые).

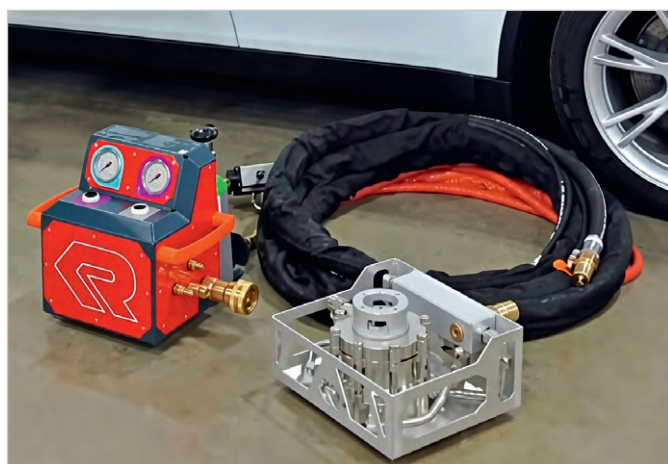


Рис. 4. Общий вид системы пожаротушения электромобилей разработки компании Rosenbauer

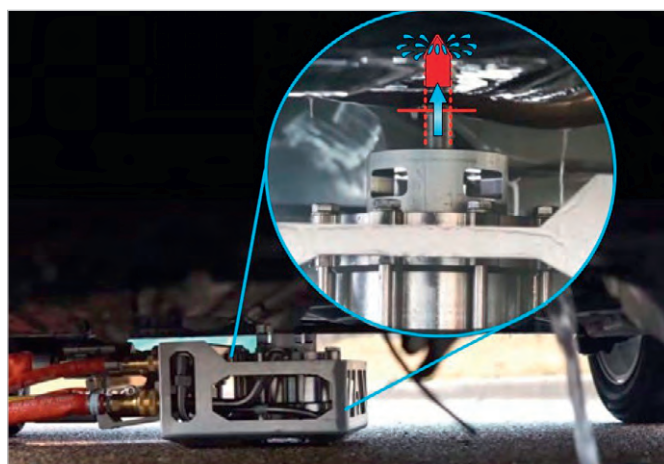


Рис. 5. Принцип подачи воды на тушение батареи

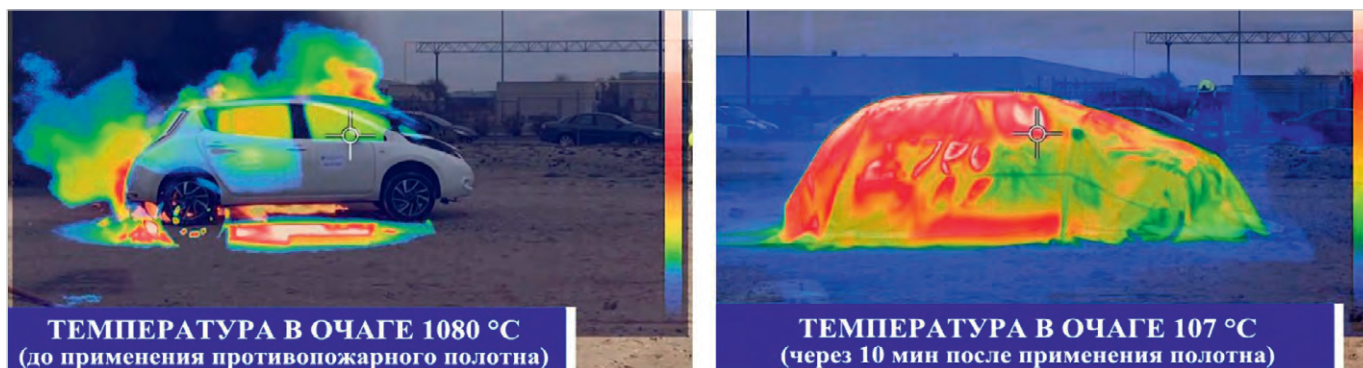


Рис. 6. Пример применения противопожарного полотна для тушения электромобиля

мые). Они же позиционируются как автономные огнетушители с жидким составом в стеклянных цилиндрах. На рис. 7 представлен вид автономной ампулы BASTET объёмом 600 мл. Устройство применяют для ликвидации очагов возгорания и пожаров классов АВСЕ согласно классификации, раскрытой выше.

При возникновении возгорания в зоне расположения АКБ температура среды повышается, внутри ампулы с жидкостью происходит химическая реакция. Когда температура достигает 95°C, ампула лопается и выпускает огнетушащее вещество непосредственно в место возгорания. Часть вещества превращается в газ и работает комплексно: охлаждает зону горения и одновременно уменьшает концентрацию кислорода. На обработанной поверхности формируется тонкая плёнка, предотвращающая повторное воспламенение. Ампулы могут применять как отдельно для каждого АКБ, так и в модуле-сборке для пожарной безопасности нескольких АКБ (рис. 8).

Автоматические системы защиты

Среди устройств автоматического пожаротушения выделяют специальные средства.

Специальный огнетушащий состав LiSafe для тушения литийсодержащих аккумуляторов – готовый к применению раствор на основе растворов металлоорганических соединений.

Некоторые эксплуатационные характеристики:

- удельный вес (плотность) 1,1–1,3 г/см³;
- pH 3,5–6,5 (слабокислый);
- динамическая вязкость при температуре 20°C – не более 2,5 сПз (сантипуаз; 1 сПз = 1 мПа·с);
- при подаче состава в очаг горения осуществляет эффективное тушение

без кратковременной интенсификации горения и взрывов;

- жидкий состав сохраняет огнетушащие свойства при температуре окружающей среды от –10°C до +50°C не менее 5 лет;
- жидкость относится к IV классу опасности по ГОСТ 12.1.007-76.

Система «пожарной безопасности» АКБ в электромобилях активируется при достижении критических температур и испарений в местах размещения аккумуляторных батарей (рис. 9).

Модуль порошкового пожаротушения HighProp SNG01-87A представлен на рис. 10.

Компактное и автономное устройство для локального пожаротушения обеспечивает круглосуточную защиту в необслуживаемых помещениях. Монтируется непосредственно над аккумуляторными модулями. Активация полностью автономного устройства (без подключения к электросети или системам управления) происходит термомеханическим способом с помощью встроенного спринклерного датчика при достижении заданной температуры. При нагреве свыше +68°C жидкость в стеклянном резервуаре расширяется, что приводит к разрушению её колбы. Открывается клапан, и огнетушащее вещество под действием собственного давления распыляется непосредственно на очаг возгорания в защищаемой зоне с минимальным ущербом для окружающего пространства. Это обеспечивает эффективное решение для точечной защиты РЭА.

Кроме обеспечения противопожарной безопасности модулей АКБ это средство применяется для защиты от возгорания в серверных шкафах с телекоммуникационным оборудованием, в закрытых распределительных электрических щитах, силовых шкафах, трансформаторных нишах.

Применение подобной технологии позволяет защитить оборудование и персонал в производственной сфере, станки с ЧПУ, промышленные электронные контроллеры, помещения с печами и жаровнями, в том числе при изготовлении продуктов питания, а также стеллажи с архивными документами в государственных, муниципальных, музейных учреждениях.



Рис. 7. Устройство пожаротушения BASTET



Рис. 8. Ампулы BASTET в сборке

Некоторые технические характеристики:

- вместимость (масса ОТВ) порошка АВС – 12 кг;
- защищаемая площадь 5–6 м²;
- время выброса 12–18 с;
- рабочая температура от –30°C до +60°C.

Российские разработки в области безопасных материалов и средств пожаротушения

Создание и производство новых катодных материалов является перспективным направлением развития технологий аккумуляторных батарей. Внедрение таких материалов способствует повышению эффективности и безопасности аккумуляторов на всех этапах их жизненного цикла: от получения сырья и производства до эксплуатации и утилизации отработавших батарей. Развитие данных технологий создаёт основу для разработки более безопасных и надёжных технических решений, обеспечивающих эффективную эксплуатацию радиоэлектронной аппаратуры в будущем.

Инновация связана с изменением материалов (элементов) литиевой АКБ при производстве, а именно с получением (синтезом) высоковольтного кобальтата лития – ключевого материала для производства литий-ионных аккумуляторов большой мощности.

Со времён производства литиевых АКБ основным материалом в большинстве аккумуляторов, предназначенных для коммерческого использования, применялся оксид лития-кобальта (LCO) и никель-марганец-кобальт (NMC), а также фосфаты переходных металлов, содержащие литий.

В сравнении с прежними недавно полученный модифицированный материал для положительного электрода (катода) сохраняет ключевые преимущества классического кобальтата лития: стабильность при длительном циклировании (многократном повторении процессов зарядки и разрядки), хорошую ионную проводимость, высокую объёмную удельную плотность энергии и высокие значения коэффициентов диффузии лития. Это приводит к повышению надёжности как АКБ, так и всех модулей РЭА.

По своим свойствам кобальтат лития характеризуется высокой плот-

ностью энергии, что позволяет увеличить продолжительность работы аккумуляторных батарей и повысить скорость их заряда. В отличие от ранее разработанных материалов, модифицированная кристаллическая структура и оптимизированный химический состав кобальтата лития обеспечивают повышение напряжения заряда аккумулятора. Это, в свою очередь, приводит к увеличению энергоёмкости элементов питания более чем на 15%.

Инновационная технология синтеза кобальтата лития, предназначенная для изготовления катодов высоковольтных литий-ионных аккумуляторов, расширяет возможности производства аккумуляторных батарей с высокой энергоёмкостью и мощностью. Такие аккумуляторы могут эффективно использоваться в электронных устройствах транспортного назначения, системах накопления электроэнергии, интегрированных с возобновляемыми источниками энергии (ветровыми, солнечными, гидроэнергетическими и другими), а также в радиоэлектронной аппаратуре аэрокосмической отрасли, для которой ключевыми требованиями являются компактность, высокая производительность и длительное время автономной работы. Применение новой технологии позволяет увеличить срок службы аккумуляторных батарей без снижения их мощности и энергоёмкости.

В мае 2026 года в России разработали опытную технологию получения высоковольтного кобальтата лития, а также удалось получить полимерный электролит в жидком состоянии, состоящий из гидрофильных солей лития (LiFSI) и растворителей на основе диметоксиэтана (DME) и полисилоксана (силикона). Такой состав позволяет предотвращать испарение электролита при высоких температурах (+100°C) и исключить его воспламенение. Немаловажное значение имеет формат упаковки аккумуляторных батарей при их хранении и транспортировке.

Перспективы развития отрасли

Проблема тушения литийсодержащих аккумуляторных батарей различных типов и размеров – от портативных электронных устройств до



Рис. 9. Система на шасси электромобиля для локализации возгораний АКБ



Рис. 10. Модуль порошкового пожаротушения HighProp SNG01-87A

тяговых аккумуляторов электромо- билей, электробусов, электросудов, а также широко распространённых электросамокатов и роботов-достав- щиков – обуславливает необходимость разработки и внедрения новых техно- логий обеспечения пожарной безопас- ности.

Поскольку значительная часть катодных материалов для производ- ства аккумуляторных батарей ранее импортировалась из КНР, создание собственного производства в России является важным шагом на пути к обе- спечению технологического суверени- тета. Внедрение новой технологии синтеза катодных материалов созда- ёт предпосылки для развития отече- ственной отрасли по производству материалов для аккумуляторных бата- рей. Одновременно разработка новых способов тушения литий-ионных аккумуляторов способствует совершенствованию первичных средств пожаротушения и автоматических систем противопожарной защиты, обеспечивая повышение безопасно- сти их эксплуатации.



Международная выставка-форум



ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ

5 ЛЕТ ВМЕСТЕ

24–26/11/2026

rus-elektronika.ru

Получите
бесплатный билет
по промокоду **СТА**



12+

Реклама

Организатор:



Международная
Выставочная
Компания

Официальная поддержка:



Минпромторг
России

Партнеры:



Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности. Часть 2

Алексей Галахов

Данная статья является продолжением работы «Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности» (Современная электроника. 2025. № 7. С. 39–43), в которой приведены экспериментальные данные импульсной компоненты естественного электромагнитного поля (И.К. Э-М. П.) ОНЧ-диапазона (600...3600 Гц), синхронно зарегистрированные на двух разнесённых по широте авроральных обсерваториях ПГИ Баренцбург (78,08°, 14,2°; арх. Шпицберген) и Ловозеро (67,97°, 35,08°; Мурманская обл., РФ).

Для сопоставления сейсмической активности с АЧХ и АВХ И.К. ОНЧ-сигнала использованы архивные данные норвежской сети NORSAR, а также приведены некоторые характеристики гелиогеофизических факторов, влияющих на состояние нижней ионосферы: вариации магнитного поля Земли (H_x , H_y , H_z) и временные периоды освещённости Солнцем нижних слоёв ионосферы ($h < 90$ км) в пунктах регистрации ОНЧ-сигнала.

Приёмно-регистрирующая аппаратура, используемая на обсерваториях, выполнена по идентичной схеме и состоит из приёмника ОНЧ-диапазона со взаимно ортогональным расположением приёмных рамочных антенн [1] и последовательного анализатора спектра импульсных сигналов [2].

Работа является продолжением тематики изучения влияния гелиогеофизических факторов на амплитудно-частотные характеристики естественного электромагнитного поля ОНЧ-диапазона и, в частности, продолжением работы «Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности» (Современная электроника. 2025. № 7. С. 39–43) [3].

В статье представлены в различных временных масштабах экспериментальные данные импульсной компоненты естественного электромагнитного поля (И.К. Э-М. П.) ОНЧ-диапазона (600...3600 Гц), синхронно зарегистрированные на двух разнесённых по широте авроральных обсерваториях ПГИ Баренцбург (78,08°, 14,2°; арх. Шпицберген) и Ловозеро (67,97°, 35,08°; Мурманская обл., РФ).

Данные представлены на фоне сейсмической активности районов расположения обсерваторий и магнитограмм H_x , H_y , H_z , получен-

ных на обсерваториях сети IMAGE (The International Monitor for Auroral Geomagnetic Effects); LYR (Longyearbyen TGO 78,20°, 15,82°); MUO (Muonio FMI 68,02°, 23,53°) [4]. Использован архивный календарь сейсмической активности (<https://www.norsar.no/extranet/>) для районов с географическими координатами: ($68 \pm 10^\circ$, $35 \pm 10^\circ$) и ($78 \pm 10^\circ$, $14 \pm 10^\circ$) [5].

На рис. 1, 2 в виде цветового оттенка и в виде отдельной шкалы рис. 3, 4 обозначены отрезки времени суток, когда нижняя ионосфера ($h < 90$ км) освещена Солнцем (расчёт временных интервалов произведён без учёта оптической рефракции).

При оценке временной зависимости между э-м импульсом и началом сейсмического события из-за физической природы исследуемого сигнала и технических характеристик приёмно-регистрирующей аппаратуры необходимо учитывать следующие факторы.

Естественные э-м импульсы ОНЧ-диапазона из-за разной своей физической природы (хоры, шипения, поле

атмосфериков, сейсмические удары) имеют большой динамический диапазон и значительно по амплитуде могут отличаться друг от друга [3]. Поэтому один вид импульсного излучения может маскировать другой.

При цифровой обработке сигнала при идентификации э-м импульса как результата сейсмического удара И.К. – H_x , H_y задаётся амплитудным порогом напряжённости поля, превышение которого даёт основания предположить его сейсмическую природу.

В связи с тем, что в качестве регистратора исследуемого сигнала использовался последовательный анализатор спектра импульсного сигнала ПАС [2], для определения временных характеристик сигналов, необходимо учитывать АВХ каждой спектральной линии регистрируемого импульсного ОНЧ-сигнала.

Основные характеристики ПАС [2]:

- полоса частотного анализа $\Delta F = 600...3600$ Гц;
- значения резонансных частот перестраиваемого фильтра (Гц): 613, 750, 909, 1050, 1204, 1350, 1500, 1650, 1795, 1945, 2091, 2200, 2386, 2682, 2978, 3273, 3601;
- полоса пропускания анализирующего фильтра $2\Delta f_{0,7} = 200$ Гц;
- длительность цикла последовательного анализа: $T_a \approx 18$ с.

Если принять во внимание, что спектр исследуемого импульсного сигнала в диапазоне частот (600...3600 Гц) имеет непрерывный характер, то использование АВХ каждой спектральной линии канала ПАС при определении временных параметров сигнала позволяет оценить временной сдвиг ΔT между началом землетрясения и э-м импульсом И.К. – H_x , H_y .

В данной работе в алгоритме распознавания природы принятого импульсного сигнала был использован как одноуровневый И.К. – H_x , H_y (рис. 1, 2), так и двухуровневые И.К. – L – H_x , H_y и И.К. – H_x , H_y пороги распознавания (рис. 3–6).

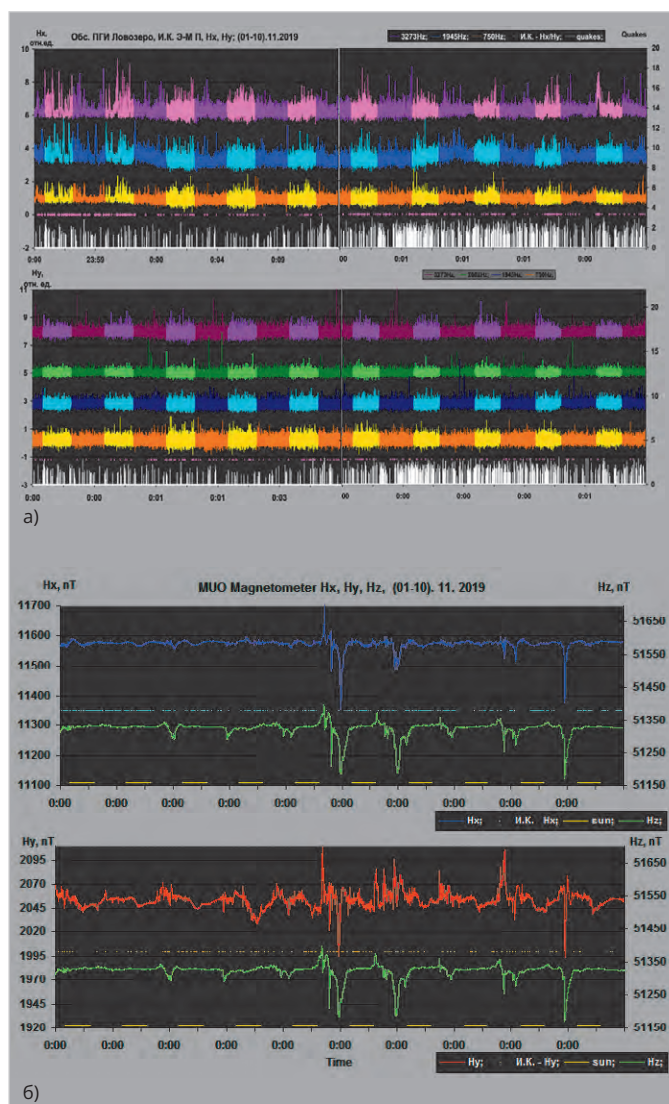


Рис. 1. Синхронная запись АЧХ И.К. – H_x , H_y э-м п ОНЧ-диапазона [обс. ПГИ Ловозеро] на фоне сейсмической активности (quakes) [сеть NORSAR] и вариаций магнитного поля Земли H_x , H_y , H_z [обс. MUO FMI] и солнечной освещённости нижней ионосферы (sun): а) АЧХ И.К. – H_x , H_y э-м п ОНЧ-диапазона, сейсмическая активность (quakes), временные метки АВХ выделенных событий И.К. – H_x , H_y [шкала Y: 0, (–1,2)]; б) временные метки АВХ И.К. – H_x , И.К. – H_y на фоне вариаций магнитного поля (H_x , H_y , H_z) и периода времени солнечной освещённости нижней ионосферы (sun)

Ниже приведены в различных временных масштабах для разных массивов данных результаты обработки импульсной компоненты ОНЧ-сигнала, одновременно зарегистрированного на двух разнесённых по широте обсерваториях ПГИ.

1. Массив данных: (01–10).11.2019.

Пороговые значения напряжённости поля И.К. – H_x , И.К. – H_y представлены в табл. 1, 2 (обс. ПГИ Ловозеро) и в табл. 3, 4 (обс. ПГИ Баренцбург).

2. Массив данных: 05.11.2019.

В табл. 5–8 представлены двухуровневые пороговые значения напряжённости э-м поля для каждой импульсной компоненты исследуемого сигнала [(И.К. – H_x – L, И.К. – H_x) и (И.К. – H_y – L, И.К. – H_y)] и для каждой спектральной линии ФКАН соответственно для обсерваторий Ловозеро и Баренцбург.

По результатам регистрации импульсной компоненты ОНЧ-сигнала (рис. 1–4) можно оценить значения амплитуды компонент (H_x , H_y , H_z) магнитного поля Земли и условия освещённости нижней ионосфе-

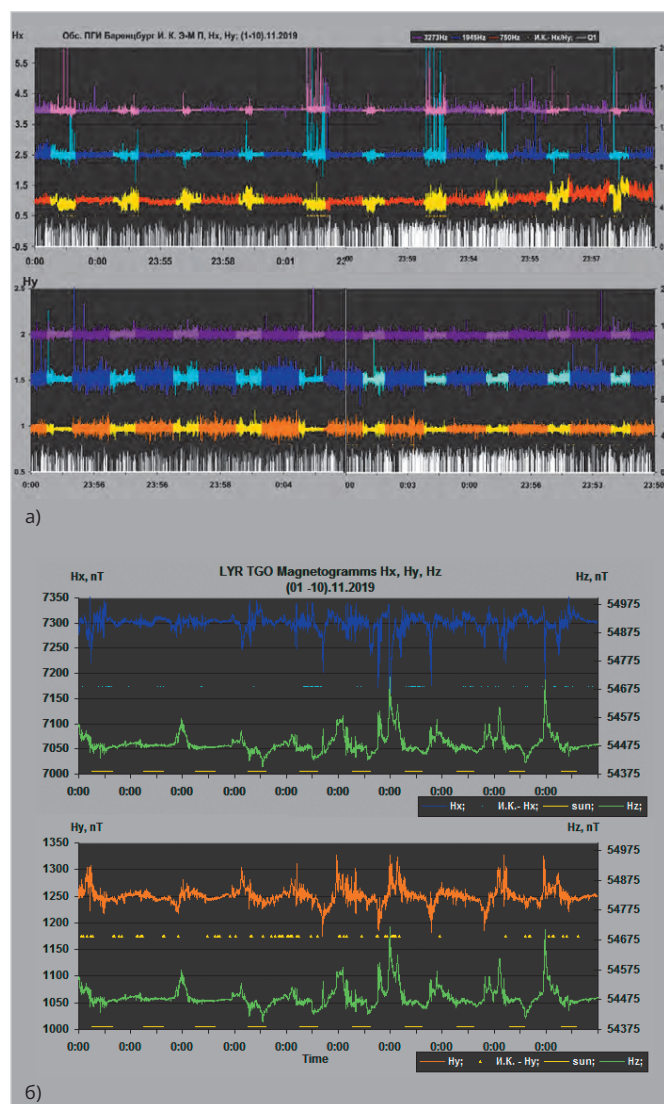


Рис. 2. Синхронная запись АЧХ И.К. – H_x , H_y э-м п ОНЧ-диапазона [обс. ПГИ Баренцбург] на фоне сейсмической активности (quakes) [сеть NORSAR], вариаций магнитного поля Земли H_x , H_y , H_z [обс. MUO FMI] и солнечной освещённости нижней ионосферы (sun): а) АЧХ И.К. – H_x , H_y э-м п ОНЧ-диапазона, сейсмическая активность (quakes), временные метки АВХ выделенных событий И.К. – H_x , H_y [шкала Y: 0, (–1,2)]; б) временные метки АВХ И.К. – H_x , И.К. – H_y на фоне вариаций магнитного поля (H_x , H_y , H_z) и периода времени солнечной освещённости нижней ионосферы (sun)

ры, при которых были зарегистрированы э-м импульсы, природа которых может быть объяснена сейсмической активностью района.

3. Массив данных: (16:00–19:00).05.11.2019.

На основании экспериментальных данных (рис. 5, 6) ниже приводятся значения временного сдвига ΔT между началом импульса Э-М. П. и началом сейсмического события.

Обс. ПГИ Ловозеро: 67,97°, 35,08° (рис. 5).

Сектора сейсмических событий: (Latitude)°, (Longitude)°, (Magnitude) [5]

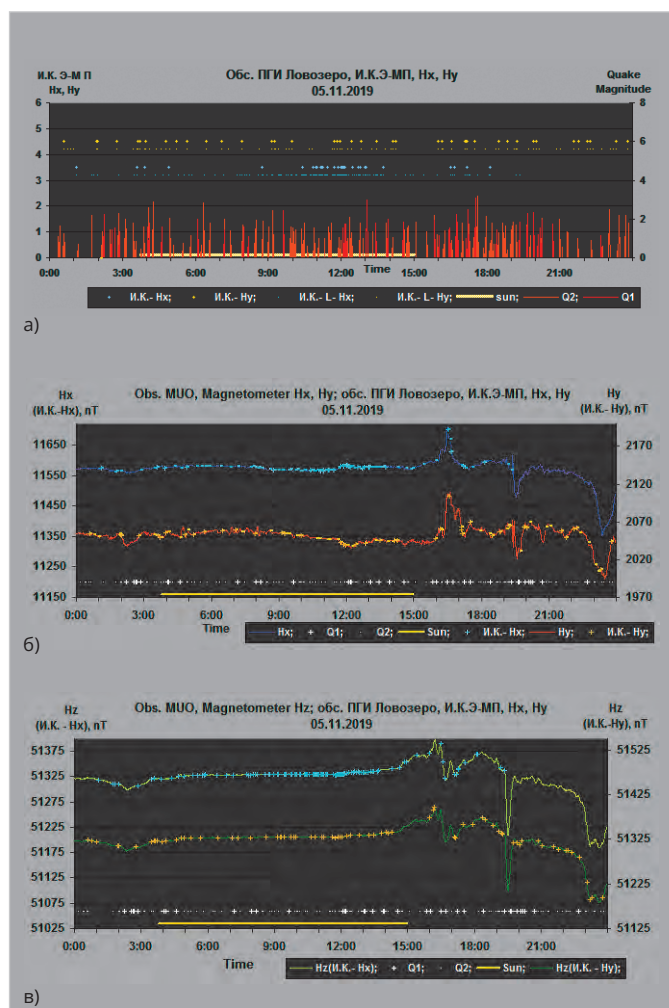


Рис. 3. Синхронная запись АВХ импульсной составляющей ОНЧ-сигнала при двухуровневом алгоритме распознавания (И.К. – Hx, Hy и И.К. – L – Hx, Hy), сейсмической активности (Q1, Q2), компонент магнитного поля Земли (Hx, Hy, Hz) и периода времени освещённости нижней ионосферы (sun) [обс. ПГИ Ловозеро]:

- а) синхронная запись АВХ импульсного сигнала при двухуровневом алгоритме (И.К. Hx, Hy и И.К. – L – Hx, Hy), сейсмической активности (Q1, Q2);
 б) синхронная запись компонентов магнитного поля Hx, Hy с метками превышения сигнала порогового уровня (И.К. – Hx и И.К. – Hy) и сейсмической активности (Q1, Q2);
 в) синхронная запись компоненты Hz магнитного поля с метками превышения сигнала порогового уровня (И.К. – Hx и И.К. – Hy) и сейсмической активности (Q1, Q2)

Q1: [(60...76)°, (30...40)°, (0,6...8,0)];
 Q2: [(60...76)°, (20...50)°, (0,6...8,0)].

а) Компонента Hx:

$\Delta T_{x1} = t_{\text{И.К.-Hx}} [1640] - t_{Q1} [(1644), 73^\circ/39^\circ, 2,22] = 4 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x2} = t_{\text{И.К.-Hx}} [1711] - t_{Q1} [(1714), 71^\circ/33^\circ, 2,50] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x3} = t_{\text{И.К.-L-Hx}} [1736] - t_{Q2} [(1736), 67^\circ/27^\circ, 3,17] = 0 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x4} = t_{\text{И.К.-L-Hx}} [1805] - t_{Q2} [(1807), 79^\circ/16^\circ, 0,77] = 2 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x5} = t_{\text{И.К.-Hx}} [1808] - t_{Q2} [(1812), 67^\circ/20^\circ, 1,78] = 4 \text{ мин}.$

б) Компонента Hy:

$\Delta T_{y1} = t_{\text{И.К.-Hy}} [1610] - t_{Q2} [(1612), 79^\circ/15^\circ, 0,47] = 2 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y2} = t_{\text{И.К.-L-Hy}} [1612] - t_{Q2} [(1615), 78,3^\circ/18^\circ, 1,4] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y3} = t_{\text{И.К.-Hy}} [1708] - t_{Q1} [(1709), 69^\circ/30^\circ, 0,99] = 1 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y4} = t_{\text{И.К.-Hy}} [1729] - t_{Q1} [(1731), 66^\circ/34^\circ, 3,09] = 2 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y5} = t_{\text{И.К.-L-Hy}} [1755] - t_{Q2} [(1758), 79^\circ/37^\circ, 2,12] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y6} = t_{\text{И.К.-L-Hy}} [1821] - t_{Q1} [(1824), 68^\circ/35^\circ, 1,45] = 3 \text{ мин}.$

Обс. ПГИ Баренцбург 78.08°, 14.2° (рис. 6).

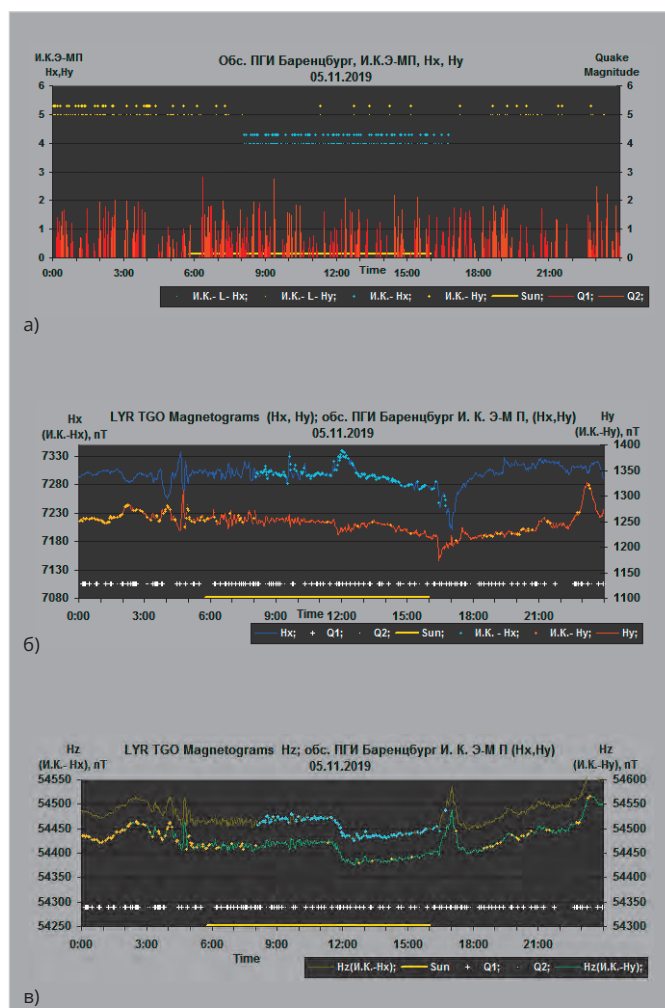


Рис. 4. Синхронная запись АВХ импульсной составляющей ОНЧ-сигнала при двухуровневом алгоритме распознавания (И.К. – Hx, Hy и И.К. – L – Hx, Hy), сейсмической активности (Q1, Q2), компонент магнитного поля Земли (Hx, Hy, Hz) и периода времени освещённости нижней ионосферы (sun) [обс. ПГИ Баренцбург]:

- а) синхронная запись АВХ импульсного сигнала при двухуровневом алгоритме (И.К. – Hx, Hy и И.К. – L – Hx, Hy), сейсмической активности (Q1, Q2);
 б) синхронная запись компонентов магнитного поля Hx, Hy с метками превышения сигнала порогового уровня (И.К. – Hx и И.К. – Hy) и сейсмической активности (Q1, Q2);
 в) синхронная запись компоненты Hz магнитного поля с метками превышения сигнала порогового уровня (И.К. – Hx и И.К. – Hy) и сейсмической активности (Q1, Q2)

Q1: [(70...86)°, (09...19)°, (0,6...8,0)];
 Q2: [(70...86)°, (05...25)°, (0,6...8,0)].

а) Компонента Hx:

$\Delta T_{x1} = t_{\text{И.К.-Hx}} [1608] - t_{Q1} [(1612), 78,7^\circ/18,6^\circ, 0,47] = 4 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x2} = t_{\text{И.К.-L-Hx}} [1612] - t_{Q1} [(1615), 78,6^\circ/18,1^\circ, 1,40] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x3} = t_{\text{И.К.-Hx}} [1627] - t_{Q1} [(1629), 78,6^\circ/18,7^\circ, 0,91] = 2 \text{ мин};$
 $\Delta T_{x4} = t_{\text{И.К.-Hx}} [1645] - t_{Q1} [(1646), 79,8^\circ/13,6^\circ, 1,42] = 1 \text{ мин}.$

б) Компонента Hy:

$\Delta T_{y1} = t_{\text{И.К.-Hy}} [1713] - t_{Q2} [(1714), 71^\circ/33^\circ, 2,50] = 1 \text{ мин};$

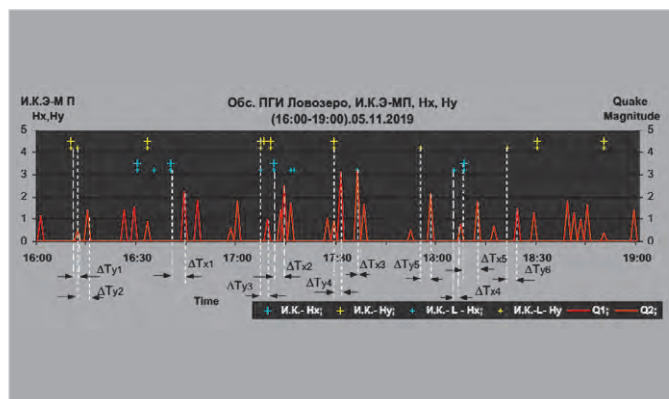


Рис. 5. Синхронная запись АВХ импульсной составляющей ОНЧ-сигнала при двухуровневом алгоритме распознавания (И.К. – Нх, Ну и И.К. – L – Нх, Ну) [обс. ПГИ Ловозеро] и сейсмической активности (Q1, Q2)

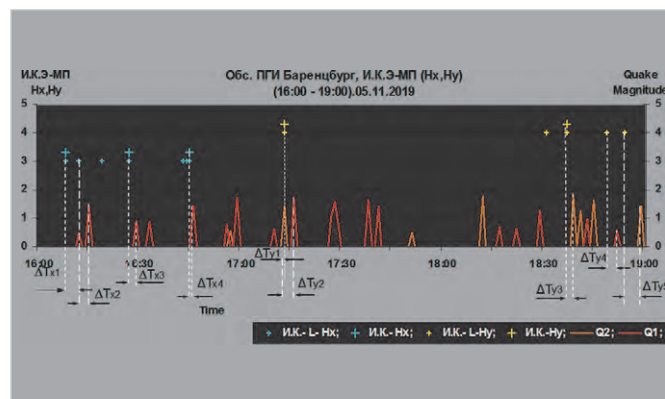


Рис. 6. Синхронная запись АВХ импульсной составляющей ОНЧ-сигнала при двухуровневом алгоритме распознавания (И.К. – Нх, Ну и И.К. – L – Нх, Ну) [обс. ПГИ Баренцбург] и сейсмической активности (Q1, Q2)

Таблица 1. И.К. – Нх; обс. ПГИ Ловозеро

F _{кан.} , Гц	750	909	1050	1204	1350	1500	1945	2200	3273
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>3,2e-4	>2,55e-4	>2,05e-4	>2,28e-4	>1,56e-4	>1,7e-4	>9,81e-5	>7e-5	>5,55e-5

Таблица 2. И.К. – Ну; обс. ПГИ Ловозеро

F _{кан.} , Гц	750	1050	1945	2682	2978	3273
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,8e-04	>1,1e-04	>2,25e-5	>2e-5	>1,89e-5	>1,87e-5

Таблица 5. Obs. ПГИ Ловозеро: И.К. – H_{x-L}; И.К. – Нх

F _{кан.} , Гц	909	1050	1204	1350	1500	1650	1795	1945
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,49e-4	>2e-4	>1,98e-4	>1,4e-4	>1,56e-4	>9,64e-5	>1,32e-4	>8,23e-5
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,6e-4	>2,18e-4	>2,04e-4	>1,77e-4	>1,78e-4	>9,64e-5	>1,32e-4	>1,1e-4

Таблица 6. Obs. ПГИ Ловозеро: И.К. – H_{y-L}; И.К. – Ну

F _{кан.} , Гц	909	1050	1204	1350	1500	1650	1795	1945
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,48e-4	>1,11e-4	>7,95e-5	>4,92e-5	>6,63e-5	>5,32e-5	>3,61e-5	>2,1e-5
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,55e-4	>1,13e-4	>8,73e-5	>5,16e-5	>6,63e-5	>5,34e-5	>3,77e-5	>2,21e-5
F _{кан.} , Гц	2091	2200	2386	2682	2978	3273	3601	
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,39e-5	>1,76e-5	>2,75e-5	>1,8e-5	>1,68e-5	>2e-5	>6,40e-6	
Hu·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,78e-5	>1,94e-5	>3e-5	>2,3e-5	>2e-5	>2,3e-5	>6,45e-6	

Таблица 7. Obs. ПГИ Баренцбург: И.К. – H_{x-L}; И.К. – Нх

F _{кан.} , Гц	909	1050	1204	1350	1500	1650	1795	1945
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>3,03e-4	>2,08e-4	>2e-4	>1,3e-4	>1,25e-4	>6,01e-5	>3,8e-5	>3,26e-5
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>3,05e-4	>2,1e-4	>2,5e-4	>1,4e-4	>1,6e-4	>1e-4	>1e-4	>4,9e-5
F _{кан.} , Гц	2091	2200	2386	2682	2978	3273	3601	
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>3,24e-5	>3,2e-5	>2,58e-5	>2,1e-5	>1,7e-5	>1,7e-5	>9,7e-6	
Hu·a÷m·Hz ^{0.5}	>5,9e-5	>4,8e-5	>4,6e-5	>2,3e-5	>2,2e-5	>2,9e-5	>2e-5	

Таблица 8. Obs. ПГИ Баренцбург: И.К. – H_{y-L}; И.К. – Ну

F _{кан.} , Гц	909	1050	1204	1350	1500	1650	1795	1945
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,89e-4	>1,58e-4	>1,24e-4	>9,08e-5	>1e-4	>4,71e-5	>3,06e-5	>2,18e-5
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>1,92e-4	>1,62e-4	>1,25e-4	>9,17e-5	>1,01e-4	>4,8e-5	>3,1e-5	>2,2e-5
F _{кан.} , Гц	2091	2200	2386	2682	2978	3273	3601	
Hx _L ·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,32e-05	>1,82e-5	>1,6e-5	–	>1,25e-5	>1,10e-5	>6e-6	
Hu·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,4e-5	>1,83e-5	>1,53e-5	>1,48e-5	>1,3e-5	>1,55e-5	>6,08e-6	

$\Delta T_{y2} = t_{\text{и.к.-Ну}} [1713] - t_{Q1} [(1716), 78,3^\circ/09,1^\circ, 1,72] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y3} = t_{\text{и.к.-Ну}} [1837] - t_{Q2} [(1840), 75,8^\circ/25,1^\circ, 1,80] = 3 \text{ мин};$
 $\Delta T_{y4} = t_{\text{и.к.-L-Ну}} [1849] - t_{Q1} [(1852), 76,2^\circ/10,8^\circ, 0,54] = 3 \text{ мин};$

$\Delta T_{y5} = t_{\text{и.к.-L-Ну}} [1854] - t_{Q2} [(1859), 67,8^\circ/20,7^\circ, 1,42] = 5 \text{ мин}.$

На основании приведённых измерений [(16:00–19:00).05.11.2019] на двух разнесённых по широте обсерваториях: $\Delta T \approx (0–5) \text{ мин}.$

Таблица 3. И.К. – Нх; обс. ПГИ Баренцбург

F _{кан.} , Гц	750	1945	3273
Hx·a÷m·Hz ^{0.5}	>4,5e-4	>3,26e-5	>1,52e-5

Таблица 4. И.К. – Ну; обс. ПГИ Баренцбург

F _{кан.} , Гц	750	1945	3273
Hu·a÷m·Hz ^{0.5}	>2,7e-4	>2,22e-5	>2,16e-5

Хочется надеяться, что приведённые экспериментальные данные импульсной компоненты э-м поля ОНЧ-диапазона, полученные на двух разнесённых по широте авроральных обсерваториях, заинтересуют исследователей, изучающих физические процессы, протекающие в нижней ионосфере Земли.

Литература

1. Галахов А.А., Ахметов О.И. Комплекс аппаратуры для регистрации импульсной компоненты электромагнитного поля очень низкой частоты // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 136–142.
2. Галахов А., Косолапенко В., Ларченко А., Пильгаев С. Анализатор спектра поля атмосфериков на реконфигурируемых ПАИС Anadigm // Современная электроника. 2019. № 7. С. 62–66.
3. Галахов А. Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности (экспериментальные данные) // Современная электроника. 2025. № 7. С. 39–43.
4. IMAGE. URL: http://space.fmi.fi/image/www_old/index.html.
5. NORSAR.no. URL: <https://www.norsar.no/extranet/bulletins/>.



К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма.

Часть 5. Как были открыты плазмоны

Виктор Алексеев

Продолжаем серию статей о научном наследии Игоря Тамма. В предыдущих статьях мы рассмотрели, как его идеи, изложенные в статьях 1930–1950-х годов, повлияли на развитие нового научного направления «плазмоники», изучающего взаимодействие света с электронами в металлах и эффекты локализации света в объёмах меньше его длины волны. В частности, мы разобрали некоторые темы: современные быстродействующие электрооптические модуляторы, поверхностные состояния Тамма, запрещённые фотонные зоны, фотонные кристаллы («Современная электроника» № 7–9, 2025), а также экситон-поляритоны и фонон-поляритоны («Современная электроника» № 4, 2026). В этой статье мы расскажем о том, как научное предвидение Игоря Тамма позволило правильно прогнозировать именно те направления исследований, где были открыты объёмные и поверхностные плазмоны.

Плазмоны

Ещё ранние эксперименты (1930–1940 гг.) с быстрыми электронами, проходящими через тонкие металлические листы фольги, показали наличие характеристических потерь энергии, что потребовало теоретического объяснения в терминах коллективного отклика электронного газа [1].

Наиболее значимый вклад в разработку теории коллективных колебаний электронного газа в металлах внесли Дэвид Пайнс (David Pines) и Дэвид Бом (David Bohm).

Они исходили из того, что поведение электронного газа в металле нельзя удовлетворительно описать, рассматривая все электроны просто как независимые частицы, взаимодействующие друг с другом напрямую. При большом числе электронов главную трудность создают дальнедействующие кулоновские силы, из-за которых движение частиц оказывается сильно взаимосвязанным. Поэтому авторы предложили сначала выделить в системе не движение отдельных электронов, а коллективные колебания всей электронной среды. Именно эти согласованные колебания плотности заряда и составляют наиболее важную часть проблемы.

В работе, опубликованной в 1952 году, Пайнс и Бом анализировали поведе-

ние электронов в плотном электронном газе [2].

Авторы выяснили, что в целом при возбуждении электронный газ проявляет как коллективные свойства поведения частиц, так и их индивидуальные черты.

Они показали, что длинноволновые «коллективные моды» (Long Wavelengths), описывающие «плазменные осцилляции всей электронной системы» (Plasma Oscillations of the Entire System), доминируют при длинах волн $\lambda > \lambda_D$ (дебайевский радиус экранирования). При коллективных колебаниях каждый отдельный электрон испытывает небольшое периодическое возмущение своей скорости и положения из-за суммарного потенциала всех остальных частиц. Этот суммарный потенциал может быть относительно большим, поскольку значительный радиус действия кулоновского взаимодействия позволяет огромному количеству электронов вносить свой вклад в потенциал в данной точке. Одновременно экранирование электронных полей можно рассматривать как следствие кулоновского отталкивания, которое заставляет электроны оставаться на расстоянии друг от друга. В свою очередь, это приводит к дефициту отрицательного заряда в непо-

средственной близости от данного электрона.

С другой стороны, индивидуальные свойства проявляются в коротковолновых колебаниях (Short Wavelengths) отдельных частиц, когда длина волны меньше дебайевского радиуса ($\lambda < \lambda_D$). В этом случае преобладают двухчастичные столкновения (Two-Body Collisions). Моды отдельных частиц, связанные с тепловым движением электронов, включают в себя эффекты остаточной короткодействующей экранированной кулоновской силы, которая приводит только к двухчастичным столкновениям.

В этой статье 1952 года было сформулировано основное положение теории Бома – Пайнса (Bohm – Pines Dispersion Relation), заключавшееся в разделении мод колебаний электронного газа на коллективные и индивидуальные взаимодействия, которое послужило со временем фундаментом для всей дальнейшей теории плазмонов.

Через год Бом и Пайнс публикуют статью, в которой доводят свою идею до полноценной квантово-механической схемы.

Поскольку описание системы через флуктуации плотности неудобно для вычисления волновых функций и энергетических уровней, авторы переходят от качественной картины к гамильтонову формализму. Здесь был использован весь опыт и знания Дэвида Бома, опубликовавшего в 1951 году монографию, посвящённую классическому подходу к теории квантовой механики [3].

В своей статье авторы вводят специальное каноническое преобразование гамильтониана, которое переводит задачу в новое представление, позволившее выделить коллективные плазменные колебания в явном виде. В то же время поведение отдельных электронов можно было рассматривать независимым образом [4].

После такого преобразования остаются независимые коллективные продольные колебания всей электронной системы и отдельные электроны, сопровождаемые экранирующим их облаком. При этом между электронами преобладает короткодействующее экранированное взаимодействие, определяемое специальным параметром (Interelectronic Spacing). Следует обратить на эту математическую процедуру особое внимание, поскольку она фактически позволила вывести дальнедействующую часть взаимодействия в коллективные моды. Электрон в новом представлении ведёт себя не как «голая» частица, а как частица, «одетая» облаком коллективных возбуждений. Отсюда логически возникает поправка к эффективной массе электрона, учитывающая дополнительную инерцию. Они также получают поправку к частоте коллективных колебаний и показывают, что она становится зависящей от волнового вектора. Кроме того, в этом варианте коллективная часть гамильтониана принимает вид набора гармонических осцилляторов с плазменной частотой, превращая плазменное колебание в отдельный объект квантово-механического описания.

Также нужно отметить дополнительные условия, которые накладывают на волновую функцию для того, чтобы «индивидуальные» электронные координаты не могли повторно содержать параметры, уже включённые в коллективную часть. Это также было очень важным математическим элементом квантовой теории физики твёрдого тела.

Таким образом, можно сказать, что в статье 1952 года Бом и Пайнс рассматривают в основном физическую картину разделения колебаний в электронном газе на коллективные плазменные и индивидуальные электронные взаимодействия. В то же время в работе 1953 года приведена строгая квантово-механическая реализация этой картины, учитывая такие важнейшие моменты, как: каноническое преобразование; выделение коллективных координат; получение нового гамильтониана; введение дополнительных условий для экранировки, эффективной массы и спектра коллективных колебаний.

Нельзя не упомянуть события тех лет, которые коренным образом изменили судьбу Дэвида Бома. Он отказал-

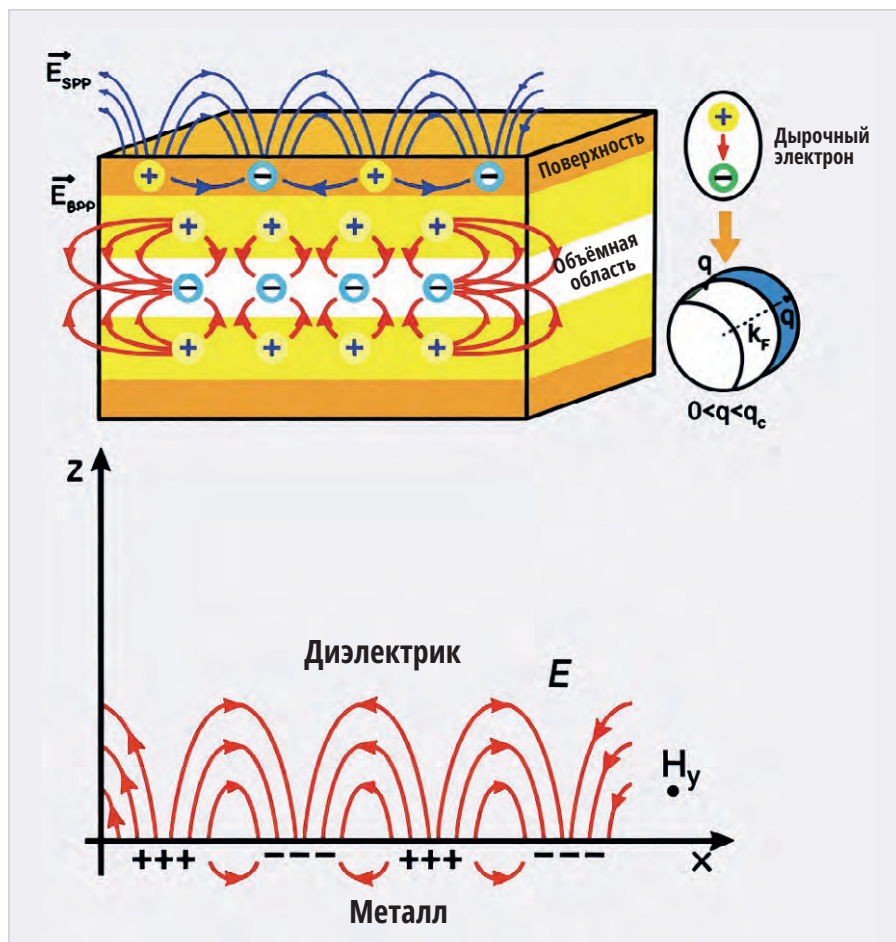


Рис. 1. Структурная схема формирования объёмных и поверхностных плазмонов в кристалле (объёмные возбуждения – верхний рисунок; поверхностные возбуждения – нижний рисунок)

ся давать показания против своего научного руководителя Дж. Роберта Оппенгеймера в комитете HUAC. Это было квалифицировано как оскорбление конгресса, Бом был уволен из Университета Принстона и вынужден был переехать сначала в Бразилию, потом в Великобританию.

В современном американском научном мире эта история расценивается как пример высокоморального поступка Бома, не предавшего своего учителя ради сиюминутной карьерной выгоды [5].

Уместно отметить, что Дэвид Бом является автором квантовой теории де Бройля – Бома со скрытыми переменными, решающей проблему измерения без коллапса волновой функции. В этой теории, являющейся основной детерминистической альтернативой «копенгагенской интерпретации квантовой механики», частицы имеют точные траектории, управляемые «пилотной волной функцией» [6].

Пайнс продолжил свою карьеру и стал профессором физики в Университете Пенсильвании (University of

Pennsylvania). Несмотря на то что в защиту Бома выступили его коллеги и даже сам Альберт Эйнштейн, Пайнс избегал публичной поддержки Бома из страха маккартистских репрессий. В 1956 году в журнале *Physical Review* была опубликована статья, подписанная только Пайнсом, в которой он, опираясь на их совместные с Бомом идеи, обобщает и развивает теорию «Bohm – Pines Dispersion Relation». (1951–1953 гг.) [7].

В этой работе отмечается, что коллективные колебания валентных электронов в твёрдом теле напоминают плазменные колебания в газовом разряде. Используя эту аналогию, Пайнс вводит новую квазичастицу «плазмон» (Plasmon). То есть сам автор определяет понятие плазмона как квант коллективных колебаний валентных электронов.

Пайнс сразу разделяет индивидуальные и коллективные энергетические потери (Individual Particle Energy Loss) и коллективные потери энергии (Collective Energy Loss). В этой интерпретации Plasmon (плазмон) – это не

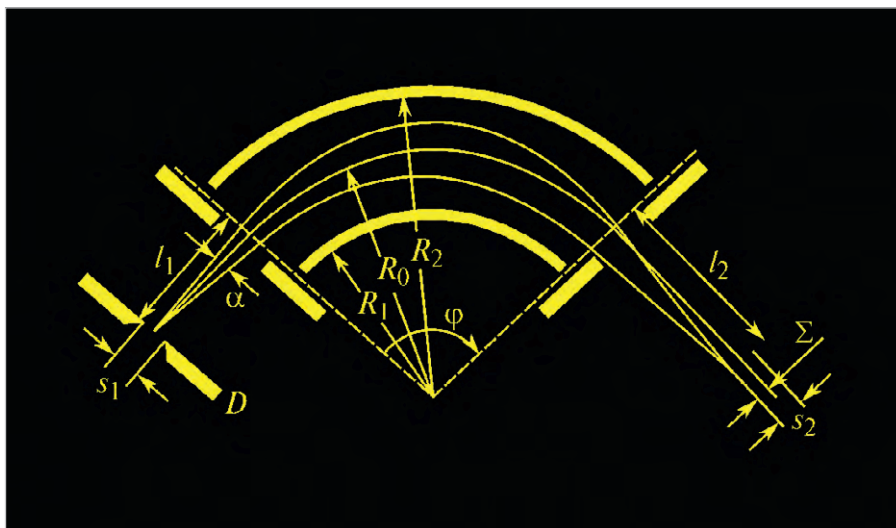


Рис. 2. Упрощённая структурная схема электростатического анализатора энергии (типа цилиндрического дефлектора), используемого для регистрации энергетических спектров электронов

просто удобный термин, а оператор перехода от одноэлектронного представления к коллективному описанию. При этом, благодаря согласованному кулоновскому взаимодействию, энергия передаётся не отдельному электрону, а коллективному возбуждению всей электронной системы.

Именно поэтому введение нового термина Пайнс использует как маркер новой элементарной квазичастицы твёрдого тела. Он даже специально оговаривает, что введение нового понятия требует серьёзного обоснования, и весь обзор дальше строит как доказательство того, что плазмон действительно можно считать хорошо определённой квазичастицей в большинстве твёрдых тел (рис. 1).

Используя этот подход, Пайнс рассмотрел два отдельных типа гамилтониана: один для коллективного взаимодействия (плазменные поля), а другой для индивидуальных частиц с короткодействующим потенциалом.

Он подчёркивает тот факт, что речь идёт не просто о «потере энергии», а о связи потери энергии с углом рассеяния, то есть о коллективном процессе возбуждения плазмонов.

Для сравнения теории с экспериментом Пайнс анализирует данные угловой зависимости энергетических потерь, опубликованные Ватанабе в 1956 году [8]. Эти результаты стали одним из первых прямых экспериментальных подтверждений коллективной природы потерь энергии электронов в твёрдых телах. В своей работе Ватанабе исследовал спектры энергетических потерь электронов (25 кэВ)

с помощью модифицированного анализатора Мёлленштедта (Möllenstedt Velocity Analyzer) [9].

На рис. 2 показана структурная схема цилиндрического дефлектора электростатического анализатора Мёлленштедта, где электронный пучок фокусируется вдоль всей длины щели.

Два изогнутых электрода с радиусами R_1 и R_2 , между которыми создаётся радиальное электрическое поле, формирующее так называемую энергетическую призму. Входная щель S_1 ограничивает пучок электронов, движущихся по дуге. Электроны с «правильной» энергией проходят строго по центральной траектории (радиуса R_0) и фокусируются на выходной щели (S_2). Электроны, потерявшие энергию, имели другую исходную энергию, отклонялись сильнее или слабее или «врезались» в пластины и не попадали в щель S_2 . Таким образом, на практике была реализована идея распределения электронов по энергии с высокой точностью в экспериментах по рассеянию в тонких плёнках.

Анализатор Мёлленштедта по праву считается одним из основных прообразов современного метода электронной спектроскопии энергетических потерь (Electron-Energy-Loss Spectroscopy – EELS).

Ватанабе стал первым, кто с помощью анализатора Мёлленштедта измерил дисперсионную зависимость плазменной частоты в реальных металлах, подтвердив предсказания теории Боме – Пайнса. Это был переход от качественных наблюдений к количественным измерениям $\omega_p(k)$.

Возвращаясь к обобщающей работе Пайнса, важно отметить, что при анализе зависимостей угла рассеяния от энергии электронов Пайнс указывает на два максимума в спектре энергетических потерь электронов энергиями около 15 и 30 эВ, соответствующие острым коллективным пикам и широким сглаженным пикам, обусловленным диффузионными особенностями спектра.

В итоге можно говорить, что физическая концепция плазмона сложилась в цикле работ Боме – Пайнса (1952–1953 гг.), а её четкая терминологическая фиксация была дана Пайнсом в обзоре 1956 года.

В современной физике плазмон обычно определяют как квант коллективного колебания электронной плотности.

Дальнейшее развитие теории и экспериментальной техники позволило определить основные свойства плазмона. Фактически именно в этот период возникло представление о плазмоне как о самостоятельной квазичастице твёрдого тела.

Было показано, что волна плазмона движется с определённой скоростью, определяемой как ω/k (k – волновой вектор в 1/нм). Одновременно с этим в «электронной жидкости» металла всегда есть электроны, которые, согласно распределению Максвелла, летят с такой же скоростью и гасят плазмонную волну. Циклическая частота объёмного плазмона отличается стабильностью и определяется как $\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m}$, где m и n – масса и концентрация электронов соответственно. В пределе малых волновых векторов (больших длин волн) ω_p слабо зависит от волнового вектора k , что делает её удобной константой для описания коллективных колебаний. Однако при учёте пространственной дисперсии частота начинает зависеть от k , и по мере приближения колебательной моды к поверхности эта зависимость становится определяющей. Оценочное время жизни плазмона τ , которое зависит от длины волны λ (нм), волнового вектора k (нм⁻¹) и механизма затухания (Landau Damping, e-e, e-ph), может составлять от 10 до 200 fs (фемтосекунда – 10⁻¹⁵ секунды).

Следующим важным шагом в развитии теории плазмонов стало понимание того, что на границе металла могут существовать не только объ-

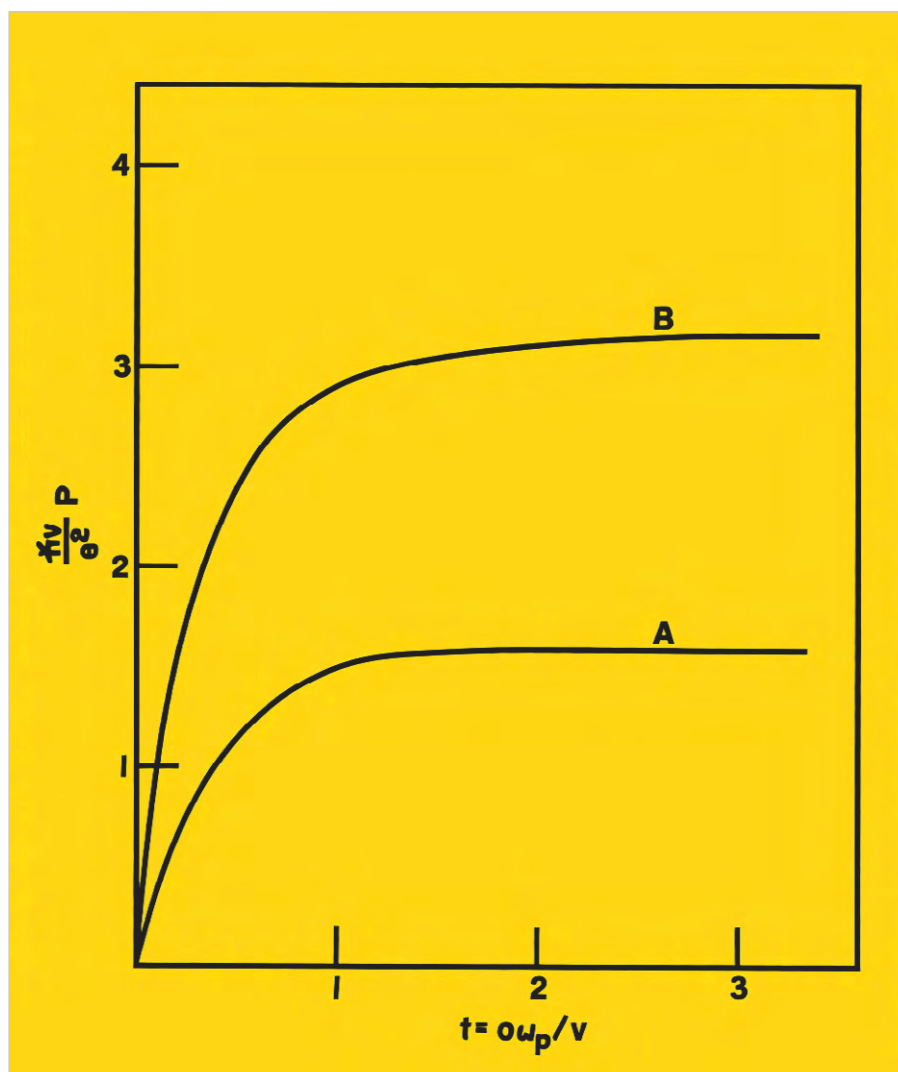


Рис. 3. Зависимость нормированной вероятности взаимодействия электрона от «приведённой» толщины алюминиевой фольги

ёмные, но и поверхностные коллективные колебания электронной плотности. Именно этот переход от объёмного плазмона к поверхностной моде был осуществлён в работе Руфуса Ритчи (Rufus Ritchie), который в 1957 году теоретически предсказал существование поверхностных коллективных мод электронной плазмы в тонких металлических плёнках. Благодаря этой работе позднее появилось современное понятие поверхностного плазмона [10].

В этой работе Ритчи теоретически исследовал угловое энергетическое распределение быстрых электронов, теряющих энергию в металлических фольгах толщиной порядка 10–100 нм.

Используя диэлектрическую теорию и гидродинамическую модель Блоха для ферми-газа электронов в плёнке с двумя поверхностями, он рассчитал потери энергии от электрона, проходящего через плёнку с учётом как объёмных, так и поверхностных коллектив-

ных мод. Такой подход позволил ему предсказать структуру спектра потерь, обусловленных поверхностными коллективными модами (Surface Collective Modes).

На рис. 3, взятом из оригинальной работы Р.Х. Ритчи, показана «нормированная вероятность взаимодействия $\hbar v/e^2$ » (Interaction Probability – P) в зависимости от толщины плёнки t , приведённой к характерному плазменному масштабу. На этом рисунке величина P , отложенная по вертикали, – это условная величина, показывающая, насколько «легко» электрон отдаёт энергию коллективным колебаниям электронного газа в плёнке.

На рис. 3 по горизонтали отложен безразмерный параметр $t = a\omega_p/v$, где a – толщина пленки; ω_p – объёмная плазменная частота; v – скорость налетающего электрона. Фактически, t – это толщина, приведённая к характерному плазменному масштабу. То есть чем правее точка на графике, тем

«толще» плёнка с точки зрения плазменного отклика.

Кривая A показывает, что потери на обычной плазменной частоте обратно пропорциональны толщине плёнки. То есть тонкая плёнка хуже поддерживает обычный объёмный плазменный отклик, чем более толстые образцы.

Кривая B, соответствующая случаю «пониженной» плазменной частоты ($\omega_s \approx \omega_p/\sqrt{2}$), отражает рост вероятности потерь для пониженной энергии $\hbar\omega_p/\sqrt{2}$ электронов. Здесь ω_p – частота объёмного плазмона, определённая Пайнсом и Бомом. Кривая B лежит выше кривой A, то есть такой процесс может давать заметный вклад. Физический смысл здесь в том, что в тонкой плёнке электронный газ «чувствует» обе поверхности одновременно, и границы начинают активно влиять на коллективные колебания электронов. Практически Ритчи показал, что в массивном металле электроны проводимости могут коллективно колебаться на своей обычной плазменной частоте. В то же время, когда фольга становится очень тонкой, возникают граничные эффекты. При этом заряд на одной поверхности уже не является «независимым» от заряда на другой. Поэтому обычный плазменный отклик ослабляется и появляется дополнительный режим с более низкой частотой. То есть поверхности начинают определять электродинамику процесса. При некоторой толщине плёнки рост вероятности потерь замедляется, и обе кривые выходят на режим насыщения. Это означает, что при достаточно большой толщине влияние границ уже перестаёт значительно меняться, и поведение приближается к случаю «обычного объёмного металлического» образца.

Выводы Ритчи, сделанные в этой работе, фактически подводят к идее о том, что в тонкой плёнке могут существовать «поверхностно-обусловленные коллективные электронные колебания».

Таким образом, Ритчи показал, что в тонком металлическом слое границы раздела могут порождать дополнительные коллективные электронные возбуждения (Surface Collective Modes) с пониженной характерной частотой ω_s по сравнению с частотой объёмных плазмонов ω_p . Это был крайне важный момент в разработке теории поверхностных плазмонов.

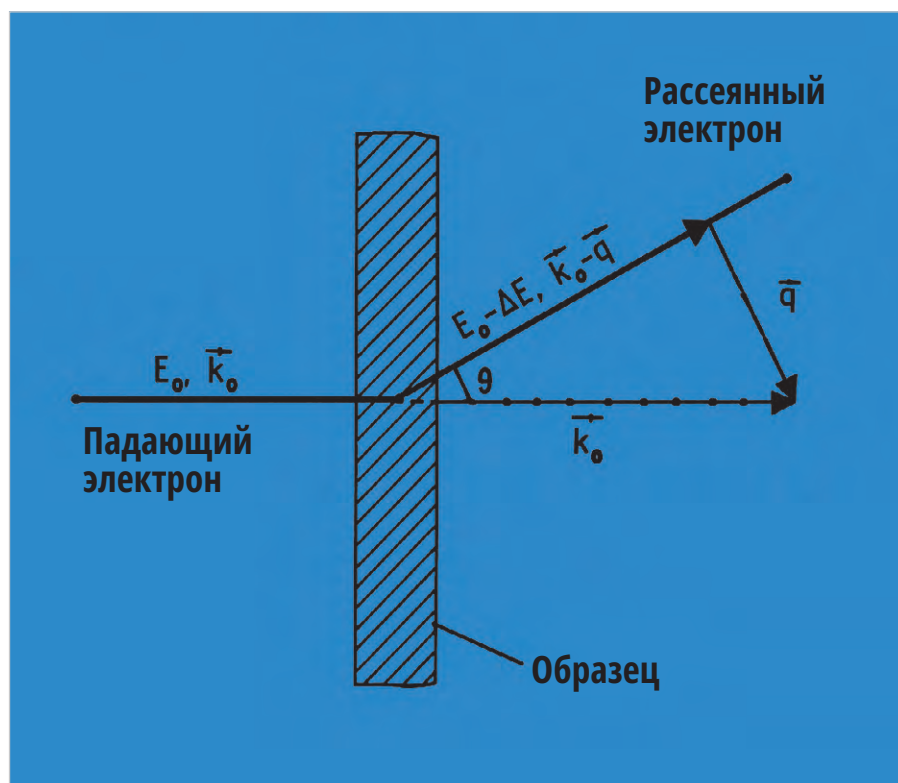


Рис. 4. Схема измерения энергетических потерь электронов в эксперименте «Powell & Swan – 1959»

Теория Ритчи о существовании поверхностных коллективных возбуждений была подтверждена в работе К.Дж. Пауэлла (C.J. Powell) и Дж.Б. Свона (J.B. Swan) [11].

В этой статье, опубликованной в журнале Physical Review, авторы измеряли спектры потерь энергии электронов с энергиями 760, 1000, 1520 и 2020 эВ. В эксперименте «Powell & Swan» электроны, образовавшиеся в катode, ускорялись фиксированным напряжением, формируя пучок с очень узким энергетическим разбросом, который направлялся на металлическую мишень (рис. 4).

В эксперименте Пауэлла и Суона (1959 г.) мишенями служили тонкие самоподдерживающиеся алюминиевые плёнки (Thin Aluminum Foils).

Плёнки изготавливались методом вакуумного напыления алюминия в виде гладких, однородных по толщине плёнок на подложку, которая затем растворялась. Толщина плёнок варьировалась от нескольких сотен до нескольких тысяч ангстрем (типично 100–1000 Å). Через такую мишень электроны могли пройти без критического поглощения, но при этом успевали взаимодействовать с коллективными модами (плазмонами).

При попадании на мишень часть электронов проходила её насквозь без

взаимодействия, формируя так называемый «пик нулевых потерь» (Zero Loss Peak – ZLP), представляющий собой самый интенсивный, первый пик в спектре EELS. Этот пик позволял оценить толщину образца и разрешение прибора.

Другая часть электронов при прохождении через мишень теряла энергию (ΔE) на возбуждение плазмонов или других коллективных мод. Вышедший из образца пучок попадал в энергоанализатор, который представлял собой аналог схемы Мёлленштедта, показанный на рис. 2.

Регистрация рассеянных электронов осуществлялась с помощью детектора на основе пластического сцинтиллятора и фотоумножителя (ФЭУ). Определение зависимости интенсивности счёта от положения щели (магнитного поля) позволила авторам формировать энергетические спектры потерь электронов для различной толщины плёнок (рис. 5).

В результате многочисленных измерений авторы выявили двенадцать пиков потерь в своих спектрах и установили, что каждый из них представляет собой суперпозицию двух типов «элементарных» потерь энергии: 10,3 эВ и 15,3 эВ (рис. 5). То есть весь наблюдаемый спектр потерь алюминия можно разложить на комбина-

ции двух фундаментальных потерь. Пик 15,3 эВ они отождествили с плазменным возбуждением в объёме алюминия (Bulk Plasmon), согласно работам Пайнса – Бома. В то же время пик 10,3 эВ обусловлен поверхностными плазмонами Ритчи (Surface Plasmon).

Важным было то, что при уменьшении толщины плёнки положение и относительная интенсивность низкоэнергетического пика 10,3 эВ заметно менялись, тогда как поведение 15,3 эВ пика оставалось более объёмным. Это явилось ярким доказательством того, что два пика имеют разную физическую природу: один объёмную, другой поверхностную.

В следующей своей статье Пауэлл и Свон получили аналогичные результаты для магния [12]. Затем Пауэлл продолжил работу на сплавах Al–Mg и Al–Cu, в которой показал, что если пики действительно имеют коллективную природу, то при изменении состава сплава их энергии должны меняться не скачком, а непрерывно, вместе с электронной структурой и эффективной концентрацией свободных электронов.

Важным завершением этого цикла стала работа Пауэлла, в которой было продемонстрировано, что поверхностное окисление быстро приводит к исчезновению низкоэнергетических потерь у Al и Mg, тогда как объёмный пик сохраняется по-другому. Это было практически прямым доказательством, что пик с низким уровнем энергии расположен именно на поверхности и чрезвычайно чувствителен к её состоянию [13].

В описанном цикле работ Пауэлл и Свон не просто «замерили» энергетические потери в тонких металлических плёнках, а провели и досконально описали параметрический эксперимент, предоставив возможность другим лабораториям убедиться в достоверности полученных ими результатов. Эта работа легла в основу стандарта для всех будущих EELS-исследований твёрдых тел.

Методика измерений, которую использовали в своих экспериментах Пауэлл и Свон, постоянно модернизировалась и оформилась со временем в отдельное направление, получившее общее название «Transmission Electron Microscopy – TEM». Использование компьютерной техники и машинной обработки результатов измерений привели к созданию в кон-

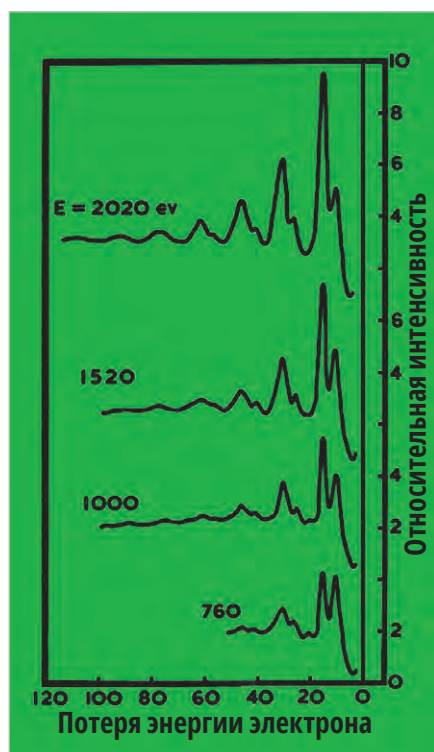


Рис. 5. Характеристические потери энергии электронов для входящих пучков 760, 1000, 1520, 2020 эВ

це 1990-х современной методики EELS, которая позволяет определять химический состав, электронную структуру (плотность незанятых состояний) и структуру плазмонов с высокой точностью. Подробное описание различных модификаций современных установок EELS приведено в работе [14].

Развивая идеи Ритчи, физики-теоретики Е. Стерн и А. Феррелл в 1960 году предложили квантово-теоретическое описание поверхностных плазмонных колебаний вырожденного электронного газа, используя «модель желе» (Jellium Model). Эта фундаментальная квантово-механическая модель однородного электронного газа описывает систему взаимодействующих электронов, движущихся на фоне однородного положительно заряженного фона, который нейтрализует заряд электронов. В упрощённом варианте здесь ионная решётка как бы «размазана» в виде равномерного положительно-го «желе» (Jellium), в котором свободны движутся электроны.

Такой подход позволил обобщить идеи Бома – Пайнса и Ритчи путём упрощённого описания плазмонов без учёта сложной атомной структуры. При этом органично вводятся такие базовые понятия, как, например, объёмные и поверхностные плазмоны и плазменная частота.

Необходимо подчеркнуть, что именно в этой работе было дано одно из первых строгих квантово-теоретических описаний поверхностного плазмона как кванта поверхностных плазмонных колебаний. Иными словами, Е. Стерн и А. Феррелл превратили эффект Ритчи из гипотезы в строгую теорию, подтверждённую экспериментальными данными Свона и Пауэлла.

Фактически, Е. Стерн и А. Феррелл разработали основы общей теории поверхностных плазмонных колебаний (Surface Plasma Oscillations) в рамках модели вырожденного электронного газа с учётом граничных условий на поверхности металла [15].

Для поверхностных плазмонов на границе раздела сред (SP) колебания электронной плотности ограничены тонким слоем поверхности фольги (геометрия 2D).

Естественным следующим шагом в исследованиях плазмонов стало рассмотрение аналогичных процессов в ещё более ограниченном пространстве. Одной из наиболее значимых работ по этой тематике стала монография Уве Крейбига и Михаэля Фольмера, в которой рассмотрены основные свойства и дисперсионные соотношения плазмонных мод металлических частиц с размерами несколько нанометров. Для описания этих мод авторы использовали термин «Localized Surface Plasmons – LSP» (локализованные поверхностные плазмоны), описывающий коллективные колебания электронного газа в металлических наночастицах. Благодаря этой книге термин LSP получил широкое распространение в научной литературе.

Современный взгляд на оптические свойства металлических наночастиц был изложен в работе Лэнса Келли (Lance Kelly) и соавторов [16].

В этой статье, в частности, подробно проанализированы проблемы влияния размера, формы и окружающей диэлектрической среды на образование локализованных поверхностных плазмонов в наночастицах Ag и Au. Подробно рассмотрены методы расчёта сечений поглощения и рассеяния, а также других оптических характеристик LSP для сферических и несферических наночастиц.

На рис. 6, взятом из этой работы, показана наиболее простая форма LSP, представляющая собой дипольную локализованную моду на металлической наночастице-сфере.

Механизм возникновения LSP можно в первом приближении описать следующим образом. Внешнее поле смещает электронное облако относительно положительно ионного остова. В то же время на противоположных сторонах частицы возникает разделение заряда. Таким образом, световая волна заставляет облако свободных электронов в наночастице смещаться относительно положительных ионов кристаллической решётки. В какой-то момент возникает возвращающая сила, притягивающая электроны обратно. То есть процесс напоминает вынужденные колебания пружины. При определённой резонансной частоте амплитуда этих колебаний становится максимальной. Этот эффект носит название «Localized Surface Plasmon Resonance – LSPR» (локализованный поверхностный плазмонный резонанс – ЛППР). Явление LSPR подробно описано в работе [17].

Характерной особенностью ЛППР является очень большое усиление локального электромагнитного поля (до 10 000) на резонансной частоте. Коэффициент усиления, частота максимального поглощения и другие параметры ЛППР зависят от размера и формы металлических наночастиц, а также показателя преломления.

Важно подчеркнуть, что LSP не является бегущей поверхностной волной, а представляет собой локализованное коллективное колебание электронов на замкнутой поверхности частицы. Кроме того, LSP не следует ассоциировать с люминесценцией полупроводниковых квантовых точек при облучении внешним УФ, поскольку это совершенно разные физические явления.

Современная физика твёрдого тела определяет LSP как коллективное колебание электронов, ограниченное геометрией нанобъекта, с размером меньшим, чем длина волны возбуждающего ЭМИ, или сопоставимым с этой длиной. Наряду с этим локализованные плазмонные моды в металлических наночастицах обычно рассматривают как отдельный класс локализованных возбуждений, отличных от распространяющихся поверхностных мод на плоской границе [18].

Более подробно свойства локализованных поверхностных плазмонов, с учётом публикаций начала 2000-х, приведены в статье [19].

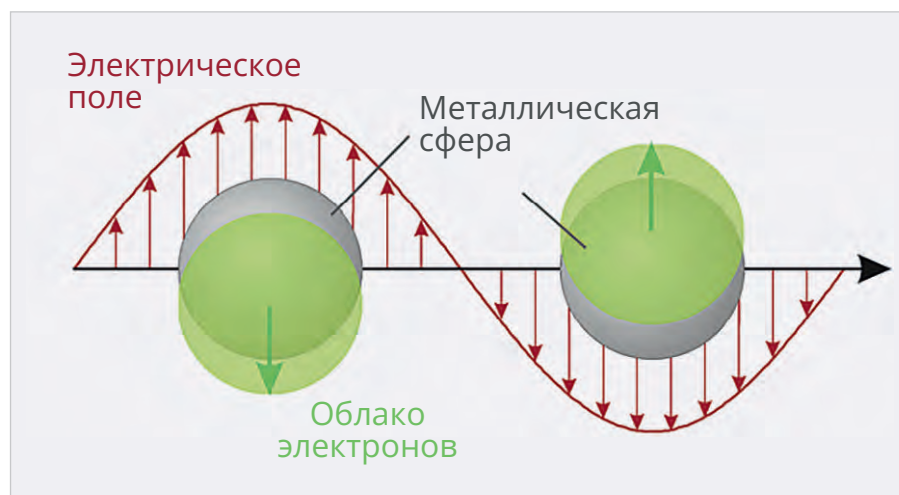


Рис. 6. Смещение зарядового облака электронов проводимости относительно ядер в локализованном поверхностном плазмоне

Таким образом, к началу 1960-х годов сложилась полная теоретическая и экспериментальная картина существования объёмных и поверхностных плазмонов, подтверждённая работами ключевых авторов того периода.

На следующем этапе исследований органически возник вопрос, нельзя ли попытаться возбуждать такие коллективные моды с помощью света? Этот вопрос мы рассмотрим в следующей статье.

Литература

1. Ruthemann G. Naturwissenschaften. Diskrete Energieverluste schneller Elektronen in Festkörpern. Kurze Originalmitteilungen. Volume 29, page 648, (1941). URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01485870>.
2. Pines D., Bohm D. A Collective Description of Electron Interactions: II. Collective vs Individual Particle Aspects of the Interactions. Physical Review. 1952. iss. 85. 338. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.85.338>.
3. Bohm D. Quantum Theory. URL: <https://www.amazon.com/Quantum-Theory-Dover-Books-Physics/dp/0486659690>.
4. Bohm D., Pines D. A Collective Description of Electron Interactions: III. Coulomb Interactions in a Degenerate Electron Gas. Physical Review, v 92, n 3, 1953. URL: <http://users.df.uba.ar/bragas/Web%20roberto/Papers/pines.pdf>.
5. Graham E. A Scholar Finally Gets His Due: David Bohm. Princeton Alumni weekly. URL: <https://paw.princeton.edu/article/scholar-finally-gets-his-due-david-bohm>.
6. Bohmian Mechanics. Stanford Encyclopedia of Philosophy Archive. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/fall2016/entries/qm-bohm/>.
7. Pines D. Collective Energy Losses in Solids. Reviews of Modern Physics, 1956, Vol. 28, No. 3, pp. 184–198. URL: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/process-engineering/omel-dam/documents/handouts/pines.pdf>.
8. Watanabe H. Experimental Evidence for the Collective Nature of the Characteristic Energy Loss of Electrons in Solids. Studies on the Dispersion Relation of Plasma Frequency. Journal of the Physical Society of Japan, 1956, Vol. 11, No. 2, pp. 112–119, DOI: 10.1143/JPSJ.11.112. URL: <https://journals.jps.jp/doi/abs/10.1143/JPSJ.11.112?mobileUi=0>.
9. Möllenstedt G., Bayh W. Characteristics of the Möllenstedt Electron Velocity Analyzer. J. Appl. Phys. 37, 1737 (1966). URL: https://pubs.aip.org/aip/jap/article-pdf/37/4/1737/18337155/1737_1_online.pdf.
10. Ritchie R. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films. Phys. Rev. 106, 874, 1957. URL: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/process-engineering/omel-dam/documents/handouts/rh-ritchie.pdf>.
11. Powell C.J., Swan J.B. Origin of the Characteristic Electron Energy Losses in Aluminum. Physical Review, 1959, Vol. 115, No. 4, pp. 869–875. URL: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/process-engineering/omel-dam/documents/handouts/cj-powell.pdf>.
12. Powell C.J., Swan J.B. Origin of the Characteristic Electron Energy Losses in Magnesium. Physical Review, 1959, Vol. 116, No. 1, pp. 81–83. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.116.81>.
13. Powell C.J. Effect of Oxidation on the Characteristic Loss Spectra of Aluminum and Magnesium. Physical Review, 1960, Vol. 118, No. 3, pp. 640–643. URL: https://electronicsandbooks.com/edt/manual/Magazine/P/Physical%20Review/Physical%20Review%201960-1962/root/data/PhysRev%201960-1962/pdf/PR/v118/i3/PR_v118_p640_1.pdf.
14. Bugnet M. et al. Current opinion on the prospect of mapping electronic orbitals in the transmission electron microscope: State of the art, challenges and perspectives. Journal of Microscopy, 295, 217–235. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jmi.13321>.
15. Stern E.A., Ferrell R.A. Surface Plasma Oscillations of a Degenerate Electron Gas. Physical Review, 1960, Vol. 120, No. 1, pp. 130–136. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.120.130>.
16. K. Lance Kelly, Eduardo Coronado, Lin Zhao, George C. Schatz. The Optical Properties of Metal Nanoparticles: The Influence of Size, Shape, and Dielectric Environment // The Journal of Physical Chemistry B, Vol 107, Issue 3. 668–677. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp026731y>.
17. Kathryn M. Mayer, Jason H. Hafner. Localized Surface Plasmon Resonance Sensors // Chemical Reviews, 2011, 111, 6, 3828–3857. URL: <https://doi.org/10.1021/cr100313v>.
18. Maier S.A., Atwater H.A. Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures // Journal of Applied Physics, 2005, Vol. 98, 011101. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1951057>.
19. Xiaofeng Fan et al. Light scattering and surface plasmons on small spherical particles // Light: Science & Applications (2014) 3, e. 179. URL: <https://www.nature.com/articles/lsa201460>.

10-11
сентября
2026
Санкт-Петербург
Петергоф

Всероссийский
научно-технический форум
«Электромагнитная
совместимость»

«ЭМС»

Организаторы:



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Приглашаем
принять участие
в работе форума

Регистрация



technoemc.ru

При поддержке:



ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМИТЕТ
ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ
«ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ
СОВМЕСТИМОСТЬ
ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ»



Информационные партнеры:

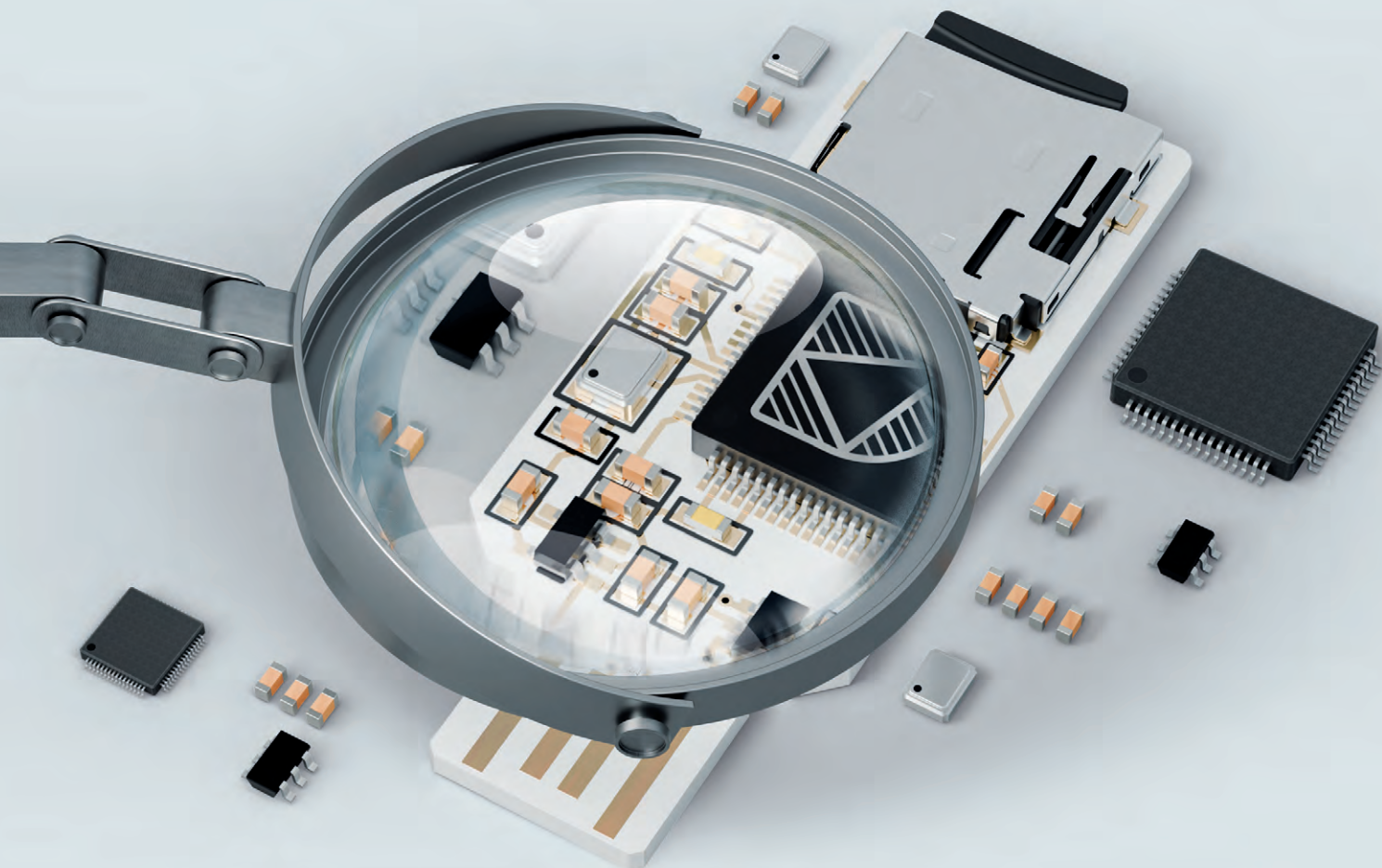




DeltaDesign

ДОМАШНЯЯ

Новая версия для радиолюбителей



Поддерживает
библиотеку компонентов
(включая SMD и TH)



Схемотехнический
редактор



Многослойные платы
до 4 слоев (два режима
трассировки - TopoR
и RightPCB)



Вывод файлов
для производства
в формате Gerber



Купить Delta Design Домашняя

