

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

9

2022

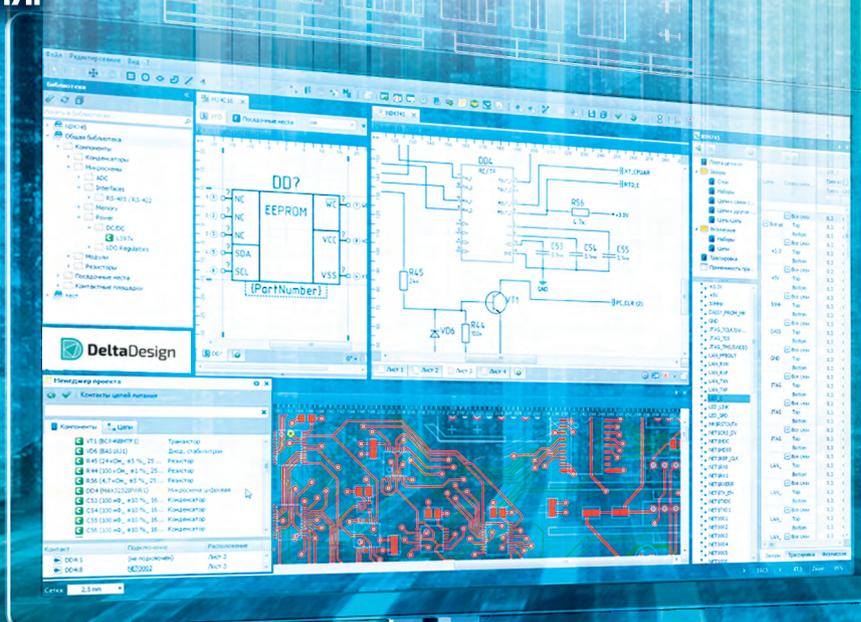
МАТЕРИАЛИЗАЦИЯ ИДЕИ: ЧТО УМЕЮТ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ САПР

В номере:

**РОССИЙСКАЯ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА:**
возможен ли
собственный путь

**СОВРЕМЕННЫЕ
КВАНТОВЫЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛИ:**
перспективы
и тенденции

**МИКРОВОЛНОВЫЕ
ДАТЧИКИ ДВИЖЕНИЯ:**
практические
рекомендации



YouTube

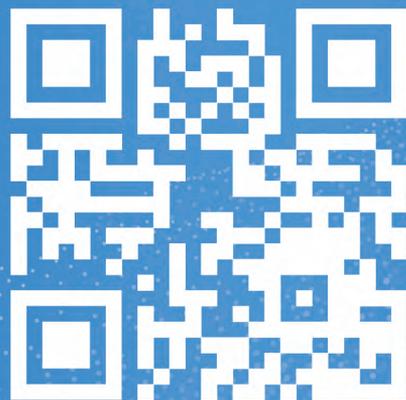


Telegram



FLEX — РАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ПЕРЕДОВЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Когда нет ничего лишнего, но точно есть все нужное





ЧИТАЙТЕ, КАК ВАМ УДОБНО



**ПЕЧАТНАЯ И ЦИФРОВАЯ
ВЕРСИИ ЖУРНАЛА**

ЖУРНАЛ С ГАРАНТИРОВАННОЙ ДОСТАВКОЙ

**СОВРЕМЕННАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА**

**ПОДПИСКА
НА ЖУРНАЛ**

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



Здравствуйте, уважаемые друзья!

В 2022 году вы прочитали множество интересных статей, опубликованных в «Современной электронике». Многие материалы были посвящены анализу текущего состояния и перспективам отечественной микроэлектроники (смотрите ссылки ниже). Возможно, вы не согласитесь со всеми суждениями и прогнозами, однако к озвученным идеям стоит прислушаться, поскольку авторы этих статей – не только специалисты в своих областях, но и патриоты, мечтающие о процветании страны. Мы очень надеемся, что в нынешней непростой ситуации их голоса будут услышаны, а опыт и энтузиазм окажутся востребованными.

Традиционно приглашаем вас посетить наш сайт, где в свободном доступе находится уникальная подборка журналов за многие годы. Не забывайте и о YouTube-канале «Современной электроники», где размещено множество новых роликов на самые актуальные сегодня темы. Смотрите наши репортажи, комментируйте их и делитесь ссылками со своими друзьями и коллегами.

Мы рады, что вы остаётесь с нами!

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 А. Е. Балакирев,
В. К. Жданкин, С. А. Сорокин, Д. А. Кабачник,
Р. Х. Хакимов

Вёрстка А. М. Бабийчук

Обложка Д. В. Юсим

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

Реклама И. Е. Савина (advert@soel.ru)

Учредитель и издатель ООО «СТА-ПРЕСС»

Генеральный директор К. В. Седов

Адрес учредителя и издателя:

117279, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 108,
пом/ком/эт 1/67/тех

Почтовый адрес: 117437, г. Москва,
Профсоюзная ул., 108

Тел.: (495) 232-00-87

info@soel.ru • www.soel.ru

Производственно-практический журнал
Выходит 9 раз в год. Тираж 10 000 экз.
Цена свободная

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

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».

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

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, 2022

ЧИТАЙТЕ
ЖУРНАЛ

в ЭЛЕКТРОННОЙ ВЕРСИИ

на сайте soel.ru

после простой регистрации

и

в ПЕЧАТНОЙ ВЕРСИИ

по подписке

СОДЕРЖАНИЕ 9/2022

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

AdvanteX	21
AdvantiX	29
EREMEX	4-я стр. обл.
LITEMAX	47
ProChip	4, 5, 6
Raystar	51
ИРБИС	19
МЕДИАНА-ФИЛЬТР	7, 27
МОРИОН	5
Остек-СМТ	7, 2-я стр. обл.
ПЛАТАН	4

Читайте в «СТА» № 4/2022:

АВТОМАТИЗАЦИЯ В БИОТЕХНОЛОГИЯХ:
БИОКАД выбирает Fastwel

СВЯТО МЕСТО ПУСТО НЕ БЫВАЕТ:
китайские бренды на российском рынке

БИОИДЕНТИФИКАЦИЯ В ДЕЙСТВИИ:
отечественные разработки для контроля доступа

Я ЗА ТОБОЮ СЛЕДУЮ ТЕНЬЮ:
цифровые двойники в промышленности



Оформляйте подписку на журнал «СТА»
и читайте печатную версию
или электронную версию на www.cta.ru

РЫНОК

4 Новости российского рынка

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

8 Зачем нужны квантовые вычисления? Часть 3.

Современные квантовые вычислители

Виктор Алексеев

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

24 Микроволновые датчики движения для помещений. Обзор функционала и практические рекомендации

Андрей Кашкаров

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

30 Модернизированный барометр-гигрометр- термометр с батарейным питанием на базе микроконтроллера EFM8SB20F16 и E-ink дисплея

Алексей Кузьминов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

38 Схемотехническое моделирование в Delta Design SimOne. Часть 2

Андрей Смирнов, Алексей Гимейн

КОМПЕТЕНТНОЕ МНЕНИЕ

42 Крупнейшие в мире перспективные электронные отечественные проекты с ёмкостью мирового рынка в триллионы долларов

Александр Гордеев, Виктор Войтович, Геннадий Святец

СВОДНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА ЗА 2022 ГОД

52

Новости российского рынка

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

СИСТЕМЫ ВЗВЕШИВАНИЯ ВАУКОН

Одним из крупнейших мировых производителей весоизмерительного оборудования и компонентов, работающих на российском рынке в течение последних десятилетий, была компания Vishay. Однако санкционная политика американских производителей привела к остановке поставок и необходимости поиска новых надёжных поставщиков. Одним из таких примеров может служить турецкая компания Ваукон.

Первый аргумент в пользу данной компании – это 35-летний опыт работы компании на мировом рынке весоизмерительной техники. За такой продолжительный исторический период компания смогла стать заметным игроком на мировом рынке: организовала широкую дилерскую сеть в более чем 90 странах мира, получила все необходимые сертификаты, включая ATEX и IECEx, стала членом европейской организации CECIP и др.

Второй важнейший аргумент – это максимально полный ассортимент предлагаемой продукции, который позволяет не

просто выбрать подходящий компонент, а создать полную автоматизированную систему измерения веса. Компания производит:

- тензодатчики и нагрузочные ячейки;
- модули взвешивания;
- платформенные, напольные весы;
- железнодорожные весы.



А также сопутствующие инструменты для интеграции измерительной техники в автоматизированную систему учёта:

- аналоговые и цифровые преобразователи данных на DIN-рейку;
- индикация: встраиваемые индикаторы, панельные и настенные терминалы для

ввода/вывода данных, промышленные компьютеры с тач-экранами;

- индустриальные контроллеры;
- распаечные коробки;
- промышленные и логистические весы для вилочных электропогрузчиков от 3 кг до 300 тонн;
- программное обеспечение.

Каждая линейка продукции представлена широким модельным рядом. Например, тензодатчики выпускаются для всех современных типов грузоприёмного основания: S-образные, мембранные, балочные, колонные. Для современного оборудования может быть востребована такая опция, как цифровой выходной сигнал.

В заключение хочется добавить об удобном и оперативном сервисе технической поддержки. Компания имеет собственную частную лабораторию и проводит калибровку в соответствии со стандартом ISO 17025 в диапазоне от E2 1 мг до M1 1000 кг. Также поддерживается склад запасных частей. Документация представлена как на продукцию, так и на ПО.

www.platan.ru

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

1,12-дюймовый графический OLED-дисплей разрешением 128×128 точек на печатной плате

Компания Raystar Optronics, Inc представляет графический OLED-дисплей REA128128GWAP3N00000 с разрешением 128×128 точек, выполненный по технологии «кристалл на стекле» (Chip-on-Glass, COG) – кристалл драйвера-контроллера соединён с выводами на стеклянной подложке индикатора.

Дисплейный модуль размещён на печатной плате с отверстиями для винтового соединения, что делает возможным простую установку и быструю сборку. Это помогает пользователям сэкономить время, так как нет необходимости разрабатывать собственную монтажную плату.

В дисплее REA128128GWAP3N00000 применяется микросхема драйвера-контроллера КМОП OLED/PLED SH1107, специально разработанная для управления органическими/полимерными дисплеями. Микро-

схема контроллера способна поддерживать графические дисплеи с максимальным разрешением 128×128 точек. Отображение данных происходит непосредственно в 128×128×4-битной внутренней памяти Graphic Display Data RAM (GDDRAM). Данные и команды передаются из основного модуля микроконтроллера через 4-проводной последовательный синхронный интерфейс SPI (Serial Peripheral Interface).



Доступна модель с белым цветом свечения экрана (яркость 90 кд/м²). Дисплеи

OLED характеризуются высоким контрастом 10 000:1.

Дисплейный модуль предназначен для домашних интеллектуальных бытовых приборов, медицинского оборудования, инструментальных панелей, переносных измерительных приборов, счётчиков и др.

Основные технические характеристики REA128128GWAP3N00000:

- разрешение: 128×128 точек;
- габариты дисплея 26,4×38,6×5,21 мм;
- видимая область экрана 20,076×20,076 мм;
- размер пикселя 0,137×0,137 мм;
- шаг пикселя 0,157×0,157 мм;
- тип дисплея: OLED с пассивно-матричной адресацией;
- коэффициент мультиплексирования строк 1/128;
- диапазон рабочих температур от –40 до +80°C;
- диапазон температур хранения от –40 до +85°C;
- размер диагонали 1,12".

www.prochip.ru

8,4" ЖК-дисплей высокой яркости для применения в широком диапазоне температур

Компания Litemax предлагает жидкокристаллические дисплеи промышленного исполнения серии 0848-T семейства DURAPIXEL, которые характеризуются высокой яркостью свечения экрана 1600 кд/м², что позволяет считывать изображение при яркой внешней засветке, обеспечивается чёткое изображение, натуральные цвета. Технология производства светодиодной системы задней подсветки обеспечивает высокую надёжность и низкое энергопотребление, что хорошо подходит для наружных применений, автоматизированных систем управления предприятием, на транспортных средствах и других ответственных применениях.

Предлагается модель DLD0848-TNB-Q11 выполненная в корпусе с видео-интерфейсами VGA, DVI-D, HDMI. Размер корпуса 204,7×154,2×46,3 мм, вес 1,05 кг.

Дисплей оснащён экранным меню для управления яркостью, контрастностью, регулировкой размера изображения по вертикали и горизонтали и др. Имеются также четыре мембранные кнопки для включения дисплея, входа в меню и навигации по меню.



Предлагаются также бескорпусные исполнения DLF0848-TNN-A11/DLH0848-TNN-Q11. Модель DLF0848-TNN-A11 поставляется без платы управления, а модель DLH0848-TNN-Q11 включает в свой комплект плату управления AD8891GDH (ин-

терфейсы VGA, DVI-D, HDMI) и мембранную клавиатуру.

Дисплеи предназначены для работы в диапазоне температур от -30 до +80°C, диапазон температур хранения от -40 до +90°C.

Основные свойства дисплеев серии 0848-T:

- размер экрана по диагонали 8,4";
- разрешение 1024×768 пикселей;
- контрастность 1400:1;
- насыщенность цвета 81% (NTSC);
- широкий угол обзора в 176° вертикальной и горизонтальной плоскости;
- соотношение размеров сторон экрана 4:3;
- площадь изображения на экране 170,496×127,873 мм;
- время отклика 25 мс;
- количество отображаемых цветов 16,7 млн;
- напряжение питания 12 В;
- потребляемая мощность 7,7 Вт (8,1 Вт с платой управления);
- среднее время наработки до отказа (MTBF) системы подсветки 100 000 часов.

www.prochip.ru

Прецизионный кварцевый генератор ГК317-ТС 100 МГц с опцией фазовых шумов «F» от АО «Морион»

АО «Морион» (Санкт-Петербург), ведущее предприятие России и один из мировых лидеров в области разработки и серийного производства пьезоэлектрических приборов стабилизации и селекции частоты, расширило линейку малогабаритных высокочастотных прецизионных кварцевых генераторов ГК317-ТС 100 МГц. В конце 2022 года заканчиваются испытания нового варианта исполнения кварцевого генератора ГК317-ТС с опцией фазовых шумов «F».



Рис. 1. Внешний вид ГК317-ТС, габаритные размеры: 25×25×12,7 мм

Данная модернизация была проведена с целью уменьшения уровня фазовых шумов (ФШ) на дальних отстройках от несущей частоты (от 100 кГц). Достигнуты ультранизкие показатели фазовых шумов на дальних отстройках от несущей частоты.

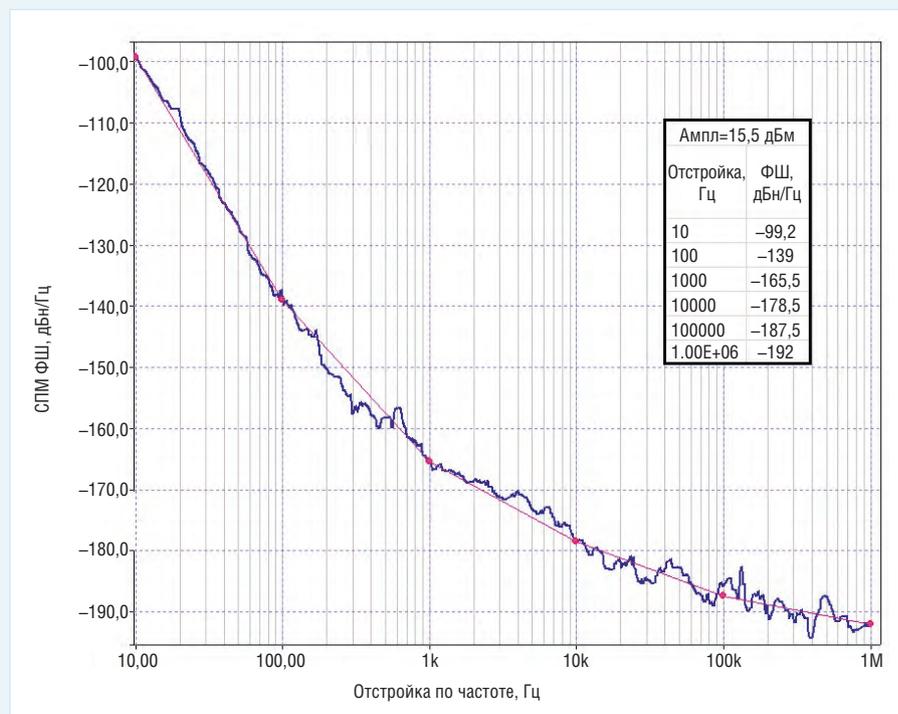


Рис. 2. Фазовые шумы ГК317-ТС с опцией фазовых шумов «F»

Уровень фазовых шумов представлен на рис. 2, на отстройке:

- на 100 кГц < -185 дБн/Гц
- на 1 МГц < -188 дБн/Гц

Экстремально низкий уровень ФШ во всём диапазоне отстроек в сочетании с малыми габаритами делает данный кварцевый генератор идеальным решением для таких применений, как синтезаторы частоты, радиолокационное оборудование, измерительное оборудование, системы спутниковой связи и т.п.

Приглашаем всех желающих посетить стенд АО «Морион» на выставке электронной продукции российского производства «Электроника России» (стенд В211, павильон 1, зал 3) с 22 по 24 ноября 2022 г. в «Крокус Экспо», Москва.

Дополнительная информация об этих и других новых приборах доступна на сайте АО «Морион» или по телефону +7 812 775-95-65.

www.morion.com.ru

РАДИАЦИОННО-СТОЙКИЕ DC/DC-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПОСТОЯННЫМИ НАПЯЖЕНИЯМИ 28 И 42 В

Компания ECRI Microelectronics (КНР) представляет радиационно-стойкие DC/DC-преобразователи серии HDCD/(20-50), выполненные по гибридно-плёночной технологии и предназначенные для применения в бортовой аппаратуре ракетно-космической техники с шинами электропитания с номинальными напряжениями 28 и 42 В. Предлагаются одно-, двух- и трёхканальные модели с выходными мощностями 1,5; 5; 15; 30 и 65 Вт. Модули обеспечивают выходные напряжения 3,3; 5; 12; 15; ±5; ±12; ±15; +5/±12 и +5/±15 В. Конструктивно модули выполнены в корпусах для установки в отверстия печатной платы и объёмного монтажа.

Преобразователи серии HDCD/(20-50) разрабатывались, чтобы выдерживать воздействие потоков нейтронов и больших мощностей доз, которые могут быть решающими факторами при выборе преобразователей для многих применений.

Отбраковка потенциально ненадёжных изделий в процессе производства за счёт дополнительных испытаний позволяет значительно повысить надёжность изделий. Кристаллы микросхем и пассивные компоненты также проверяются и испытываются для оценки качества. Все чувствительные к воздействию радиации элементы испытываются на воздействие радиации.



Общие характеристики гибридно-плёночных радиационно-стойких DC/DC-преобразователей серии HDCD/(20-50):

- диапазон рабочей температуры от -55 до $+125^{\circ}\text{C}$;
- Диапазон температуры хранения от -65 до $+150^{\circ}\text{C}$;
- диапазон входного напряжения: 20...50 В, номинальные напряжения 28 и 42 В;
- входные, выходные цепи и корпус изолированы друг от друга;
- электрическая прочность изоляции 1000 В;
- фиксированная рабочая частота преобразования (от 350 до 500 кГц), типовое значение 400 кГц;
- высокое значение среднего времени наработки до отказа – MTBF (Mean Time Between Failure): от 2×10^5 до $3,3 \times 10^6$ ч (зависит от модели), рассчитанное для условий применения на орбитальном участке полёта;
- набор необходимых сервисных функций для обеспечения работы в аппаратуре: защита от короткого замыкания,

пониженного входного напряжения, вход дистанционного управления включением/выключением, синхронизация частоты преобразования внешней частотой (для некоторых моделей), регулировка выходного напряжения (для некоторых одноканальных моделей), подключение внешней обратной связи, параллельное включение нескольких модулей (для некоторых моделей);

- уровень ионизационной дозовой стойкости 50 и 100 крад (Si), уровень чувствительности к одиночным ядерным частицам с ЛПЭ $75 \text{ МэВ}\cdot\text{см}^2/\text{мг}$;
- применения: аппаратура спутников для геостационарных орбит, автоматические научно-исследовательские станции дальнего космоса и коммуникационные космические системы.

Поставка преобразователей напряжения серии HDCD/(20-50) в Россию осуществляется без оформления экспортной лицензии.

www.prochip.ru

OLED-дисплей REC002004A00300 для вывода алфавитно-цифровых сообщений с интерфейсом SPI

Компания Raystar Optronics, Inc предлагает алфавитно-цифровой OLED-дисплей REC002004AGPP5N00300 с зелёным цветом свечения экрана.



Текстовый дисплей OLED REC002004AYPP5N00300 отображает символы нескольких алфавитов, в том числе и кириллицу, цифры, специальные символы, формат дисплея – 20 знаков × 4 строки.

Встроенный контроллер RS0010-TX обеспечивает функционирование дисплея, система команд практически идентична набору популярного знаковосинтезирующего контроллера LCD-дисплеев HD44780 (Hitachi). Передача данных осуществляется по последовательному интерфейсу SPI. Управляющая микросхема RS0010-TX смонтирована на печатной плате (технология «кристалл на плате», Chip-on-Board, COB). Кристалл микросхемы приклеен к плате и соединён с печатными проводниками тонкими проволочками. Вся конструкция залита защитным компаундом. Такая конструкция отличается высокой механической прочностью, коротким периодом производства и низкой стоимостью, но имеет большие габариты модуля в сборе.

Дисплейный модуль характеризуется высокой контрастностью 10 000:1, что позволяет при небольшой яркости $90 \text{ кд}/\text{м}^2$ и широких углах наблюдения обеспечить

комфортное восприятие изображения в широком диапазоне внешней освещённости.

Дисплейный модуль является хорошей альтернативой вакуумно-люминесцентным дисплеям.

Основные характеристики дисплея REC002004AGPP5N00300:

- габаритные размеры – $98 \times 60 \times 10$ (макс.) мм;
- видимая область экрана – $77 \times 25,2$ мм;
- рабочая площадь экрана – $70,16 \times 20,95$ мм;
- размер пикселя – $0,54 \times 0,55$ мм;
- шаг пикселя – $0,59 \times 0,60$ мм;
- размер знакоместа – $2,9 \times 4,75$ мм;
- яркость свечения экрана: $90 \text{ кд}/\text{м}^2$;
- контрастность 10 000:1;
- угол обзора 160° (мин.);
- режим мультиплексирования строк – 1/16;
- интерфейс SPI параллельный;
- цвет свечения экрана – зелёный;
- диапазон рабочих температур от -40 до $+80^{\circ}\text{C}$.

www.prochip.ru

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

**FLEX – НОВАЯ ЛИНЕЙКА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВ ЭЛЕКТРОНИКИ**

«Остек-Умные технологии» объявляет о запуске новой линейки передовых технологических решений для производителей радиоэлектроники – FLEX! Линейка учитывает основные требования к организации современного производства, требования отраслевых стандартов и мировой опыт и призвана обеспечить максимальную производственную, технологическую и инвестиционную эффективность заказчиков.

При разработке решений FLEX специалисты Остек сконцентрировались на важной для предприятий задаче – обеспечить конкурентоспособность и качество своей продукции, при этом быть готовыми, в том числе технологически, к новым вызовам рынка.



Каждое решение разработано в продуманной комплектации, в которой нет ничего лишнего, но точно есть всё необходимое.

Флагманами FLEX являются:

- **Линия FLEX:SMT** – универсальное решение для поверхностного монтажа электронных изделий.
- **Линия FLEX:THT** – универсальное решение для монтажа выводных компонентов с помощью технологии селективной пайки мини-волной припоя.

Обе линии ориентированы на задачи, требующие высокой гибкости производства и ответственного подхода к качеству продукции.

Каждое решение FLEX соответствует технологическим потребностям более чем 80% предприятий и позволяет оперативно адаптироваться к любым производственным изменениям. Также в состав решений включён комплекс технологической и сервисной поддержки, позволяющий эффективно внедрить новый инструмент производства и эксплуатировать его в течение многих лет.

В дальнейшем линейка FLEX будет расширяться и развиваться, адаптируясь под актуальные задачи предприятий радиоэлектронной отрасли.

ostec-flex.ru
flex@ostec-group.ru

**О ВОДОПОДГОТОВКЕ
В ЭЛЕКТРОННОЙ ОТРАСЛИ**

В электронной отрасли деионизованная вода является одним из ключевых компонентов техпроцесса при производстве печатных плат, интегральных микросхем, полупроводников, солнечных батарей и пр. Помимо технологических нужд, специально подготовленная вода применяется для питания вспомогательного оборудования – в системах охлаждения, вентиляции и пр.

В зависимости от размера и типа производимой продукции в техпроцессе используется ДИ-вода разных марок по стандартам – ОСТ 11-029.003-80 («марка А»), ASTM D5127, SEMI, ГОСТ Р 58431-2019, ГОСТ Р 58144-2018. В отличие от медицины и фармацевтики, где основная задача состоит в сохранении стерильности, для электроники важно остаточное содержание ионов, газов и частиц, требования тем жёстче, чем меньше размер выпускаемой продукции. Степень очистки воды приближается к те-



оретически возможному пределу, поэтому важным мероприятием является хранение и доставка потребителям полученной ДИ-воды без потери качества.

Набор стадий очистки воды для электронной отрасли обеспечивает максимальное снижение солесодержания в объёме блока получения и обязательную доочистку в потоке в системе распределения. Требуемое качество ДИ-воды обеспечивается за счёт применения комбинации традиционных методов фильтрации, ионного обмена и методов на базе мембранных технологий – ультрафильтрации, обратного осмоса, электродеионизации, мембранной дегазации.

Система распределения имеет значительную поверхность и время контакта с ДИ-водой, поэтому все компоненты должны

быть выполнены из инертных материалов и не вносить дополнительных загрязнений. Системы распределения проектируются замкнутыми кольцевыми с постоянной циркуляцией в турбулентном режиме, отсутствием застойных зон, из специализированных полимерных материалов (PVDF, PP) и с санитарной арматурой. Система хранения и распределения может включать: засыпные фильтры со смолами смешанного действия и удаления бора, обеззараживание и снижение ТОС, удаление газов, частиц 0,45–0,05 мкм, теплообменное оборудование, буферный бак с наддувом инертного газа для исключения контакта с атмосферой.

Специалисты АО «НПК МЕДИАНА-ФИЛЬТР» имеют многолетний опыт проектирования и реализации проектов по подготовке, хранению и распределению деионизованной воды и готовы решить ваши задачи.

www.mediana-filter.ru
+7 (495) 660-07-71

ЭКОСИСТЕМА «СТА-ПРЕСС»

БОЛЬШЕ, ЧЕМ ЖУРНАЛ! ЛУЧШЕ, ЧЕМ ПОРТАЛ!



www.cta.ru / www.soel.ru

Зачем нужны квантовые вычисления?

Часть 3. Современные квантовые вычислители

Виктор Алексеев (victor.alexeev@gmail.com)

В третьей части статьи приведён краткий обзор других существующих на сегодняшний день основных типов квантовых компьютеров:

- квантовые адиабатические вычислители (Adiabatic Quantum Processing Unit);
- вычислители с квантовым отжигом (Quantum Annealing Processing Unit – QAPU);
- вариационные квантовые вычислители (Variational Quantum Eigensolvers);
- вычислители собственных значений с квантовым отжигом (Quantum Annealer Eigensolver – QAE).

Адиабатические квантовые вычисления

В начале 2000-х годов существенно замедлился рост исследований в области создания универсального квантового цифрового компьютера (Universal Digital Gate Quantum Computer – UDQGC), способного взламывать любые шифры. Стало понятно, что создать такой компьютер на базе существующих технологий просто невозможно.

В одной из последних статей, опубликованной в августе 2022 года, отмечается, что пока ещё нельзя говорить о явном преимуществе универсальных цифровых квантовых компьютеров с вентиляционной обработкой UDQGC перед классическими компьютерами с бинарной логикой SDBLC в каких-либо приложениях. На современном этапе развития всё больше экспертов склоняются к направлению совмест-

ного использования UDQGC и SDBLC в гибридных схемах VQE [1] (рис. 1).

Ещё двадцать лет назад разработчики квантовых компьютеров задумались о том, нельзя ли, не прерывая начатые направления исследований и используя существующий на тот момент уровень развития науки и техники, сделать ещё что-нибудь полезное из кубитов, кроме UDQGC.

Одной из актуальных задач прикладной математики является поиск алгоритмов решений оптимизационных задач с нахождением минимальных значений целевых функций. В качестве примера таких задач в первую очередь рассматриваются задачи комбинаторной оптимизации типа «Non-deterministic polynomial NP – class» (класс недетерминированных полиномиальных задач). Задачи NP являются изначально настолько трудными, что для них нет алгоритмов решения с

помощью классических стандартных цифровых компьютеров с бинарной логикой (SDBLC) [2].

В качестве примера можно вспомнить известную задачу, в которой нужно определить оптимальный маршрут, по которому коммивояжеру нужно объехать N пунктов за минимальное время (travelling salesman problem – TSP). Количество всех возможных вариантов маршрутов в этой задаче рассчитывается по формуле $N! = 1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \dots \cdot N$ (N -факториал). Для небольшого количества пунктов задача TSP решается с помощью стандартных компьютеров с двоичной логикой. Однако, например, для ста пунктов назначения количество всех возможных вариантов будет представлено уже 158-значным числом, и решение становится непосильным даже для самых мощных современных SDBLC. Решения подобных задач носят не только чисто теоретический характер, но также являются крайне важными для таких приложений, как крупные логистические схемы, моделирование новых фармакологических препаратов, модели атомов и молекул и других аналогичных приложений.

Известные алгоритмы решения задач типа NP натолкнули физиков, знакомых с классической теорией адиабатических процессов [3], на мысль о том, что есть много общего в алгоритмах, описывающих поведение простых квантово-механических систем, и известных алгоритмах решения некоторых «трудных задач». В общем случае термин «адиабатический» относится к тем процессам с участием квантово-механических систем, в которых сохраняется полная энергия.

В упрощённой формулировке адиабатический подход к квантовой механике можно сформулировать в следующем виде: «Если интервал времени, в течение которого длится внешнее воздействие, направленное на некоторую квантово-механическую систему, будет настолько большим, что система не сможет преодолеть ближайший энергетический барьер, то она может оставаться сколь угодно долго в состоянии с минимальной суммарной энергией и с изменёнными координатами

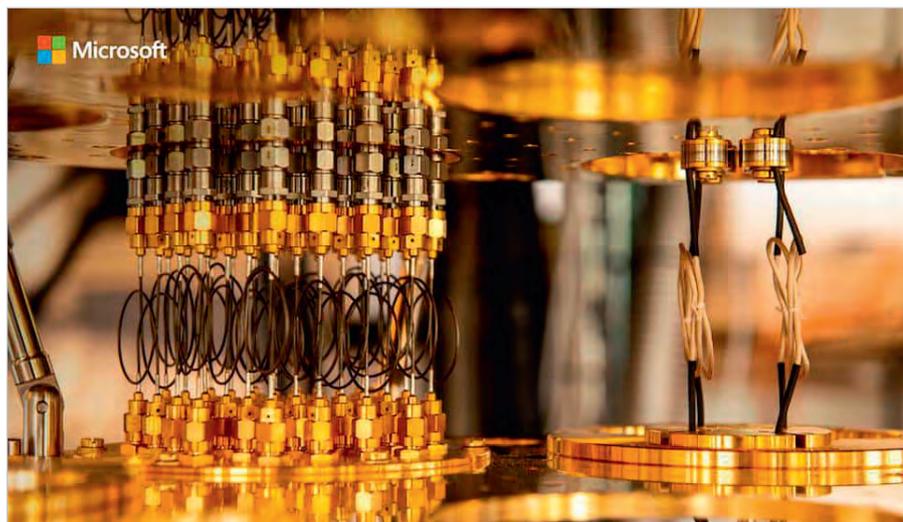


Рис. 1. Отладочный комплект «Microsoft quantum development kit» позволяет совместно использовать стандартный и квантовый компьютеры в режиме VQE [1]

вектора состояния в гильбертовом пространстве». Поэтому можно использовать алгоритмы, описывающие переход квантово-механической системы в состояние с наименьшей энергией, для решения задач типа NP.

Для того чтобы понять, как связаны изменения квантово-механической системы с решением математической задачи, нужно всё же использовать некоторые специальные термины. Известно, что энергетическое состояние физической системы описывается оператором полной энергии – гамильтонианом \mathbf{H} , в математическую формулу которого входят параметры, характеризующие потенциальную и кинетическую энергию системы, импульс, координаты, векторы скорости и ускорения и т.д. Не вдаваясь в подробности, можно сказать, что гамильтониан \mathbf{H} – это просто название некоторой матрицы, с помощью которой в математическом виде записывается полная энергия системы.

С учётом отмеченного подхода к адиабатическим изменениям алгоритм решения задач класса NP можно свести к поискам минимальных значений гамильтониана в энергетическом спектре системы. Состояние системы, соответствующее минимальному гамильтониану, получило название «собственное» состояние с минимально возможной полной энергией.

Другим мощным стимулом для создания адиабатических квантовых вычислителей AQC стала опубликованная в 2000 году работа Эдварда Фархи (Edward Farhi), который вместе с группой своих сотрудников доказал, что определённый класс задач комбинаторной оптимизации достаточно легко сводится к квантовому алгоритму с поиском минимума гамильтониана в основном состоянии системы. Кроме того, для этого класса задач можно в принципе разработать адиабатический квантовый компьютер, который будет способен решать подобные задачи [4].

Гамильтониан, зависящий от времени, для некоторой абстрактной системы можно записать в следующем виде:

$$H(t) = (1-S)H_b + SH_p,$$

где $S = t/T$;

t – текущее время;

T – полное время эволюции;

H_b – начальный гамильтониан при $t=0$;

H_p – конечный гамильтониан системы в основном (наименьшем энергетическом) состоянии при $t = T$.

Если оставить некоторую абстрактную систему в покое и оградить её от любого внешнего воздействия, то она постепенно будет стремиться к своему основному состоянию с минимальной суммарной энергией. В качестве очень приблизительной иллюстрации эволюционного перехода системы из одного начального состояния в «собственное» состояние можно привести чашку со льдом, которую переставили из морозильной камеры холодильника на массивный постамент в «стерильной» комнате с очищенным от пыли воздухом и с положительной температурой, близкой к точке росы, исключаяющей испарение. Если никак не влиять извне на процесс таяния (не подогревать, не трясти лёд и т.д.), то постепенно без испарения лёд перейдёт полностью в воду, которая через некоторое время примет температуру окружающей среды. Важно то, что эволюция системы зависит от времени. В предельных случаях, когда время (t) стремится к нулю, динамическое состояние системы остаётся неизменным. В другом случае, при стремлении времени (t) к бесконечности, будет происходить идеальный адиабатический эволюционный переход. Для идеального случая справедливо полное выполнение всех условий адиабатической теоремы, а именно утверждение о том, что если система первоначально в момент времени $t = 0$ находилась в основном состоянии с гамильтонианом $H_b = H(0)$, то при адиабатической эволюции в момент времени $t = T$ система перейдёт в основное состояние с гамильтонианом $H_p = H(T)$, но с другими координатами. При этом необходимо учитывать, что мы имеем дело не с обычными декартовыми координатами x, y, z материальной точки, а с координатами вектора состояния квантово-механической системы в гильбертовом пространстве. В указанном выше примере лёд в чашке занимал один объём, а образовавшаяся вода – другой.

Опуская другие научные достижения в области AQC, можно говорить о том, что в начале 2000-х была подготовлена теоретическая база адиабатических квантовых вычислений (AQC). При этом основополагающей стала идея, заключающаяся в том, чтобы создать алгоритм решения «трудно решаемой задачи» в формате алгоритма поведения некоей квантово-механической системы, для которой экспериментальное нахождение её основного состояния с минимальным значением

гамильтониана было бы одновременно и искомым решением для первоначальной NP-задачи.

Дело оставалось за «малым» – необходимо было создать аппаратную часть адиабатического квантового вычислителя AQC.

Сама конструкция адиабатического квантового вычислителя (AQC) принципиально отличается от конструкции универсального цифрового квантового компьютера с вентиляционной обработкой (UDGQC), рассмотренного в первой части статьи [5].

В универсальных цифровых квантовых компьютерах UDGQC вычисления контролируются с помощью унитарных квантовых логических вентилях, изменяющих состояния каждого кубита.

В противоположность системе контроля каждого отдельного кубита адиабатический квантовый вычислитель не имеет вентилях и не использует алгоритмы и квантовые операторы, которые были рассмотрены в первой части статьи для квантовых компьютеров типа UDQC. В адиабатическом вычислителе управление реализуется через манипулирование полной энергетической картиной всей системы в целом с помощью внешних магнитных полей, которые действуют как на запутанные комбинации кубитов, так и на связи между ними.

На первом этапе разработок AQC нужно было найти конструкцию простых и легко масштабируемых кубитов, а также средства контроля их состояния.

Ещё в 1999 году в Кембридже была разработана конструкция кубита, состоящая из трёх «Джозенсоновских переходов ДП» (Josephson Junction – JJ), расположенных на алюминиевом кольце диаметром около двадцати нанометров. Два ДП, в которых генерировались токи противоположных направлений, использовались в качестве кубитов. Третий ДП был изготовлен в конструктиве «SQID – Superconducting Quantum Interference Device» и использовался для контроля состояния двух других ДП. Авторы разработки назвали свою конструкцию «Superconducting persistent-current qubit». По существу, этот кубит представлял собой прототип современного потокового квантового кубита с ДП [6].

Принцип действия кубитов, основанный на эффекте Джозефсона в сверхпроводниках, был рассмотрен в первой части статьи. Коротко, в общем виде

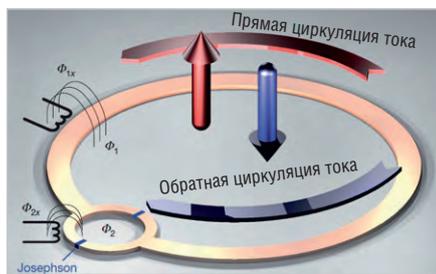


Рис. 2. Токи сверхпроводимости, возникающие в конструкциях кубитов с переходами Джозефсона (Josephson junction), в зависимости от направления формируют два основных состояния суперпозиции [7]

работу кубитов типа «Superconducting Persistent Current Qubit – SPCQ» можно представить следующим образом. При криогенных температурах в кольцеобразном сверхпроводнике, разделённом тонким слоем изолятора, циркулирующие токи сверхпроводимости проходят через ДП благодаря туннельному эффекту. Разность фаз волновой функции обуславливает магнитный поток. Поскольку ток и разность фаз не могут быть точно определены одновременно, то их крайние положения можно использовать в качестве основных состояний кубита, а текущее состояние – в качестве суперпозиции. Таким образом, токи сверхпроводимости, возникающие в такой конструкции, в зависимости от направления формируют два основных состояния кубита (рис. 2) [7].

Внешнее электромагнитное поле может переключать систему в одно из конечных состояний. Конечное состояние кубита считывается с помощью SQUID. Этот сверхпроводящий квантовый интерференционный датчик (СКВИД) на базе сверхпроводящей петли, содержащей ДП, предназначен для измерения сверхмалых магнитных полей, вплоть до 5×10^{-14} Т (Tesla). В упрощённом варианте СКВИД представляет собой сверхпроводящее кольцо с двумя джозефсоновскими переходами, которые разделяют контур на две части. Под воздействием внешнего магнитного поля образующиеся сверхпроводящие токи на одном из контактов будут вычитаться из постоянно внешнего тока и складываться на втором контакте. В результате между туннельными контактами возникнет разность фаз, вызывающая интерференцию, зависящую от приложенного внешнего магнитного поля. Специальный алгоритм контроля зависимости напряжения от внешнего поля позво-

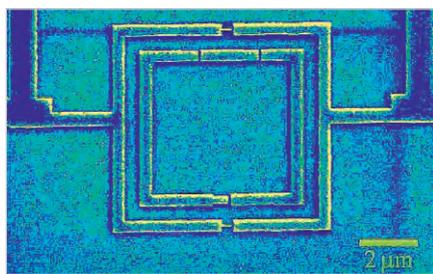


Рис. 3. Структура кубита типа SPCQ с тремя Джозефсоновскими переходами, использованного в лабораторной модели квантового вычислителя голландского технического университета TU Delft [9]

ляет обнаруживать отдельные кванты магнитного потока.

Следует отметить, что существуют также конструкции SQUID с одним ДП. Подробно модель работы кубитов типа SPCQ, контролируемых с помощью SQUID, описана в [8].

На рис. 3 показана структура 3-секционного кубита типа SPCQ, окружённого системой считывания SQUID [9]. Эта конструкция использовалась в ранних лабораторных моделях квантового вычислителя голландского технического университета TU Delft. В правой части приведена эквивалентная схема этого кубита. Сам кубит соответствует внутреннему контуру с тремя ДП (разрывы на рис. 3). Внешний контур, окружающий кубит, соответствует системе считывания SQUID. Разрывы во внешнем контуре указывают на два дополнительных ДП на системе считывания SQUID.

Одним из основных преимуществ этой конструкции является то, что она изготавливалась методом стандартной литографии, позволяющим делать практически идентичные дешёвые копии кубитов в массовом производстве.

Впервые адиабатические квантовые вычисления для решения трудной задачи «MAX CUT» были опробованы объединённой группой, в состав которой вошли учёные и инженеры из Cambridge Massachusetts, Stanford, California, Berkeley, California, IBM Almaden Research Center, San Jose, California [10].

В эксперименте была задействована лабораторная установка с ядерно-магнитным резонансом (ЯМР), в которой в качестве кубитов использовались поляризованные молекулы химического раствора [11].

Для оптимизации задачи «MAX CUT» был разработан адиабатический кван-

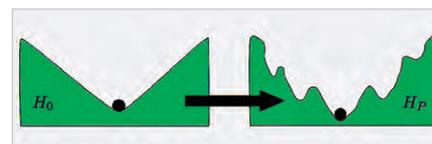


Рис. 4. Упрощённая схема изменения мгновенных значений гамильтониана в процессе адиабатических квантовых вычислений [13]

товый алгоритм, с помощью которого медленно менялся зависящий от времени гамильтониан системы. Результаты этой работы для упрощённого варианта «MAX CUT» хорошо согласовывались с результатами, полученными с помощью стандартного компьютера с двоичной логикой. Таким образом, экспериментально была доказана возможность использования квантовых адиабатических вычислений для решения трудно-го класса задач NP [12].

Дальнейшее развитие аппаратной части АКС проходило по линии усовершенствования описанных выше кубитов и систем контроля их состояния.

Одновременно разрабатывались и теоретические алгоритмы работы АКС.

Весь процесс вычислений с помощью АКС можно разбить на следующие этапы:

- математическая формулировка поставленной задачи с учётом методов оптимизации;
- определение граничных условий;
- квантовые вычисления в процессе эволюции системы.

Процесс адиабатического квантового вычисления можно проиллюстрировать на следующем примере. Пусть в некоторой системе со связанными кубитами используются спины электронов с состояниями «вверх», «вниз» и суперпозицией этих состояний. В качестве механизма, управляющего кубитами, применяется внешнее магнитное поле, которое изменяет энергетическое состояние системы, а значит, и гамильтониан H , по заданному алгоритму. Упрощённая схема алгоритма адиабатических квантовых вычислений показана на рис. 4 [13]. В рассматриваемом нами примере на первом этапе мощное магнитное поле повернуло спины всех кубитов системы в одном направлении и перевело систему в основное состояние с гамильтонианом H_0 (левый график рис. 4). Затем мы снимаем внешнее воздействие, то есть выключаем внешнее магнитное поле, и наблюдаем, как система постепенно переходит в своё конечное основное состояние с гамиль-

тонианом H_p (правый график рис. 4). При идеальном адиабатическом процессе система минует все локальные энергетические уровни и переходит в конечное состояние с минимальным из всех возможных значений гамильтониана.

На практике наиболее близкой к рассмотренному примеру оказалась математическая модель статистической физики, описывающая взаимодействие между отдельными магнитными моментами в ферромагнитном веществе, «модель «Изинга»» (Ising model) [14].

В самом простом виде одномерной модели «Изинга» считается, что электроны расположены в узлах регулярной плоской решетки и можно учитывать взаимодействие между собой только соседних магнитных моментов. В идеальном случае, если убрать внешнее магнитное поле, то при отсутствии любого другого внешнего воздействия такая система постепенно переходит в состояние с наименьшей суммарной энергией, при котором все магнитные моменты останутся ориентированными вдоль некоторого выделенного направления. Это соответствует «ферромагнитной модели «Изинга»». Следует отметить, что для случая неферромагнитных материалов спины в основном состоянии для соседних решеток будут ориентированы в противоположных направлениях.

В реальной жизни на систему могут воздействовать различные внешние факторы, такие, например, как тепловое движение электронов, магнитное поле Земли, микровибрации и т.д. Поэтому в реальных условиях полностью равновесного состояния с одинаковой ориентацией всех магнитных моментов не будет. Достаточно подробно модель «Изинга» рассмотрена в [15].

Изначально модель «Изинга» была разработана для того, чтобы описать фазовые переходы в магнетиках. Однако алгоритм этой модели со временем стал основой для широкого класса так называемых решётчатых моделей (lattice model), позволяющих исследовать и другие процессы, которые можно свести к задаче о взаимном влиянии микросистем, размещённых в узлах регулярной решетки при различных внешних условиях [16].

Свойство алгоритма модели «Изинга» адаптироваться для решения других задач позволило создать целый класс так называемых «задач оптими-

зации Изинга». Например, в рассмотренной выше задаче коммивояжёра минимальное время прохождения по всему маршруту будет соответствовать минимальному значению гамильтониана в оптимизационной задаче «Изинга».

Если вернуться к задаче о коммивояжёре и оставить ему только три пункта назначения (рис. 5) [17], то минимальное время, за которое будет пройден весь маршрут с одной и той же скоростью, можно записать в такой форме:

$$T = V[S1 + S2 + S3 + S4 + S5 + S6],$$

где $S1(0, 1, 2, 3, 0)$ – это расстояние по маршруту от стоянки коммивояжёра (точка 0) до посёлка 1, затем до посёлка 2, затем до посёлка 3 и обратный путь и т.д. (рис. 5).

Для простейшего варианта 2-D модели «Изинга», в которой рассматривается вариант с четырьмя спинами, размещёнными по углам квадрата, гамильтониан системы можно записать в следующем виде:

$$H_4 = -J(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_4 + \sigma_4\sigma_1 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_4\sigma_2),$$

где: суммируются только спиновые переменные соседних пар σ_i ;

$J > 0$ – это константа, описывающая силу взаимодействия между соседними спинами.

Всего в модели с четырьмя спинами в углах квадрата взаимодействие реализуется по периметру квадрата (4 варианта) плюс 2 варианта по диагоналям.

В модели «Изинга» суммируется энергия взаимодействий между спинами каждой соседней пары. При этом взаимодействие между соседними спинами определяет параллельное выстраивание магнитных моментов вдоль некоторого выделенного направления, понижая тем самым энергию системы и внося в неё отрицательный вклад $-J$. С другой стороны, антипараллельная ориентация соседних моментов энергетически невыгодна и приводит к увеличению энергии на величину $+J$.

Суммарная энергия системы зависит от того, выровнены одинаково все спины или нет. В идеальном случае все слагаемые приведённого выше гамильтониана должны иметь отрицательное значение.

Сравнивая последнюю, приведённую выше, формулу гамильтониана для 2-D «модели Изинга» (2D – 4 nodes) с формулой минимального времени прохождения маршрута в задаче с коммивояжером, можно увидеть, что оба математических выражения аналогичны по структуре, за исключением констант.

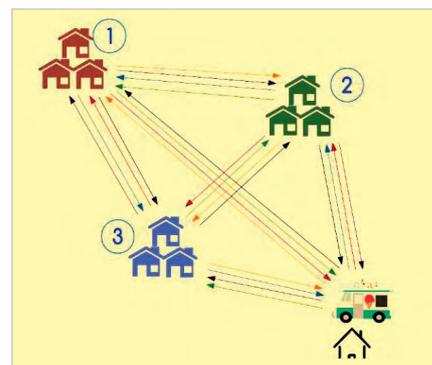


Рис. 5. Возможные варианты маршрутов для задачи коммивояжёра из трёх пунктов [17]

Таким образом, мы можем исходную задачу с коммивояжёром свести к алгоритму её решения с помощью модели «Изинга», используемой в адиабатическом квантовом вычислителе [18].

В общем случае основная задача адиабатических квантовых вычислений сводится к тому, чтобы представить поставленную задачу оптимизации в такой форме, в которой её сможет решить соответствующий квантовый вычислитель. Развитие аппаратной части этих вычислителей способствовало развитию нового направления, получившего название адиабатической квантовой оптимизации (adiabatic quantum optimization – AQO). В настоящее время это направление успешно используется в самых различных приложениях для решения трудных NP-задач.

К сожалению, идеальный адиабатический квантовый вычислитель, в котором полностью выполнялись бы все условия адиабатического процесса, крайне сложно реализовать на практике.

Кроме того, для решения задач класса NP с приемлемыми точностями необходимы довольно большие времена вычисления. При этом необходимо использовать большие количества кубитов, что, в свою очередь, увеличивает и шум, и время обработки [19–21].

Поэтому был разработан упрощённый вариант адиабатических квантовых вычислений, в котором эволюционный процесс идёт «не сам по себе», а регулируется внешним магнитным полем.

Лидером в разработке и производстве таких квантовых вычислителей является канадская фирма «D-Wave Systems», предложившая почти 20 лет назад упрощённую модель адиабатического устройства с управляемым эволюционным процессом, которое получило

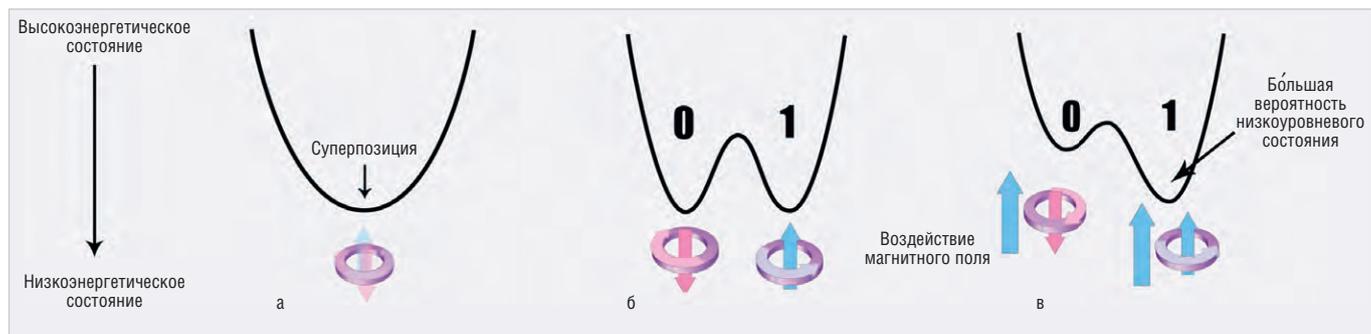


Рис. 6. Три этапа квантового отжига (quantum annealing – QA) [23]

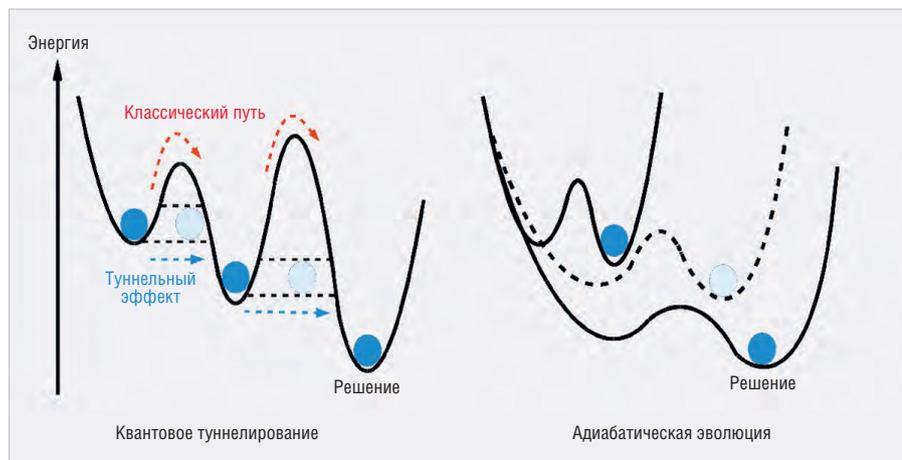


Рис. 7. Прохождение энергетических барьеров при квантовом отжиге (левый рисунок) и в классическом адиабатическом варианте (правый рисунок) [24]

название «quantum annealing processing solver QAPS» – вычислитель с квантовым отжигом [22].

Входящий в название этого вычислителя термин «annealing processing» (процесс отжига) заимствован из металлургии, где методика отжига, подразумевающая нагрев металла до определённой температуры с последующим остыванием при различных режимах, позволяет снять внутренние напряжения и получить заданную кристаллическую структуру.

Процесс квантового отжига можно пояснить графиками, приведёнными на рис. 6 [23]. Предположим, мы передали системе определённое количество энергии, например, нагрели до нужной температуры, при которой она находится в некотором основном начальном состоянии с гамильтонианом H_0 . Далее нам нужно гарантированно перевести систему в основное состояние с минимальным конечным гамильтонианом H_p . Энергия системы меняется в процессе квантовой эволюции. В начале процесса есть только один энергетический минимум (рис. 6а). Для того чтобы система не «зависла» в одном из локальных минимумов, можно «облегчать» пре-

одоление этих экстремумов с помощью внешнего магнитного поля.

В результате появляется второй энергетический минимум (рис. 6б). В этом состоянии, получившем название «двухъямный потенциальный барьер» (double-well potential), кубиты находятся в состоянии суперпозиции. При этом левый кубит соответствует состоянию «ноль», а правый кубит – состоянию «единица».

Если каким-либо образом не воздействовать на систему, то в конце процесса кубит может оказаться в одном из крайних состояний («ноль» или «единица») с равной вероятностью 50%. Используя внешнее магнитное поле, можно управлять процессом квантовой эволюции и остановить процесс в той точке, где кубит с наибольшей вероятностью будет иметь минимальное значение гамильтониана H_p (рис. 6в).

При чисто адиабатическом процессе эволюции квантовой системы частица может «застрять» в какой-нибудь энергетической яме, как это показано в правой части рис. 7 [24]. Внешнее магнитное поле в процессе квантового отжига помогает частице «проходить насквозь» локальные энергетические экстремумы состояний за счёт «кван-

тового туннелирования между ними (левая часть рис. 7). Таким образом, мы можем управлять процессом квантовой эволюции, искусственно корректируя энергетический ландшафт с целью получить желаемый результат с более вероятным исходом.

Эффект квантового туннелирования заключается в том, что электрон при определённых условиях может преодолеть потенциальный барьер, разделяющий энергетические уровни. Причём перемещение на другой уровень происходит практически мгновенно. Квантовое туннелирование – это одно из самых интересных явлений микромира, обещающее в будущем возможность создавать уникальные устройства, например, транзисторы с быстродействием, в миллиард раз превышающим современные уровни [25].

Процесс квантового туннелирования при квантовом отжиге можно понять, если представить себе теннисный мячик, попавший в лунку, соединённую наклонным туннелем с другой лункой. В результате игрок достанет мячик из лунки, находящейся ближе к финишу. Эффект туннелирования часто иллюстрируют также процессом пробивания пульей мишеней из разных материалов. Через один энергетический барьер электрон может свободно проходить насквозь на другой уровень, а через другие – нет.

Квантовые вычислители с отжигом работают под управлением магнитных полей, изменяющихся в соответствии с квантовыми алгоритмами. Для решения задач оптимизации в настоящее время разработано достаточно большое количество квантовых адиабатических алгоритмов [26].

Внешнее программируемое магнитное поле, изменяющееся по заданному алгоритму, способно смещать динамику отжига в сторону желаемого решения. В терминах адиабатических квантовых вычислений такие поля

получили название «поле смещения – bias field». Эти продольные поля также могут применяться в качестве «антисмещения – antibias», отфильтровывающего нежелательные переходы в процессе квантовой эволюции [27].

Исключительно важным моментом, обеспечивающим успешный результат квантового отжига, является связь между кубитами. Объединение кубитов в квантовых вычислителях реализуется с помощью устройства, получившего в англоязычной литературе название – «coupler». Это устройство, использующее свойства «запутанности» квантовых частиц, может быть запрограммировано так, чтобы в конечной точке квантового отжига оба кубита оказались в одном из четырёх возможных состояний: либо «ноль», либо «единица», либо две противоположные друг другу позиции.

Рабочие ячейки современных квантовых вычислителей с отжигом содержат сеть перестраиваемых и связанных между собой ВЧ-сверхпроводящих квантово-интерференционных кубитов (ВЧ-СКВИД кубиты). Гамильтониан составного кубита (Compound Josephson Junction CJJ), содержащий два ДП и SQUID, включает в себя члены, описывающие как квантовые состояния токов сверхпроводимости в петле СКВИД и в самих кубитах, так и магнитные потоки, порождаемые этими токами. При наличии внешнего управляющего магнитного поля в формулу гамильтониана добавляется ещё один член, описывающий это поле.

Полный гамильтониан, описывающий текущее состояние сложной квантовой системы, включает в себя матрицы, соответствующие каждому компоненту системы. Детальный анализ такого гамильтониана представляет собой достаточно сложную задачу и требует специальных знаний. Поэтому стоит поверить выводам статьи [28], в которой показано, что текущее состояние составного кубита определяется, кроме всего прочего, непрерывным взаимодействием между собой магнитных полей, обусловленных токами сверхпроводимости самих кубитов и SQUID. Благодаря этому взаимодействию кубиты находятся в связанном между собой состоянии. Иными словами, состояние одного кубита однозначно определяет состояние другого кубита, и наоборот. Более подробно работа современных квантовых процессоров, содержащих JJ кубиты и SQUID, рассмотрены в статье [29].

На рис. 8 [30] показана структурная схема ячейки квантового вычислителя с отжигом, содержащая: составной потоковый кубит с двумя ДП (CCJJ); квантовое интерферометрическое устройство (rf – SQUID); компенсатор тока сверхпроводимости (IPC); устройство считывания состояния кубитов (RO); индукционный тюнер (LT) и два внешних регулятора смещения. Процесс квантового отжига управляется с помощью потока смещения $\Phi_{ccjj}^x(t)$. Общий компенсационный ток смещения I_q обеспечивается током $I_g(t)$. Для управления кубитами используется одна общая линия смещения тока вместо множества индивидуальных для каждого кубита. Смещение CCJJ, в принципе, можно обеспечить для всех кубитов одновременно с использованием одного глобального управляющего сигнала.

Такая схема устойчива к мелким конструктивным отклонениям, которые неизбежно возникают в процессе изготовления и обуславливают вариации критических токов джозефсоновского перехода.

Для хранения независимых от времени управляющих сигналов, которые могут генерироваться непосредственно на кристалле, используется масштабируемая программируемая магнитная память (programmable magnetic memory – PMM). Приведённая на рис. 8 схема также содержит индукционный тюнер (LT), который предназначен для компенсации изменений индуктивности кубита в процессе настройки межкубитных ответвителей [30].

Структура ячейки из таких кубитов обеспечивает однородность поперечного магнитного поля, в котором все входящие в систему кубиты ведут себя одинаковым образом [31].

Для решения сложных задач необходимы квантовые вычислители, способные организовать разветвлённую программно-аппаратную платформу, с помощью которой можно было бы формировать соответствующие алгоритмы. Для этого необходимы квантовые вычислители с большим количеством кубитов. Если два связанных кубита имеют четыре возможных состояния, определяющие энергетический ландшафт, то три кубита имеют уже восемь таких состояний. Количество возможных состояний растёт в геометрической прогрессии с числом кубитов, значительно расширяя энергетический ландшафт и увеличивая

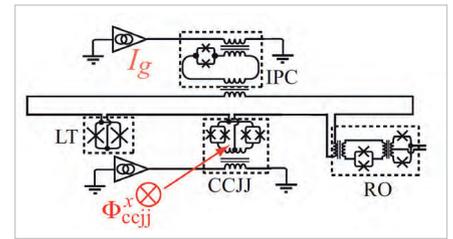


Рис. 8. Структурная схема ячейки квантового вычислителя с отжигом, содержащая составной потоковый кубит с двумя JJ [30]

степень сложности решаемой задачи. С другой стороны, добавление количества кубитов катастрофически увеличивает шум, не позволяя различать текущее состояние кубитов на уровне электронных помех. Кроме того, квантовая система, содержащая более десяти кубитов, перестаёт вести себя в полном соответствии с современной теорией квантовой физики.

В этой статье мы не будем сосредотачиваться на этих вопросах. Эти специальные, очень непростые с точки зрения математического аппарата, вопросы рассмотрены, например, в статьях [32, 33].

Учитывая проблемы, связанные с масштабированием, в современных вычислителях с квантовым отжигом кубиты объединяют в вычислительные кластеры, которые, в свою очередь, объединяются в сложные топологические сети (quantum processing unit – QPU). Выбор схемы объединения кубитов обусловлен несколькими факторами. Во-первых, универсальная топология должна обеспечить возможность использования различных по структуре квантовых алгоритмов. Во-вторых, важно то, каким именно способом реализуется управление кубитами с помощью специального встроенного модуля. В качестве примера можно привести разработанный в фирме D-Wave Systems Inc «встраиваемый сверхпроводящий цифро-аналоговый конвертер магнитного потока с ультранизким потреблением (ultra-low power embedded superconducting digital-to-analog flux converters – SDACF). Этот конвертер позволяет обеспечить максимальную плотность магнитного потока на единице площади [34].

Следует отметить, что предложенные в данной работе идеи в дальнейшем нашли своё воплощение в прикладных проектах. Например, исследователи проекта Flux Quantum Electronics (FQE) использовали свойства кубитов с ДП для разработки криогенных сверх-

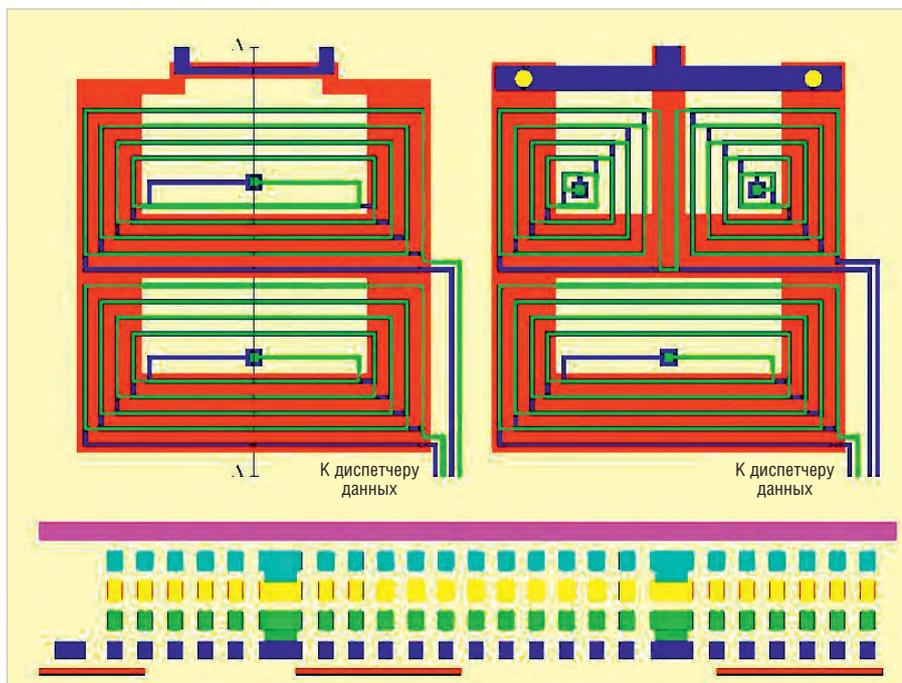


Рис. 9. Структурная схема сверхпроводящего конвертера магнитного потока SDACF [36]

проводящих схем, предназначенных для таких приложений, как высокоскоростные энергоэффективные вычисления, беспроводная связь, сверхточная метрология [35].

Кроме функций управления и цифро-аналогового преобразования SDACF выполняет также функцию памяти. Структура SDACF показана на рис. 9 [36]. Конструктивно сверхпроводящий конвертер магнитного потока выполнен в виде комбинации спиралевидных индуктивностей, связанных между собой при помощи полосковых волноводов и микротрансформаторов.

Две накопительные катушки индуктивности (1 нГн) реализованы в виде концентрических спиральных колец (синяя и зелёная). На рис. 9 показана обмотка в два слоя металла. Модели D-Wave второго поколения используют четырёхслойные спирали с шириной линии и расстоянием между ними порядка 0,25 мкм.

Левая катушка, соответствующая грубой настройке данных (least significant – LSD), связана с выходом целевого устройства. Правая катушка, предназначенная для тонкой настройки (most significant – MSD), выполняет управляющую функцию в узком диапазоне и соединена с джозефсоновским переходом через многоступенчатую индуктивную схему (MSD ladder stage – MSDLS). Обе катушки подключены к высокочастотному источнику управляющих импульсов SFQ, обеспечивающих смещение по току для всех программируе-

мых устройств на кристалле. Для того, чтобы минимизировать статическую мощность, рассеиваемую на кристалле во время программирования, использовались очень низкие токи смещения, порядка 50 мкА, и прецизионные шунтирующие резисторы с номиналами в районе десятых долей Ома.

Магнитный поток LSD связан с контуром тонкой настройки не только через индуктивную схему MSDLS, но также и напрямую через магнитный выход MSD. Таким образом, SDACF представляет собой трёхпортовое устройство (LSD, MSD и OUT), позволяющее работать с полной матрицей индуктивности.

Токи сверхпроводимости генерируют кванты магнитного поля, которые фиксируются в каждом новом цикле с помощью SQUID. В свою очередь, SDACF генерирует соответствующие значения MSD и LSD. Эти значения записываются и сохраняются в самом сверхпроводящем конвертере. Отдельные кванты магнитного потока могут быть загружены или выгружены из SDACF с помощью источника высокочастотных импульсов SFQ.

Если петля MSD, например, может хранить до 8 квантов магнитного потока любой полярности, то SDACF может обеспечить 16 различных значений выходного потока. Таким образом, может быть реализован 4-битный сверхпроводящий цифро-аналоговый преобразователь магнитного потока. В случае, когда петля MSD способна запомнить 16 различных значений

сохранённого потока, двухкаскадное устройство будет представлять собой 8-битный конвертер.

Блок MSD позволяет смещать цикл кубита CCJJ в узком динамическом диапазоне шириной около 5 бит. С помощью LSD реализуется грубое смещение потока кубитов во всём динамическом диапазоне.

Жёлтыми кружками на верхней правой части рис. 9 обозначены переходы Джозефсона.

В нижней части рис. 9 показана схема поперечного сечения реального макета SDACF вдоль линии разреза.

Следует отметить, что управление одним кубитом может быть реализовано также с помощью нескольких SDACF.

Краткий обзор этих нескольких статей позволяет сказать, что общая схема процессора вычислителя с квантовым отжигом должна содержать как минимум следующие элементы: логические кубиты; системы объединения кубитов rf-SQUID; системы управления SDACF; кубиты, используемые для коррекции вычислительных ошибок.

Поскольку наиболее близкими к квантовому отжигу по структуре процесса являются задачи типа «Изинга», то их пошаговые алгоритмические точки отработки можно интерпретировать в виде узлов в графах. Для решения сложных задач идеальным представляется вариант, когда все узлы в графах объединены между собой, то есть каждый кубит системы связан со всеми остальными кубитами системы. Однако пытаться реализовать на практике этот вариант очень сложно технически и крайне невыгодно экономически.

Связанная система из восьми кубитов ведет себя как «истинный квантовый макрообъект», полностью подчиняющийся законам современного уровня физики микромира. Если в системе больше десяти связанных кубитов, то ими становится трудно управлять, а также становится проблематично моделировать их поведение.

Кроме того, размеры «ответвителей», связывающих устройства управления кубитами, не должны быть больше определённых значений, превышение которых может привести к потере когерентности и увеличению времени вычислений. Процессоры на базе ДП в современных квантовых вычислителях изготавливают в виде сложных микросхем, содержащих не только чисто вычислительные кубиты, но также промежуточные схемы внешне-

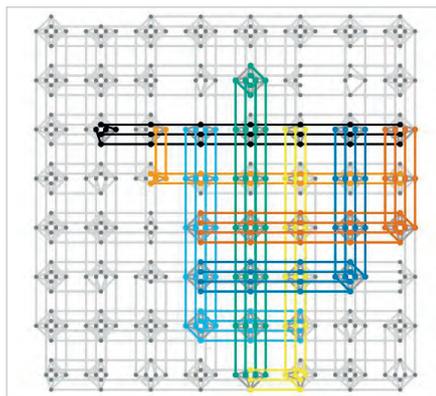


Рис. 10. Кубиты в элементарной ячейке QPU D-Wave 2000Q в топологии Chimera имеют форму удлинённых петель, соединённых между собой [37]

го управления и аналоговые линии для персональной связи с кубитами. Эти особенности стараются учитывать все производители квантовых вычислителей. Поэтому количество приемлемых типов структуры квантовых вычислителей тоже ограничено.

Например, лидирующая в этом направлении канадская фирма D-Wave использует в конструкциях своих процессоров для квантовых вычислителей с отжигом всего три основных типа топологий: Chimera; Pegasus; Zephyr. Конструкция одного из наиболее известных вычислителей QPU D-Wave 2000Q содержит 2048 кубитов и 6016 ответвителей, соединённых в топологии Chimera.

Кубиты в элементарной ячейке QPU в топологии Chimera имеют форму удлинённых петель (рис. 10) [37]. Каждый кубит связан с четырьмя другими в пределах своей ячейки через встроенные соединительные элементы. Между собой элементарные ячейки взаимодействуют с помощью внешних цепей, которые соединяют коллинеарные пары кубитов в одной строке или столбце. Внутри каждой ячейки также размещены цифро-аналоговые объединительные устройства (SDACFF), конструкция которых была рассмотрена выше.

В процессорах с топологией Pegasus элементарная ячейка состоит из 48 кубитов, половина петли которых принадлежит одной ячейке, а другая половина находится на территории соседней ячейки (рис 11) [38]. Кубиты ориентированы вертикально или горизонтально, аналогично тому, как это сделано в топологии Chimera. Разница заключается в том, что в случае Pegasus внутренние ответвители сое-

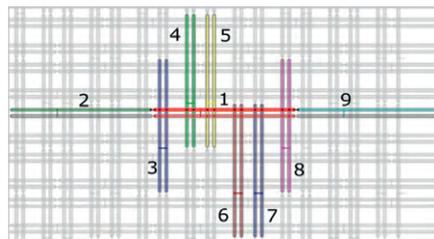


Рис. 11. Топология Pegasus в квантовых вычислителях D-Wave [38]

диняют пары ортогональных кубитов с противоположной ориентацией. Каждый кубит соединён с 12 другими кубитами с помощью внутренних коммутирующих линий. В этой топологии существуют три разные функциональные группы соединителей: внутренние (internal couplers), внешние (external) и дополнительные (odd couplers). При этом кубиты в каждой из групп объединяются по специальным схемам.

Связанные кубиты показаны на рис. 11 в виде горизонтальных и вертикальных петель. Горизонтальный кубит № 1 в центре, а также его нечётный соединитель (odd coupler) и парный кубит, выделенные красным, внутренне связаны (internally coupler) с вертикальными кубитами, в парах от 3 до 8. Каждая пара и её нечётный соединитель (odd coupler) внешне (externally coupler) связаны с горизонтальными кубитами 2 и 9. Они показаны разными цветами.

В новом процессоре QPU D-Wave применяется топология следующего поколения, названная «Zephyr», в которой кубиты ориентированы вертикально или горизонтально, как в Chimera и Pegasus, и связаны объединителями трёх типов, аналогичными «Pegasus coupler». Кубиты в топологии Zephyr имеют шестнадцать внутренних соединителей, связывающих их с ортогональными кубитами. Кроме того, предусмотрены два дополнительных внешних и два нечётных соединителя. Фрагмент топологии Zephyr показан на рис. 12 [39].

Таким образом, существующие технологии квантового отжига позволяют решать сложные задачи с алгоритмами на базе графов с сотнями тысяч вершин. Правда, нужно ещё раз подчеркнуть, что квантовый отжиг даёт не точное решение, а позволяет получить лишь только результат с вероятностью, наиболее приближённой к оптимальному ответу.

Современные квантовые вычислители – это сложные технические устройства стоимостью в миллионы долларов

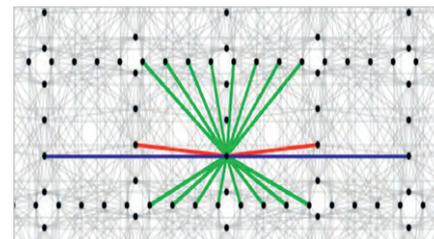


Рис. 12. Фрагмент топологии Zephyr в квантовых вычислителях D-Wave [39]

США. Поэтому ведущие разработчики и производители QPU предлагают воспользоваться облачными сервисами, позволяющими бесплатно в тестовом режиме получить навыки работы с квантовыми вычислениями и оценить необходимость приобретения такого устройства.

Например, D-Wave поддерживает интернет-портал «The Leap™ Quantum Cloud Service», который предоставляет в реальном времени удалённый доступ к одному из современных квантовых вычислителей [40].

Кроме того, в линейке продукции D-Wave есть мощное программное средство «Ocean», позволяющее подобрать соответствующий квантовый алгоритм и адаптировать его под конкретную задачу пользователя.

Сервис другой известной фирмы «Amazon Braket», предназначенный для удалённых квантовых вычислений в облаке, позволяет запускать собственные алгоритмы в симуляторе или на реальном оборудовании для квантовых вычислений (QPU). На этой платформе процесс программирования может быть реализован с помощью Amazon Braket SDK с использованием языка Python [41].

Удалённое обслуживание разработчиков алгоритмов квантового отжига, предназначенных для конкретных приложений, таких как машинное обучение, оптимизация городского трафика, квантовое моделирование и других, предлагает испанская фирма Qilimanjaro Quantum Tech [42], которая работает в рамках «Проекта Европейской комиссии AVaQus H2020» по квантовому отжигу [43].

Наряду с интенсификацией развития направления разработок оборудования для квантового отжига в последнее время наблюдается также рост новых публикаций о достижениях в области эмуляций квантового отжига. Это относительно новое направление, разработанное концерном Fujitsu, получило название «Цифровой отжиг – Digital

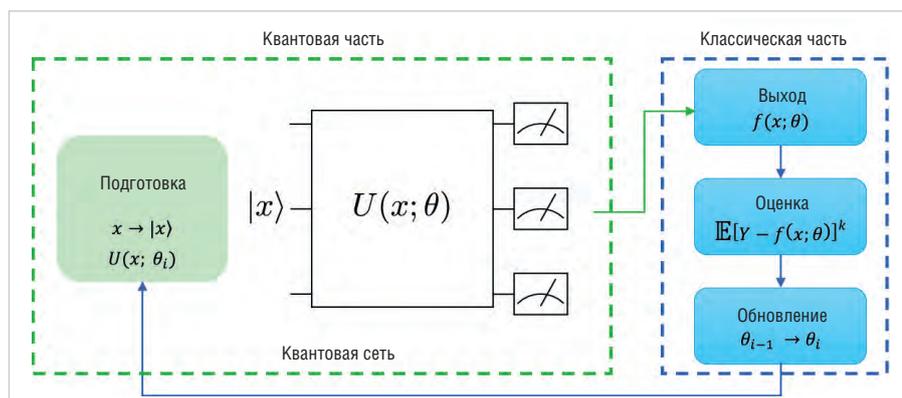


Рис. 13. Обобщённая структурная схема вариационного квантового вычислителя собственных значений «Variational Quantum Eigensolver – VQE» [49]

Annealer (DA)». Метод Fujitsu DA, предназначенный для решения задач квадратичной неограниченной двоичной оптимизации (QUBO), основан на эмуляции процесса квантового отжига с помощью уникальной микросхемы. Эта микросхема также была разработана фирмой Fujitsu специально для решения задач комбинаторной оптимизации с использованием параллельных вычислений возможных состояний на основе весовых матриц и векторов смещения. Данная технология позволяет решать сложные задачи с использованием 1024 переменных. В настоящее время Fujitsu разрабатывает модификацию микросхемы, которая позволит увеличить количество переменных до 8192 [44].

В этой связи можно также отметить японский электронный концерн NEC, который успешно реализует на практике свои новые симуляторы отжига на основе векторных компьютеров, предназначенные для решения крупномасштабных задач комбинаторной оптимизации.

Вариационные квантовые вычислители собственных значений

В современной квантовой химии и физике твёрдого тела существует обширный класс задач, связанных с моделированием атомов, молекул и их кластеров. Решение этих задач является крайне актуальным для областей, связанных с разработкой новых материалов и лекарственных препаратов. Суть проблемы заключается в поиске точных решений уравнений Шрёдингера для сложных атомов и молекул.

В начале 2000-х годов для моделирования простейших атомов и молекул стали использовать квантовые компьютеры и алгоритмы квантовой фазовой

оценки (quantum phase estimation – QPE). Алгоритм квантовой оценки фазы QPE эффективно решает задачу нахождения собственных значений (eigenvalue) конкретного собственного вектора (eigenvector) путём тщательной, многоэтапной переборки различных вариантов в процессе эволюции квантовой системы [45].

В начале 2000-х годов для подобных задач стали использовать универсальные цифровые вентильные квантовые компьютеры (UDGQC) и квантовые вычислители с отжигом [46, 47].

Однако после первых удачных работ выяснилось, что UDGQC и QPU с квантовым отжигом не справляются с решением более сложных задач из-за крайне сложных квантовых алгоритмов моделей атомов и молекул. Поэтому остро встал вопрос оптимизации сложных расчётов, проводимых с помощью квантовых вычислений.

Процесс квантовых вычислений, реализуемый как с помощью UDGQC, так и при использовании QPU с квантовым отжигом, состоит из двух основных этапов. На первом этапе задача, которую нужно решить, адаптируется под существующие квантовые алгоритмы. При этом используются стандартные компьютеры с бинарной логикой (SBLC). На втором этапе реализуется непосредственно процесс вычислений с помощью квантового компьютера.

В процессе поисков решения проблемы оптимизации квантовых вычислений возникла идея о том, чтобы разделить сложную задачу на более простые составляющие и распределить этапы их выполнения между классическим и квантовым компьютером. В результате на свет появились два класса устройств, получившие название «вариационные квантовые вычислители собственных значений».

Вариационный квантовый вычислитель собственных значений («Variational Quantum Eigensolver – VQE») был разработан специально для получения вероятностных оценок основных состояний (eigensolvers) сложных квантовых систем с использованием вариационного метода (variational) на базе универсальных цифровых вентильных квантовых компьютеров (UDGQC) и стандартных цифровых компьютеров с двоичной логикой (SBLC) [48].

Другой тип вариационных вычислителей собственных значений, объединивший классический цифровой бинарный компьютер и вычислитель с квантовым отжигом, получил название «Quantum Annealer Eigensolver – QAE». Этот тип вычислителей рассмотрен во второй части данного раздела статьи.

Обобщённая структурная схема вариационного квантового вычислителя собственных значений показана на рис. 13 [49].

В случае цифрового вентильного квантового компьютера UDGQC некоторое начальное квантовое состояние системы закодировано каким-либо образом в n кубитах. Цель квантовых вычислений заключается в том, чтобы получить решение уравнения Шрёдингера для волновой функции времени. Основной и наиболее трудной задачей в этих вычислениях является поиск алгоритма, описывающего последовательность использования квантовых операторов (gate). В результате действия этих операторов нужно сформировать аппроксимирующую функцию с некоторой заданной погрешностью.

Вариационные квантовые решатели основных состояний (VQE) фактически представляют собой симбиоз классического и квантового компьютеров. При этом роли между ними распределяются следующим образом. Классический компьютер SBLC производит градиентный поиск в пространстве всех возможных аргументов функций, чей минимум требуется найти. Квантовый компьютер (UDGQC) определяет мгновенные значения гамильтониана системы и находит с некоторой вероятностью его основное (наименьшее) значение.

Одним из основных моментов в теории VQE является хорошо известный «вариационный метод». Не вдаваясь в математические подробности, в первом приближении суть этого метода можно представить как упрощение сложной задачи на начальном этапе решения с

целью получения некоего начального оценочного результата. Вместо задачи с многочисленными неизвестными варьируемыми параметрами в качестве первого пробного варианта используют какую-нибудь упрощённую функцию с небольшим количеством параметров. При этом ожидаемое значение гамильтониана, вычисленного в пробном состоянии, оценивается в рамках VQE как целевая функция. Шаг за шагом, варьируя параметры, на каждом из следующих этапов вычислений получают результат, максимально соответствующий искомой функции.

С точки зрения квантовой механики в нашем случае полезно вспомнить утверждение о том, что среднее значение гамильтониана в любом состоянии не может быть ниже, чем его среднее значение в основном (наименьшем) состоянии. Поэтому, если в процессе вычислений мы будем пытаться пошагово минимизировать средние значения гамильтониана в промежуточных состояниях, мы не сделаем грубых ошибок.

Как правило, опытному специалисту, знакомому с предметом, удаётся найти такие простые подстановочные функции (ansatz), которые позволяют аппроксимировать минимальное значение гамильтониана.

Таким образом, упрощённый процесс вычислений с помощью VQE можно представить как последовательность следующих этапов:

- 1) определение пробной функции (ansatz) и характеризующих её параметров с помощью блока классического компьютера;
- 2) определение мгновенных и средних значений гамильтониана в промежуточных точках с помощью блока квантового вычислителя;
- 3) нахождение наиболее вероятного минимального значения гамильтониана путём перебора параметров с помощью блока квантового компьютера.

В том случае, когда используется раздельная схема, квантовый компьютер и стандартный компьютер с двоичной логикой решают каждый свою задачу последовательно.

В квантовых вычислениях с использованием метода VQE часто используется термин «ansatz» (анзац), под которым подразумевается пробная эвристическая функция на отправной точке вычислений. Как правило, ansatz имеет несколько параметров, позволяю-

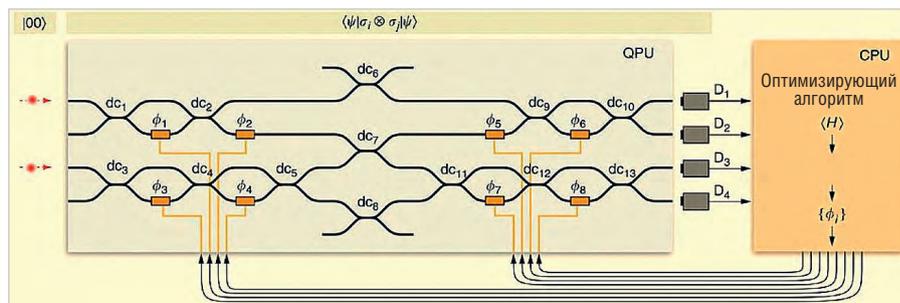


Рис. 14. Структурная схема работы экспериментальной установки VQE [53]

щих варьировать поведение функции в широком диапазоне. Зная, какой процесс мы моделируем, можно на основе имеющегося опыта предположить, какую примерно целевую функцию мы ищем. Чем точнее первое предположение (ansatz) – тем удачнее будет окончательное решение. В варианте гибридной схемы первоначально с помощью квантового процессора подготавливается эта пробная функция «ansatz». Квантовый компьютер UDQC, перебирая заданные для ansatz параметры, ищет наиболее вероятное минимальное значение целевой функции. При этом стандартный компьютер SBLC контролирует и корректирует параметры ansatz на каждом этапе работы. Практические рекомендации и простые примеры решения задач с помощью VQE приведены на сайтах [50, 51].

Исторически сложилось так, что большинство опубликованных статей приводят результаты расчётов методом VQE с использованием универсальных цифровых вентиляльных квантовых компьютеров UDQC. Так, например, в работе [52] расчёты выполнены с помощью квантового компьютера «Google Sycamore quantum processor».

Впервые метод VQE был на практике реализован с помощью квантового компьютера с фотонными кубитами. На рис. 14 показана структурная схема работы экспериментальной установки VQE из этой работы [53].

Принимая во внимание обозначения, приведенные на рис. 13, работу установки можно объяснить следующим образом. В гибридной схеме использован квантовый вентиляльный компьютер (QPU) с фотонными кубитами. Квантовые состояния кубитов $|00\rangle$ зависят от их вертикальной или горизонтальной поляризации. Управление состояниями фотонов реализовано с помощью лазеров с перестраиваемой частотой. Для обработки квантовой информации были использованы чипы с выгравированными

волноводами, по которым мог перемещаться фотон. На схеме, показанной на рис. 14, ожидаемое значение целевой функции «QUDIO», вычислялось с помощью квантового процессора с вентиляльным управлением QPU. Состояние волновой функции $|\psi\rangle$ варьировалось с помощью фазовращателей ϕ_1 – ϕ_8 , обозначенных на рис. 14, как оранжевые прямоугольники. Кроме того, один гейт типа CNOT задействован для управления контролирующими и контролирующими кубитами. Измерения текущих состояний кубитов выполнялись с помощью фотонных детекторов $dc(1-4)$ и $dc(9-13)$ с коэффициентом отражения 50% и направленных ответвителей $dc(5-7)$ с коэффициентом отражения 30%. Сигналы со схем совпадений $D(1-4)$ передавались на центральный процессор с двоичной логикой CPU, который вычислял набор параметров, необходимых для вычисления следующего квантового состояния системы и записывал их в память QPU.

Одно из основных преимуществ использования метода VQE заключается в том, что он позволяет разбить исходную задачу на несколько упрощённых подзадач и распределить их по разным квантовым процессорам. Для того чтобы полностью использовать такие вычислительные преимущества в крупномасштабных задачах, применяется схема квантовой распределенной оптимизации «Quantum Distributed Optimization – QUDIO», которая разбивает исходную задачу на k подзадач и распределяет их по k квантовым процессорам с последующей параллельной оптимизацией.

Другой метод, получивший название «Shuffle-QUDIO», позволяет значительно снизить частоту обмена данными между квантовыми процессорами, а также снизить погрешность аппроксимации в прикладных задачах квантовой химии [54].

Схема Shuffle-QUDIO включает в себя три программно-аппаратных блока, выполняющих соответственно функции инициализации, локального обновления и финальной синхронизации. На этапе инициализации несколько копий исходного анзаца (ansatz) и соответствующий проблемный гамильтониан H рассылаются в каждый из локальных процессоров. При этом каждый процессор использует одинаковые начальные значения генератора случайных чисел. Для каждой новой итерации в локальных процессорах набор наблюдаемых мгновенных значений H_i принимает случайный по порядку следований характер. Поэтому наблюдаемые значения каждого процессора не пересекаются друг с другом, а объединение полученных с их помощью результатов вычислений позволяют с большой точностью оценить целевой гамильтониан. После выполнения назначенных локальных итераций параметры каждого локального анзаца агрегируются и переназначаются всем локальным процессорам. Этот процесс получил название глобальной синхронизации. Когда будет достигнуто максимальное число t итераций, алгоритм Shuffle-QUDIO выполняет окончательную финальную синхронизацию и выводит конечные результаты вычисления параметров целевой функции.

Следует обратить внимание на то, что вычислители VQE на базе вентильных квантовых компьютеров позволяют вычислять не только значения гамильтониана и волновой функции, но также и её производные. Последнее объясняется тем, что дифференцирование уравнения волновой функции по параметру сводится к измерению некоего набора операторов, рассмотренных в первой части статьи. Этой функции лишены вычислители на базе квантового отжига.

Конструктивно VQE может быть представлен в виде единого законченного устройства либо в форме двух отдельных независимых блоков, объединённых общим программно-аппаратным интерфейсом со встроенным алгоритмом VQE. Так, например, с квантовым компьютером IBM можно работать удалённо [55, 56].

Протестировать пошаговый процесс VQE на простейших примерах можно с помощью симулятора на сайте [57].

Вариационные вычислители собственных значений «Quantum

Annealer Eigensolver – QAE» объединяют метод квантового отжига с классическим бинарным компьютером.

Принципиальная возможность реализации вариационного метода с помощью адиабатических квантовых вычислений обоснована в статье [58], в которой предложена теоретическая схема создания алгоритма вариационного метода в приложениях адиабатических квантовых вычислений. Основная трудность, сдерживающая практическую реализацию подобного рода вычислений, связана с крайне сложными алгоритмами, необходимыми для моделирования процессов квантовой химии.

Рассмотренные в предыдущем разделе квантовые вычислители с отжигом успешно справляются с задачами типа чистого «Изинга» и с задачами, сводимыми к графам. Поэтому для того, чтобы использовать квантовые вычисления в моделях электронных структур атомов, необходимо каким-то образом адаптировать алгоритмы решения задач квантовой химии к «изингоподобным» алгоритмам.

В работе [59] показано, что, в принципе, существует точное соответствие между гамильтонианом электронной структуры атомов и гамильтонианом «Изинга». Это теоретическое рассуждение было подтверждено результатами квантового моделирования преобразованного гамильтониана «Изинга» для молекул H_2 , He_2 , HeH^+ и LiH , совпадающими с точными численными расчётами. Таким образом, было продемонстрировано, что можно преобразовать молекулярный гамильтониан в гамильтониан типа «Изинга», который достаточно просто можно реализовать на доступных в настоящее время квантовых процессорах с отжигом.

Другое направление использования квантовых вычислителей с отжигом для моделирования атомов и молекул связано с новыми функциями QPU D-Wave, позволяющими проводить обратный отжиг, а также останавливать процесс отжига в промежуточной точке адиабатической эволюции.

Кроме того, новые квантовые процессоры D-Wave могут быть задействованы для приблизительных оценок энергий больших молекул по методу Хартри–Фока. Поскольку при этом поведение самих электронов заменяется взаимодействием с неким усреднённым полем, то гамильтониан упрощённой системы существенно упрощается. В результате

появляется реальная возможность его оценок на квантовых вычислителях с отжигом [60].

Хотя преобразование гамильтониана электронных структур атомов в форму типа «Изинга» в принципе возможно, оно вызывает экспоненциальный рост как самого конечного гамильтониана, так и времени вычислений. Это, в свою очередь, приводит к потере когерентности квантовой системы и невозможности проводить расчёты с приемлемыми уровнями ошибок. Один из способов решения этой проблемы, предложенный в работе [61], заключается в использовании нового смешанного дискретно-непрерывного оптимизационного алгоритма для вычислителей с квантовым отжигом. Основная идея этого нового алгоритма состоит в том, что этапы задачи сводятся к определению наименьшего собственного состояния кластера связанных кубитов (qubit coupled cluster – QCC). Использование этого нового алгоритма и процессора с отжигом D-Wave 2000Q позволило рассчитать основные состояния QCC для молекул LiH , H_2O и C_6H_6 .

Благодаря платформе D-Wave, позволяющей удалённо работать с вычислителями на базе квантового отжига, в последние годы стало появляться всё больше работ, в которых описываются результаты экспериментов вариационных квантовых вычислений с использованием процессоров этой фирмы. На сайте фирмы в свободном доступе есть программное обеспечение с открытым исходным кодом D-Wave, которое работает совместно с Ocean и SDK Python [62].

Для того чтобы отличать метод VQE, реализуемый с помощью цифровых вентильных квантовых компьютеров, от схемы вариационной модели на базе квантового вычислителя с отжигом, в пионерской работе [63] авторы ввели новый термин «Вычислитель собственных значений с квантовым отжигом – Quantum Annealer Eigensolver (QAE)».

В алгоритме этой схемы задействован метод кодирования состояния кубитов, в котором используется степень числа два в качестве одного классически оптимизированного параметра. Вместо классической модели «Изинга» используется квадратичная неограниченная двоичная оптимизация (Unconstrained Binary Optimization – QUBO). При этом спины заменены двоичными переменными.

Структурная схема вычислителя собственных значений с квантовым отжигом (Quantum Annealer Eigensolver QAE) показана на рис. 15 [63].

Как было показано выше, топология современных вычислителей с квантовым отжигом предполагает размещение небольшого количества полностью связанных кубитов внутри сетки большего количества слабо связанных физических кубитов (рис. 10, 11, 12). Чтобы эффективно работать с такого рода топологиями, в методе QAE используется дополнительная утилита из программного обеспечения QUBO, получившая название «qbsolv30». Эта утилита делит большую общую задачу QUBO на более мелкие фрагменты (subQUBO) и минимизирует их по отдельности. В процессе QAE фрагменты SubQUBO обрабатываются каждый по своему заданному алгоритму с помощью процессора квантового отжига D-Wave.

Весь процесс QAE можно разбить на два этапа. На первом этапе, показанном в верхней части рис. 15, строится электронная матрица гамильтониана с использованием классических кодов квантовой химии и одноэлектронных

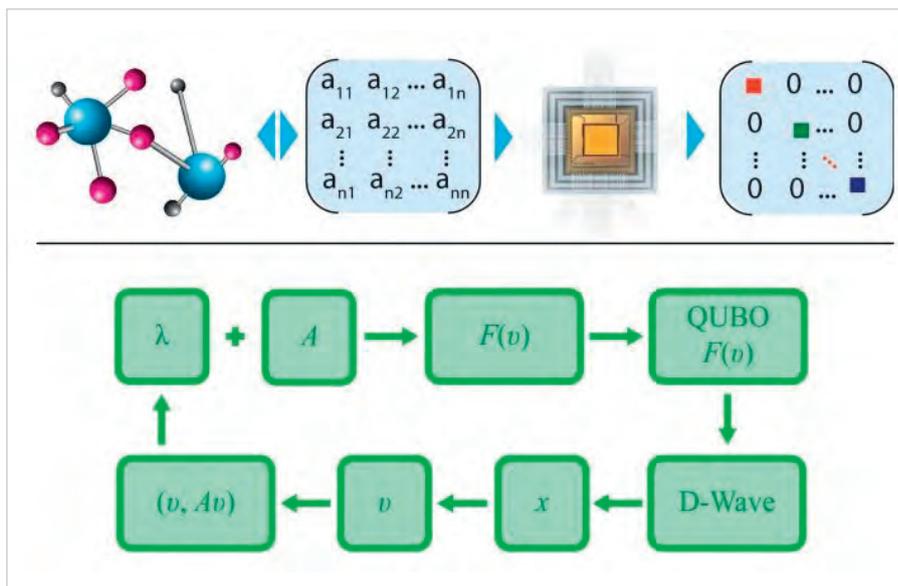


Рис. 15. Структурная схема вычислителя собственных значений с квантовым отжигом (Quantum Annealer Eigensolver – QAE) [63]

самосогласованных молекулярных орбиталей Хартри–Фока. Матрица полного взаимодействия конфигурации (Full Configuration Interaction – FCI) и матрица полного активного пространства самосогласованного поля (Complete Active Space Self-Consistent Field – CASSCF) созданы с использова-

нием внутреннего модифицированного кода P_{sl4}. Такой подход позволил преобразовать код верхнего уровня в модуль Python и использовать его в сложных вычислительных процессах [64].

На втором этапе (нижняя часть рис. 15) входная матрица A, определяющая целевую функцию F(v), преоб-

ИНВЕРТОРЫ «ММП-ИРБИС»

ИНК2500-1С-1U ТУ6589-077-40059437-06

Выходная мощность 2500 Вт/3200 ВА

Инверторы ИНК2500-1С дополняют сеть оперативного постоянного тока (СОПТ) на электрических подстанциях сетью переменного тока.

Позволяют обеспечить бесперебойным питанием нагрузку до 15 кВт на фазу



Все характеристики серии



ММП-ИРБИС

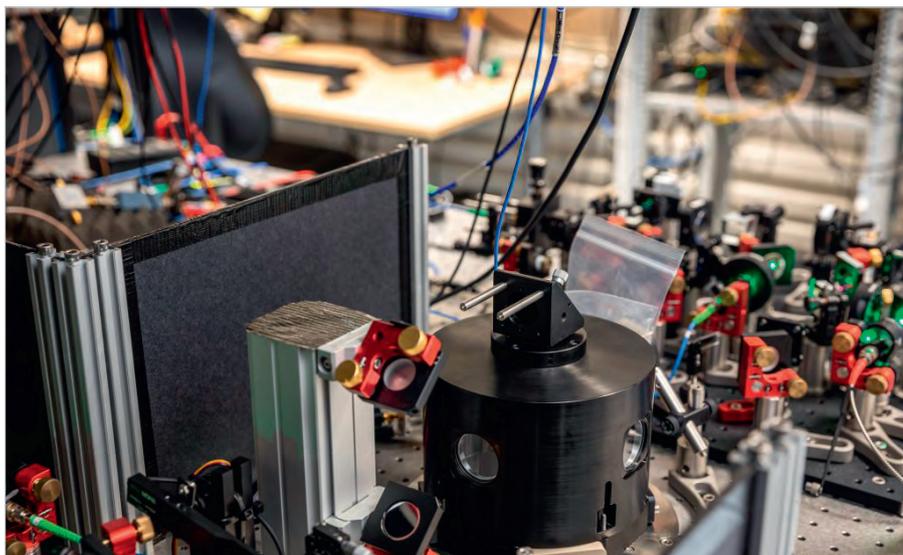


Рис. 16. В эксперименте по квантовой телепортации между тремя несмежными узлами детекторы на основе замещённых атомов работают при температуре минус 270°С [70]

разуется в выражения QUBO, которые затем минимизируются в процессе квантового отжига. Процесс QAE используется для обработки матрицы и нахождения нескольких собственных значений гамильтониана и собственных векторов, характеризующих волновые функции.

При этом QAE автоматически сопоставляет частные этапы задачи поиска собственных значений с соответствующими блоками QUBO.

Процесс минимизации задаётся как последовательная пошаговая коррекция матрицы A и целевой функции $F(v)$. Если задано N шагов, то для вычисления N собственных пар QAE выполняет N последовательных запусков, каждый раз с соответствующим образом модифицированной матрицей A .

Более подробно этот процесс описан в статье [65]. Отмеченные в этой статье эксперименты по использованию QAE для моделирования атомов являются лишь небольшим репрезентативным подмножеством тех методов, которые можно использовать для создания входных матриц QAE. Поскольку QAE является открытым многоцелевым методом, то он, в принципе, может быть использован для работы со многими известными приложениями, характеризующимися широким спектром операторов и прикладных программ.

Заключение

Базовые законы современной физики микромира в основном были сформулированы в течение XX века. Этот этап, который принято называть периодом «первой квантовой революции», принёс

миру новые устройства и технологии: лазеры, транзисторы, компьютеры, беспроводные системы связи, спутниковая навигация, смартфоны, томографы и т.д.

В настоящее время мы наблюдаем вторую квантовую революцию, которая уже позволила учёным манипулировать отдельными квантовыми частицами, открывать новые ядерные частицы и многое другое.

По мнению ведущей межправительственной организации Quantum Flagship, курирующей разработки квантовых технологий в Европейском союзе, мир сейчас находится на поворотном этапе, когда наука готова передать промышленности знания и технологии, необходимые для предоставления инновационных услуг и продуктов, таких как безопасная квантовая связь, чрезвычайно точные микродатчики и первые квантовые компьютеры.

Сегодня ведущие страны мира включились в гонку по созданию и завоеванию рынка этих ключевых технологий будущего. Так, США планирует вложить более 1,2 миллиарда долларов в квантовые технологии за период с 2019 по 2028 год. Китай строит свою «Национальную лабораторию квантовых информационных наук» стоимостью 10 миллиардов долларов США.

Евросоюз в лице Quantum Flagship объявил о выделении около миллиарда евро на поддержку следующих квантовых технологий [66]:

- квантовые вычисления;
- квантовое моделирование;
- квантовая связь;
- квантовая метрология и зондирование.

О значимости исследований в области квантовой механики говорит Нобелевская премия по физике, которая в 2022 году была присуждена французскому учёному Алену Аспекту (Alain Aspect), физику из США Джону Клаузеру (John F. Clauser) и австрийскому физику Антону Цайлингеру (Anton Zeilinger) за экспериментальные доказательства наличия квантовой запутанности фотонов в случае невыполнения неравенства Белла, а также совокупный фундаментальный вклад в раздел квантовой информационной физики [67].

Поскольку свойство квантовой запутанности кубитов, рассмотренное в первой части этой статьи, является одним из краеугольных камней теории квантовых вычислений, уместно сказать несколько слов об этой Нобелевской премии.

Прежде всего, нужно обратить внимание на то, что Нобелевскую премию эти учёные получили за работы, которые были выполнены задолго до того, как их идеи были претворены в жизнь, в частности, в виде современных квантовых процессоров. В статье, опубликованной в 1964 г., Джон Стюарт Белл предложил способ проверки существования квантовой запутанности частиц. Только в 1972 г. уровень развития техники измерений позволил Джону Клаузеру экспериментально доказать, что неравенства Белла не выполняются, а значит, существует квантовая когерентность и запутанность. Однако нашлось много критиков, которые утверждали, что эксперимент Клаузера недостаточно корректен из-за возможности «утечки» фотонов. Почти через десять лет в 1981 г. Ален Аспект усовершенствовал установку Клаузера и смог исключить влияние испускаемых фотонов на результаты измерений. Этот эксперимент подтвердил справедливость квантовой теории и наличие эффекта запутанности. Тем не менее оставались всё ещё некоторые теоретические аргументы (fair-sampling), подвергающие сомнению квантовую запутанность.

Исследовательская группа Антона Цайлингера в 1997 году впервые продемонстрировала «квантовую телепортацию», с помощью которой один фотон передавал на расстоянии свою поляризацию другому фотону. Тем самым ещё раз была подтверждена справедливость квантовой теории в отношении запутанности частиц [68].

В 2013 году коллектив авторов во главе с Антоном Цайлингером опубликовал большую статью с описанием подробных экспериментальных

доказательств существования запутанности фотонов. Эта статья окончательно закрыла все возможные теоретические лазейки, так называемые «loopholes», опровергающие явление квантовой запутанности [69].

С развитием технического уровня экспериментальной физики появились всё новые и более тонкие эксперименты по проверке «квантовой телепортации». В мае 2022 года была опубликована статья, описывающая результаты уникального эксперимента учёных из объединённой группы Технологического университета Делфта (Delft University of Technology). Голландским физикам впервые удалось реализовать на практике квантовую телепортацию между тремя несмежными узлами (рис. 16) [70]. Сам термин «teleporting quantum information» означает способ обмена информацией о своём квантовом состоянии между двумя когерентными частицами. Идея квантовой телепортации заключается в том, что запутанные фотоны мгновенно обмениваются информацией о своём состоянии даже на больших расстояниях. То есть не надо пересылать саму частицу света по волноводу, а достаточ-

но иметь запутанные фотоны. Этот эксперимент является ещё одним шагом на пути создания квантового Интернета, безопасного обмена конфиденциальной информацией, а также соединения нескольких квантовых компьютеров вместе для увеличения их вычислительных возможностей [70].

Ещё одна всемирно известная премия «Breakthrough Prize in Fundamental Physics» была присуждена в октябре 2022 года Чарльзу Беннетту (Charles Bennett) из IBM, Жилью Брассару (Gilles Brassard) из Монреальского университета, Питеру Шору (Peter Shor) из Массачусетского технологического института и Дэвиду Дойчу (David Deutsch) из Оксфордского университета за фундаментальные разработки в области квантовых вычислений. Мы уже упоминали в этой статье имена этих учёных. Математик Питер Шор в 1994 году разработал уникальный полиномиальный алгоритм факторизации для квантового компьютера. Физик Дэвид Дойч в 1985 году сформулировал основные принципы квантовых вычислений.

В 1984 году Чарльз Беннет и Жиль Брассар (фр. Gilles Brassard) предложили новый квантовый протокол рас-

пределения сеансового ключа для симметричной криптографии [71].

Можно упомянуть ещё множество других публикаций о том, как со временем чисто научные разработки по квантовым технологиям из лабораторий проникают в реальную жизнь. Мы ограничимся только несколькими наиболее яркими примерами разработок, анонсированных в 2022 году. В начале октября 2022 года корпорация NEC и её дочернее предприятие NEC Fielding Ltd., ведущий поставщик услуг по техническому обслуживанию и ремонту компьютерных сетей, представили систему планирования поставок запасных частей с использованием технологии квантовых вычислений для 23 районов Токио [72].

Весной 2022 года фирма IonQ (NYSE: IONQ) объявила о том, что её новейший квантовый компьютер Aria достиг рекордной производительности, позволяющей успешно выполнять квантовые вычисления с прикладными алгоритмами, содержащими более 550 вентилей. Как полагают руководители фирмы, IonQ значительно превосходит конкурентов в практическом использовании квантовых алгоритмов и явля-



IF/RF & Microwave Design
advantex

WWW.ADVANTEX.RU

**РАЗРАБОТАНО
И ПРОИЗВЕДЕНО
В РОССИИ**



**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ
СИНТЕЗАТОРЫ ЧАСТОТ**
с непрерывным шагом до 21 ГГц
и контрольно-измерительные приборы

ЭЛЕКТРОННЫЙ
КАТАЛОГ



+7(495) 721-4774 • info@advantex.ru
Москва, ул. Красноказарменная, д.13, стр. 1

Реклама

ется несомненным мировым лидером с этой точки зрения [73].

Летом 2022 года корпорация Google представила свой новый виртуальный эмулятор квантового компьютера «Quantum Virtual Machine – QVM», который даёт возможность большому количеству людей присоединиться к разработкам фирмы в поисках квантовых алгоритмов и приложений. Кроме того, этот эмулятор предоставляет бесплатный доступ к инструментам разработки прототипов квантовых алгоритмов, адаптированных для ближайших квантовых компьютеров, и позволяет начинающим разработчикам сосредоточиться на конкретной стоящей перед ними задаче.

Квантовая виртуальная машина (Google – QVM) эмулирует работу одного из квантовых компьютеров фирмы, предоставляя такие необходимые инструменты, как эволюция кубитов, расфазировка, ошибки затвора и считывания и другие. В QVM результаты расчётов объединяются для имитации выходных данных, подобных квантовому процессору, с использованием моделей исследовательской группы по физике [74].

Примерно в это же время другой ведущий разработчик универсальных цифровых квантовых компьютеров с вентильной обработкой – корпорация IBM объявила о своей новой стратегической линии развития, основанной на создании гибридных модульных устройств, объединяющих квантовые процессоры с классической компьютерной инфраструктурой, управляемой Qiskit Runtime. Подобные гибридные платформы позволят пользователям легко встраивать квантовые вычисления в свои рабочие процессы и, таким образом, решать актуальные научные проблемы. Анонсированная дорожная карта IBM подразумевает создание до 2025 года квантовых компьютеров, содержащих 1121, 1386 и 4158 кубитов [75].

Китайская компания Baidu на конференции «Quantum Create 2022», проходившей в августе этого года в Пекине, представила свой новый квантовый компьютер под названием «Qian Shi», который сочетает в себе аппаратное обеспечение, программный стек Baidu-Liang Xi и ряд практических квантовых приложений. Как утверждается, «Qian Shi» является первым в мире всеплатформенным квантовым программно-аппаратным решением, доступным для использования

широкой публикой. Существующие в настоящее время приложения включают квантовые алгоритмы для разработки новых литиевых батарей, моделирования свёртывания белков, искусственного интеллекта, вычислительной биологии, финансовых технологий [76].

Как сообщает Nikkei Asia, японские исследовательские институты Fujitsu и Riken планируют совместно производить и продавать квантовые компьютеры уже в апреле 2023 года. Первый квантовый компьютер, который Fujitsu намерена выпустить на рынок, имеет 64 кубита и предназначен для исследовательских компаний, работающих в области фармакологии, новых материалов, автомобилестроения и финансового прогнозирования [77].

Кроме того, появилось много сообщений о новых чисто технических новинках, предназначенных для аппаратной части квантовых вычислителей. Новая перспективная разработка квантовой памяти описана в работе [78]. Такая память предназначена для того, чтобы считывать информацию с фотонного кубита, сохранять её и по требованию записывать в соответствующий кубит.

В этой разработке в качестве базовой структуры квантовой памяти использовался кристалл, легированный празеодимом (praseodymium), внутри которого лазером был выгравирован волновод. Этот микрометровый канал внутри кристалла удерживает и направляет фотон в заданном направлении. Два оптоволоконных световода обеспечивают прямой интерфейс между источниками фотонов, несущими квантовую информацию, и квантовой памятью.

Учёные из университета Оксфорда разработали переключатель поляризации для сверхбыстрого квантового компьютера с фотонными кубитами. Идея таких переключателей заключается в использовании гибридных нанопроводов, способных выборочно переключать устройства в зависимости от поляризации. Используемые в этой работе материалы, переходящие из одной фазы в другую при освещении светом с разной поляризацией, могут стать платформой для сверхбыстрых фотонных вычислений и хранения информации [79].

Из новинок 2022 года, предназначенных для общего пользования, мож-

но отметить исследовательскую группу из Токийского технологического института, которая разработала квантовый датчик для контроля заряда в автомобильных аккумуляторах. Датчик, изготовленный на базе алмазных кубитов с замещёнными атомами, значительно точнее и меньше по размерам и весу [80].

Особое значение имеют квантовые вычисления для приложений искусственного интеллекта и машинного обучения. Подробный обзор работ по использованию вычислителей квантового отжига D-Wave для таких приложений машинного обучения, как распознавание изображений, дистанционное зондирование изображений, вычислительная биология и физика элементарных частиц, продемонстрировал реальные преимущества квантовых вычислений по сравнению с классическими компьютерами с двоичной логикой. При этом наилучшие результаты в производительности достигаются при использовании гибридных схем Quantum Annealer Eigensolver – QAE [81].

В этой работе также подчёркивается, что усложнение модели исследуемого процесса вызывает необходимость увеличения вычислительных кубитов в квантовых процессорах.

В этой связи заслуживает внимания инновационный метод перемножения матриц, предложенный в октябре 2022 года британской фирмой DeepMind Technologies [82].

Эта новая версия AlphaZero под названием AlphaTensor предлагает более быстрый способ выполнения операции матричного умножения, которая является одной из фундаментальных в вычислениях с использованием машинного обучения. Если будет найден способ интеграции GPU в гибридные системы QAE, то квантовые вычисления могут быть более эффективными, экономичными и точными.

Можно ожидать, что будущие технологические усовершенствования квантовых вычислителей позволят увеличивать количество кубитов и уменьшать шум. Одновременное совершенствование алгоритмов квантовых вычислений, в частности VQE и QAE, откроет пути к более глубоким и тонким исследованиям в квантовой физике и химии, которые, в свою очередь, приведут к новым технологиям и материалам с уникальными качествами.

Литература

1. URL: http://openqemist.1qbit.com/docs/vqe_microsoft_qsharp.html.
2. URL: <http://www.riai.org.ru/iznachalno-slozhnyie-i-nedeterminirovannyie-polinomialnyie-zadachi-2.html>.
3. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Adiabatic_theorem.
4. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1057726>.
5. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/>.
6. URL: <https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.60.15398>.
7. URL: <https://oxfordre.com/physics/view/10.1093/acrefore/9780190871994.001.0001/acrefore-9780190871994-e-32>.
8. URL: https://www.researchgate.net/publication/30484091_Superconducting_persistent-current_qubit.
9. URL: https://www.researchgate.net/figure/3-junction-persistent-current-flux-qubit-PCQ-inner-loop-surrounded-by-a-2-junction_fig1_1845612.
10. URL: <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0302057>
11. URL: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.94.5.1634>.
12. URL: <https://rajsain.files.wordpress.com/2013/11/randomized-algorithms-motwani-and-rahgavan.pdf>.
13. URL: https://www.researchgate.net/figure/Adiabatic-quantum-computation-The-energy-landscape-is-first-a-simple-one-with-one-global_fig2_315416652.
14. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ising_model.
15. URL: <https://arxiv.org/pdf/1807.07112.pdf>.
16. URL: https://www.scipost.org/SciPostPhys.12.4.118?acad_field_slug=physics.
17. URL: https://medium.com/@quantum_wa/quantum-annealing-cdb129e96601.
18. URL: <https://stanford.edu/~jeffjar/statmech/intro4.html>.
19. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28409975/>.
20. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2058-9565/abd59a/pdf>.
21. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.99.070502>.
22. URL: <https://docs.dwavesys.com/docs/latest/index.html>.
23. URL: https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_gs_2.html#getting-started-qa.
24. URL: <https://serviparticules.ub.edu/en/materials/articles/quantum-annealing?page=1>.
25. URL: https://www.researchgate.net/publication/44260599_An_Architectural_Framework_For_Quantum_Algorithms_Processing_Unit_QAPU.
26. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.123.120501>.
27. URL: <https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.18.044036>.
28. URL: <https://arxiv.org/pdf/1004.1628.pdf>.
29. URL: https://www.researchgate.net/publication/362434317_Magnetic_imaging_of_superconducting_qubit_devices_with_scanning_SQUID-on-tip.
30. URL: <https://arxiv.org/pdf/1004.1628.pdf>.
31. URL: <https://arxiv.org/abs/1304.4595>.
32. URL: <https://www.nature.com/articles/ncomms4243>.
33. URL: <https://arxiv.org/pdf/2205.12936.pdf>.
34. URL: <https://arxiv.org/pdf/1401.5504.pdf>.
35. URL: <https://www.nist.gov/programs-projects/flux-quantum-electronics>.
36. URL: <https://arxiv.org/pdf/1401.5504.pdf>.
37. URL: https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_gs_4.html#chimeraqubits3x3.
38. URL: <https://support.dwavesys.com/hc/en-us/articles/360054564874-What-Is-the-Pegasus-Topology->.
39. URL: https://www.dwavesys.com/media/2uznec4s/14-1056a-a_zephyr_topology_of_d-wave_quantum_processors.pdf.
40. URL: <https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/cloud-platform/>.
41. URL: <https://aws.amazon.com/ru/blogs/quantum-computing/>.
42. URL: <https://www.qilimanjaro.tech/>.
43. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/899561/results>.
44. URL: <https://www.fujitsu.com/global/services/business-services/digital-annealer/>.
45. URL: <https://qiskit.org/textbook/ch-algorithms/quantum-phase-estimation.html>.
46. URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fchem.2020.587143/full>.
47. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-14082-3_10.
48. URL: <https://arxiv.org/pdf/2111.05176.pdf>.
49. URL: <https://github.com/ericardomuten/qml-vqa-library>.
50. URL: <https://qiskit.org/textbook/ch-applications/vqe-molecules.html#Introduction>.
51. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adts.201800182>.
52. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abb9811>.
53. URL: <https://www.nature.com/articles/ncomms5213>.
54. URL: <https://arxiv.org/pdf/2209.12454.pdf>.
55. URL: <https://developer.ibm.com/blogs/quantum-computing-qubit-vqe-variational-quantum-eigensolver/>.
56. URL: <https://quantum-computing.ibm.com/lab/files/qiskit-textbook/content/ch-applications/vqe-molecules.ipynb>.
57. URL: https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_vqe.html.
58. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/18/2/023023/pdf>.
59. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.7b10371>.
60. URL: <https://arxiv.org/pdf/1811.05256.pdf>.
61. URL: <https://arxiv.org/abs/1901.04715>.
62. URL: <https://www.dwavesys.com/media/qvbjrzgg/guide-2.pdf>.
63. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-77315-4>.
64. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-020-77315-4>.
65. URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jctc.9b00402>.
66. URL: <https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/>.
67. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/press-release/>.
68. URL: <https://www.nature.com/articles/37539>.
69. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1212/1212.0533.pdf>.
70. URL: <https://qutech.nl/2022/05/25/teleport-quantum-information-across-network/>.
71. URL: <https://headtopics.com/us/quantum-physics-titans-win-breakthrough-prize-30104976>.
72. URL: https://www.nec.com/en/press/202202/global_20220216_01.html.
73. URL: <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/ion-qs-aria-quantum-computer-achieves-20-algorithmic-qubits/>.
74. URL: <https://quantumai.google/quantum-virtual-machine>.
75. URL: <https://newsroom.ibm.com/2022-05-10-IBM-Unveils-New-Roadmap-to-Practical-Quantum-Computing-Era-Plans-to-Deliver-4,000-Qubit-System>.
76. URL: https://www.theregister.com/2022/08/25/china_baidu_quantum_computing/.
77. URL: <https://asia.nikkei.com/Business/Technology/Fujitsu-Riken-to-offer-first-Japan-made-quantum-computer>.
78. URL: <https://qt.eu/about-quantum-flagship/newsroom/a-boost-in-performances-in-fibre-integrated-quantum-memories/>.
79. URL: <https://physicsworld.com/a/polarization-switch-makes-ultrafast-photon-computer/>.
80. URL: <https://physicsworld.com/a/quantum-sensor-could-reduce-electric-vehicle-battery-weight-by-10/?notification=onesignal>.
81. URL: <https://arxiv.org/pdf/2106.02964.pdf>.
82. URL: <https://www.deepmind.com/blog/discovering-novel-algorithms-with-alphatensor>.



Микроволновые датчики движения для помещений. Обзор функционала и практические рекомендации

Андрей Кашкаров (ak35@yandex.ru)

Разработчикам РЭА и потребителям в быту доступны разные по схемотехнике, опциям и принципу коммутирования нагрузки датчики движения, при этом микроволновые занимают особую нишу по своим характеристикам. В статье рассматриваются особенности микроволновых датчиков обнаружения (движения), коммутирующих освещение в формате как активной, так и реактивной нагрузки. Также даются рекомендации по практическому применению микроволновых датчиков обнаружения в устройствах охраны и сигнализации.

Датчик движения – прибор, обнаруживающий перемещение движущихся живых, обладающих температурной составляющей людей и животных. Как правило, так называют электронное устройство с чувствительным «детектором» на основе пироэлектрического или иного датчика, обнаруживающее живое существо и подающее электронный сигнал управления на исполнительное устройство, коммутирующее нагрузку. Как правило, «детектор» и «коммутатор» собраны в одном компактном корпусе. Современная электроника с элементами для поверхностного монтажа вполне позволяет это делать. И хотя микроволновые датчики движения (ДД-МВ) предназначены для экономии электроэнергии за счёт автоматического управления освещением и иными инженерными системами, они имеют существенное отличие от пироэлектрических детекторов, которые реагируют на изменение фона инфракрасного спектра в зоне ответственности, на основе которых действуют пироэлектрические датчики движения (ДД). Автором было проведено несколько исследований о ДД, в частности в вопросах увеличения их стабильности и уменьшения ложных срабатываний. Об этом исследовании писали, к примеру, в [1], [2]. На основе неоднократных исследований были выявлены причины ложных срабатываний бытовых ДД, а также условия и зоны, при которых ДД не срабатывали вовсе. Вкратце, «уйти» от реакции пироэлектрического ДД было возможно, пронеся перед собой любое, в том числе про-

зрачное стекло и «экранирующий» лист из медного или алюминиевого сплава, в том числе большой по размеру (скрывающий человека) лист фольгированного гетинакса (из которого много лет изготавливают на производстве печатные платы) и другие предметы, включая и листы гипсокартона соответствующего большого размера. Также в практических исследованиях (см. ссылки) были даны рекомендации о том, как вызвать ложные срабатывания ДД и как их нейтрализовать относительно простыми способами.

Несколько лет назад невоенная (доступная большинству) промышленность начала выпускать адаптированные для бытовых условий микроволновые датчики движения, имеющие своеобразные особенности и достойные нашего специального внимания. В отличие от пироэлектрических детекторов, ДД-МВ могут видеть объект «сквозь» препятствия. Это происходит на основе отражённого сигнала микроволнового спектра радиоволн, имеющего, как мы знаем, разное затухание в разных условиях и при столкновении с предметами разного состава. Тем не менее ДД-МВ на основе этой своей технической особенности уже имеет преимущества перед ДД пироэлектрическими. ДД-МВ не воспринимает стекло, гипсокартон или иное препятствие, скрывающее человека в зоне действия детектора, как помеху, поскольку микроволновый сигнал проникает через это «препятствие» и выявляет «нарушителя» (движущийся или недвижимый, но появившийся

вдруг, нарушивший фоновый режим объект). Такой ДД-МВ можно монтировать скрытно, в том числе в стене (и кирпичной), и он будет эффективно работать. Одна из причин нежелательных (ложных) срабатываний бытового ДД-МВ также кроется в его свойствах. Рабочая зона действия в угловом измерении такого датчика довольно широка, у некоторых моделей достигает 360°, но, как правило, не бывает меньше 100°, и у бытовых (неспециализированных, предназначенных для охраняемых систем) не регулируется.

Отсюда, при установке ДД-МВ в сторону внешней стены (квартиры, нежилого помещения – офиса, склада или частного дома) он будет реагировать на движение людей и животных вне границ такого помещения. Может быть, в таком формате кому-то покажется уместным «следить» за движением соседа, когда тот, к примеру, посетит санузел (а у вас загорится свет или зазвучит звуковой сигнал, если в качестве исполнительного устройства подключить адаптированный к соответствующему напряжению генератор ЗЧ), или за движением вашей собаки, призванной охранять порог сельского дома, однако все эти частные случаи приводим мы в статье только для общей информации, и они не являются основной целью настоящей публикации. На рис. 1 представлена диаграмма зоны действия ДД-МВ 201, из чего видны возможности датчика. Для сравнения, на рис. 2 иллюстрация рабочей зоны датчика ДД-МВ модели 501.

Принцип работы микроволновых датчиков в разном исполнении и для разных условий монтажа основан на генерировании высокочастотных электромагнитных волн и детектировании полученного обратного сигнала. Обратная связь потому и возможна, что ДД-МВ позволяет детектировать поле в зоне ответственности и реагировать на движение через относительно тонкие преграды (гипсокартон, стекло, подвесной потолок и т.д.). Уместно устанавли-

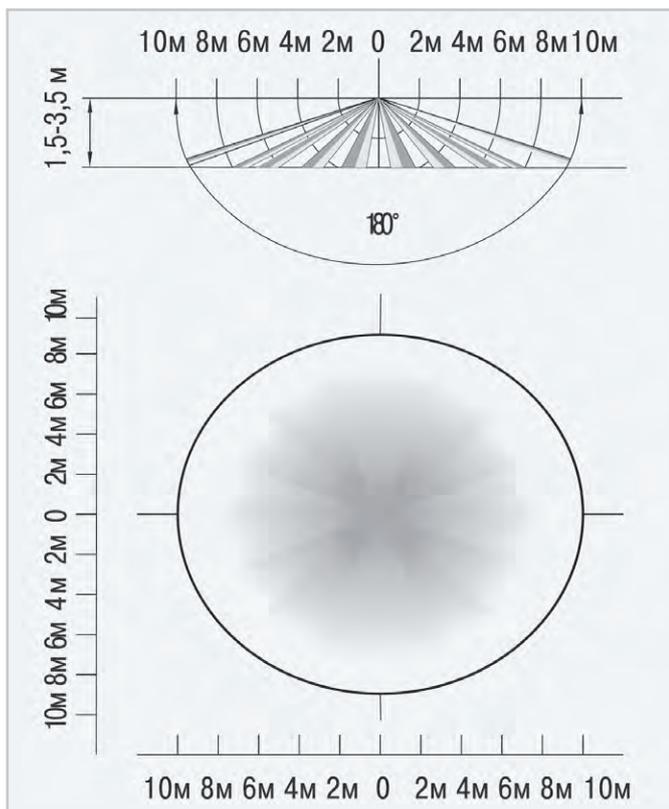


Рис. 1. Диаграмма активной зоны действия ДД-МВ 201

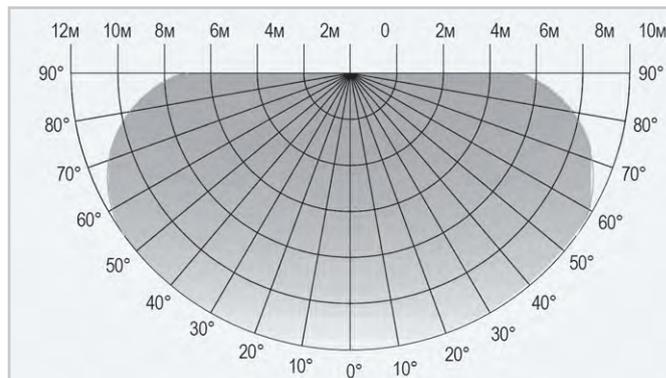


Рис. 2. Иллюстрация рабочей зоны датчика ДД-МВ модели 501



Рис. 3. Внешний вид ДД-МВ 201

вать датчик под стеклом светильника, подвесным или натяжным потолком, внутри дома перед дверью для обнаружения объектов на улице.

При обнаружении движения в рабочей зоне датчика встроенное слаботочное ЭМ реле коммутирует нагрузку, последняя находится под напряжением в течение заданного времени (время, как правило, аппаратно настраивается) и выключается. Если движение в зоне ответственности не прекращается, таймер задержки выключения ведёт отсчёт снова. Такие бытовые датчики снабжены функцией контроля освещённости. Если освещённость в зоне ответственности выше заданного уровня (уровень настраивается), нагрузка включаться не будет, что позволяет дополнительно экономить электроэнергию в светлое время.

Рассмотрим ДД-МВ моделей 101 и 201 (имеющие одинаковый внешний вид), представленные на рис. 3.

Датчики предназначены для автоматического включения нагрузки при появлении движущихся объектов в зоне обнаружения и выключения нагрузки с возможностью настройки времени отключения, уровня, освещённости и дальности обнаружения. Сравним эти параметры ДД-МВ 201 с микроволновым датчиком движения PRIME-MW-SURFACE-S90x41-300W (230V, 2.6A,

MULTI, IP20), совмещённым с датчиком освещённости. Та же модель может именоваться как LDD11-201MB-1200-001B. Высота установки 1,5–3,5 м. Угол обнаружения 360°. Может срабатывать через двери и тонкие – до 30 см – стены. Настройки: время отключения (8 с – 12 мин), радиус зоны срабатывания (1–10 м), освещённость (2–2000 люкс). Модель PROxima MV704 с углом обзора 180° и размерами корпуса 52×80 мм имеет винтовой тип клеммного подключения. Датчики этой линейки предназначены для бытового применения с подключением к осветительной сети 230–240 В переменного тока (AC). Коммутируемая нагрузка до 1200 Вт. Коммутация осуществляется с помощью слаботочного реле, установленного в пластиковом корпусе единого устройства. Имеется в широких пределах регулировка порога срабатывания по освещённости (Lux), регулировка порога срабатывания по чувствительности (Sens) и задержка выключения по времени (Time) от 10 с до 12 мин. Датчики движения в подключённом состоянии осуществляют постоянный контроль освещённости и по схеме похожи, но могут различаться по дополнительному функционалу, способу подключения. К примеру, при сопоставимой цене микроволновые ДД типа ДД-МВ 101 (а также моде-

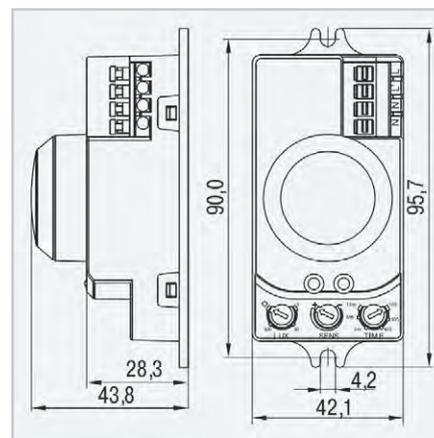


Рис. 4. Вид на корпус и органы управления ДД-МВ 201

лей 201, 301, 401, 501) имеют регулировку задержки выключения, в то время как EKF dd-mw-704 её не имеет, в первом из рассматриваемых крепление коммутационных проводов осуществляется не винтовым способом, а более удобным пружинным клеммником и с изоляцией, а у EKF dd-mw-704 для этой цели используется винтовой зажим на клемнике на корпусе устройства. На рис. 4 представлен вид на корпус и органы управления ДД-МВ 201.

Датчик TDM Electric ДДМ-01 и его разновидности ДДМ-02 функционально соответствуют модели ДД-МВ 101 и 102 соответственно. В зависимости от степени защиты датчика можно использовать



Рис. 5. Вид на СВЧ-модуль ДД-МВ 201

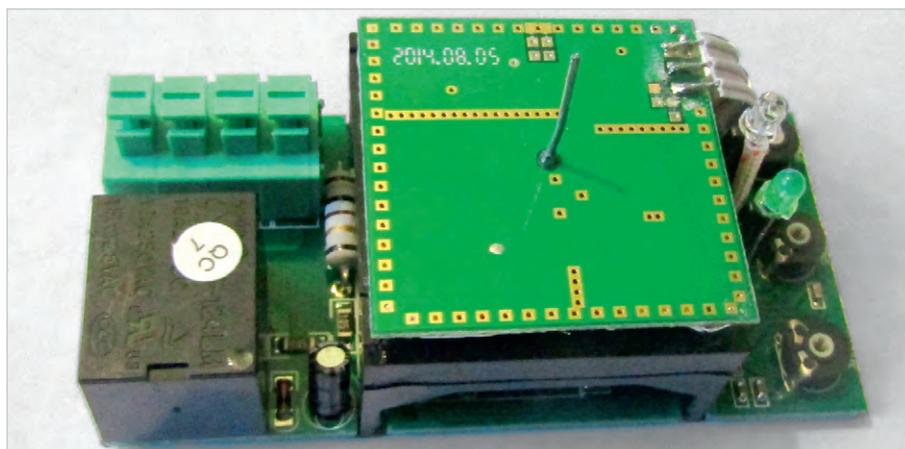


Рис. 6. Вид на печатную плату внутри корпуса устройства

как в помещении (IP20), так и на улице под навесом (IP44). Класс защиты может быть разным – от IP20 до IP65. Первый предполагает установку только в закрытых помещениях, IP65 – может работать в условиях незначительной влажности. Расшифровка степени защиты IP, соответствующая таблица и стандарты представлены в [3].

Устройство микроволнового датчика

Микроволновые датчики движения работают по принципу локации СВЧ-излучением. Конструктивно такие устройства состоят из передающего и приёмного узлов. Передающий узел генерирует высокочастотные электромагнитные волны с частотой 5,8 ГГц, и получают эхо, отражённое от объектов направленным действием. Рабочий диапазон температур варьируется от -25 до $+75^{\circ}\text{C}$, а порог срабатывания от 5 до 200 люкс. Кроме того, датчики (кроме ДД-МВ 301, ДД-МВ 501) снабжены светодиодом зелёного цвета - индикатором включения нагрузки. Другими словами, в отличие от инфракрасного датчика, где сигналом пироэлектрического детектора на включение нагрузки является изменение теплового фона в рабочей зоне, микроволновый датчик реагирует на изменение радиочастотно-

го (микроволнового, СВЧ) поля, которое предварительно сам генерирует. Причём отражающий объект может быть не только теплокровным, живым, но и любым. Причём приближение фронтально к датчику даёт больший эффект обнаружения, чем прохождение сбоку и рядом. Главное – способность отражать радиоволны СВЧ, а она у разных предметов характеризуется по-разному, и это будет следующим шагом нашего исследования, в том числе в части эффекта Доплера. Этот эффект известен в радиолокации и лежит в основе работы электронного радара, когда объект не только обнаруживается, но и вычисляется скорость его перемещения. Простой и информативный пример эффекта Доплера – радар обнаружения скорости, применяемый в ГИБДД.

Особенности СВЧ-модуля

Вскрыв корпус устройства, увидим основной модуль микроволнового датчика движения МН-ЕТ LIVE НВ100, выполненный на базе доплеровского радара НВ100 с тем же принципом работы (эффект Доплера). Он представлен на рис. 5.

Модуль микроволнового датчика движения МН-ЕТ LIVE НВ100 выполнен на базе доплеровского радара НВ100, принцип работы которо-

го основывается на эффекте Доплера. Используется для определения скорости и расстояния до объекта. Дальность измерений – условно регулируемая от 2 до 16 м. Потребляемый ток до 50 мА. Работает на частоте 10,525 ГГц. На рис. 4 виден штырь (провод без изоляции) длиной 18 мм – это антенна СВЧ-детектора. Коэффициент усиления антенны: 8 дБи. Питание модуля $5\text{ В} \pm 10\%$ DC. К СВЧ-модулю МН-ЕТ LIVE НВ100 подключены три проводника: два из них питание и один – выход «управляющего» сигнала детектора (относительно общего провода). На этом модуле линейка не заканчивается, он приведён для примера. В открытом доступе есть готовые модули, реализованные на печатных платах, к примеру, WAVGAT RCWL-0516 для автомата освещения или охранной сигнализации и др., ему подобные. Микроволновый датчик RCWL-0516 имеет дальность обнаружения объекта до 5 м. Но этот предел можно корректировать в сторону меньшей чувствительности устройства. Для этого вместо резистора R9 с обозначением на печатной плате устанавливаются подстроечный резистор сопротивлением от 500 до 1000 Ом. Так можно плавно регулировать дальность обнаружения объекта от 0,1 до 5 м. В закрытом модуле МН-ЕТ LIVE НВ100 такое решение недоступно.

Вид внутри корпуса устройства

Вскрываем корпус датчика с помощью шлицевой отвертки. На рис. 6 представлен внешний вид на печатную плату внутри корпуса устройства. Антенна посередине – излучающий и принимающий элемент. На СВЧ-модуль, как видно на фото, приходят всего три провода: два – питание и один выход «управляющий».

Схемы подключения ДД-МВ разных моделей приведены на рис. 7 и не отличаются оригинальностью. Схема подключения нагрузки также указана на корпусе каждого датчика с тыльной стороны. Как видно из рис. 6, она соответствует схемам подключения типичного ИК ДД (с пироэлектрическим детектором) – общий ноль, фаза «вход» и фаза «выход».

Другие особенности применения микроволнового датчика движения

ДД-МВ можно доработать под конкретные задачи. Самое простое инженерное решение – использование

такого промышленного датчика в устройствах сигнализации, в том числе самодельных. Для этого необходимо изменить подключение к коммутирующим контактам реле. А именно: установить параллельно контактам реле (рассчитано на ток 16 мА) полупроводниковый диод (катодом к «+» питания) типа Д213 или аналогичный, для защиты от бросков обратного тока при включении реле. И затем подключить параллельно контактам слаботочного реле (согласно полярности) звуковой капсюль, рассчитанный на напряжение 9–15 В. Среди них встречаются разные, в том числе с прерывистой генерацией сигнала ЗЧ. Таким образом, при включении устройства (срабатывания сигнализации) будет слышен звуковой сигнал.

Зона обнаружения ДД-МВ 201 по вертикали, согласно сведениям от производителя, предполагает расстояние от 1,8 до 4 м. По горизонтали – от 1,5 до 8 м. При развёрнутой диаграмме во фронт от датчика до 120°. Соответственно, от 0 до 1,5 метров по горизонтали и от 0 до 1,8 м по вертикали (примерно) будет «мёртвая зона», где устройство не имеет стабильных срабаты-

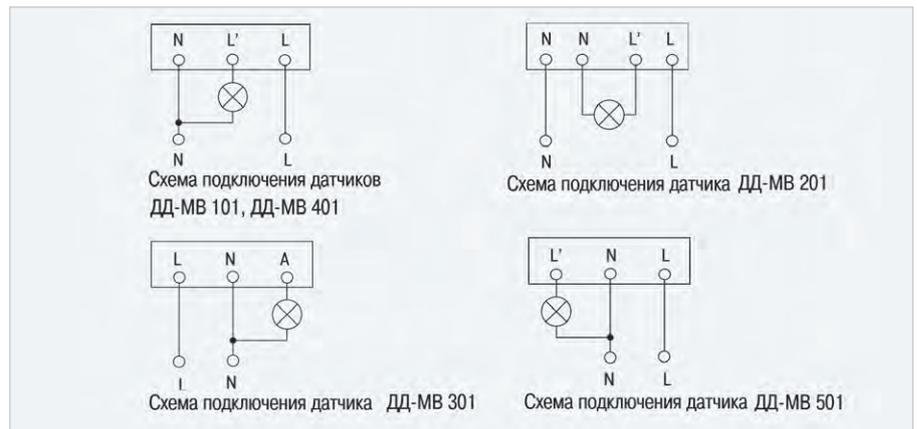


Рис. 7. Схемы подключения коммутируемой нагрузки некоторых микроволновых ДД

ваний. Во-первых, это ограничение нужно учитывать в работе. Во-вторых, датчик значительно хуже – на практике установлена чувствительность примерно в 2 раза ниже, но всё же он «видит» зону не только фронтально и сбоку, но и с тыла. Таким образом, будет реагировать на движение в этой области тоже, что может при определённых обстоятельствах считаться нежелательными (ложными) срабатываниями. Решается этот вопрос относительно просто – принудительным экранированием со стороны тыльной части устройства

фольгой или жестяной пластиной, под соединённой проводником типа МГТФ-0.08 к «минусу» питания. Саму пластину в этом случае также изолируют любым подходящим материалом, так как питание устройства от осветительной сети организовано с помощью бестрансформаторного источника – во избежание случайного поражения электрическим током при прикосновении к экранирующей пластине. На практике нельзя сказать, что эффект экранирования был достигнут полностью: под влиянием многочисленных отражений



МЕДИАНА ФИЛЬТР

КОМПЛЕКСНЫЕ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕИОНИЗОВАННОЙ ВОДЫ ОТ МАРКИ В ДО Е1.3

ГОСТ Р 58144-2018 • ГОСТ 52501-2005 • ASTM D5127 • SEMI • CLSI • CAP • ISO 3696 • OСТ 11.029.003 • ГОСТ Р 58431-2019



- АУДИТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ
- ДЕИОНИЗОВАННАЯ ВОДА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ
- ВОДА ДЛЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
- ВОДА ДЛЯ ЛАБОРАТОРИЙ
- ВОДА ДЛЯ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ
- СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ (PP, PVDF)
- РЕАГЕНТЫ СОБСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА
- МОНТАЖ, НАЛАДКА, СЕРВИС

ДЛЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ:

- ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
- ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
- ПОЛУПРОВОДНИКОВ
- ЖИДКО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ
- СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

📍 105318, Москва, ул. Ткацкая, д. 1

☎ +7 (495) 660-0771

✉ info@mediana-filter.ru

🌐 www.mediana-filter.ru

Реклама

Таблица 1. Сравнительные данные по излучаемой мощности некоторых СВЧ-устройств

Параметр	СВЧ-печь	Сотовый телефон	Микроволновый ДД	Wi-Fi роутер в пределах 10 метров
Мощность, Вт	1000	10	0,1	10
Частота, ГГц	2,45	1,82	6	2,45

сигнала от металлизированного покрытия экрана, профилей крепления гипсокартона (материала стен) диаграмма обнаружения датчика изменялась непредсказуемо, и привести её на иллюстрации невозможно.

Опасности облучения от подобных датчиков, на мой взгляд других исследователей, не существует, поскольку даже у Wi-Fi роутеров «для Интернета», столь популярных сегодня и установленных почти в каждом помещении, настраиваемая мощность порядка 0,1 Вт, что в 10 раз больше, чем от ДД-МВ. В табл. 1 (для сведения) сведены данные по СВЧ-мощностям.

Настройка ДД-МВ после подключения

Регулировка параметров и тестирование осуществляется с помощью отвёртки с прямым шлицем. Поверните регулятор уровня освещённости LUX по часовой стрелке на максимум. Поверните регулятор времени выдержки TIME против часовой стрелки на минимум, поверните регулятор радиуса действия SENS по часовой стрелке на максимум. Затем подайте напряжение питания. В течение 30 с датчик выйдет на рабочий режим, что характеризуется включением реле (коммутация нагрузки). Выключение нагрузки произойдёт через 10 ± 3 секунды автоматически. Далее при нахождении движущихся объектов в зоне обнаружения датчика снова произойдёт включение нагрузки. После прекращения движения объекта в зоне обнаружения должно произойти отключение нагрузки по истечении времени, заданного регулятором TIME. Затем для перевода ДД-МВ из тестового в рабочий режим поверните регулятор уровня освещённости LUX против часовой стрелки на минимум. При освещённости выше 3 люкс (сумерки) датчик не должен включать нагрузку.

Настройка зоны обнаружения практически осуществляется следующим образом. Параметры настроек устройства под конкретные задачи освещённости и чувствительности выбираются опытным путем. Установка времени выдержки датчика осуществляется регулятором TIME. Сей регулятор позволяет установить вре-

мя нахождения нагрузки во включённом состоянии после срабатывания датчика. Отсчёт времени выдержки начинается снова, если датчик получает повторные сигналы о нахождении в зоне обнаружения движущегося объекта в течение первого отсчёта времени. Установка уровня освещённости осуществляется регулятором LUX, позволяющим установить порог срабатывания в зависимости от уровня освещённости окружающей среды: при солнечном свете (позиция с символом «солнышко»), при минимальной освещённости (крайняя «левая» позиция – сумерки). Установка радиуса действия осуществляется регулятором SENS. Регулятор на основе подстроечного резистора позволяет корректировать дальность обнаружения объекта. При установке регулятора в крайнее левое положение «+» дальность обнаружения объекта максимальна. Дополнительные сведения по настройке и установке ДД-МВ линейки 101–501 можно получить в [4].

Особенности установки и практического применения

Высота установки ДД-МВ анонсируется производителем 3 м при максимальной дальности действия 15–16 м. Однако на практике это не так. При авторских экспериментах в закрытых помещениях площадью 25–35 кв. м наибольшая чувствительность достигается установкой микроволнового датчика на высоте 2–2,2 м от пола. При этом он реагирует при установке максимальной чувствительности (на панели регулировки) фронтально на расстоянии 2,5 м от перемещающегося объекта. Угол сканирования также не соответствует описанию и приближается только к 120° .

«Плюсы» и «минусы»

В отличие от пироэлектрических детекторов, реагирующих на изменение является изменение тепловой обстановки, микроволновый детектор реагирует на изменение радиочастотного (микроволнового, СВЧ) поля, излучает высокочастотные электромагнитные волны с частотой примерно

5,8 ГГц. Затем датчик реагирует на изменения в отражаемых волнах, которые могут вызываться перемещением объектов в контролируемой зоне. В отличие от инфракрасных и ультразвуковых дальномеров и датчиков движения, ДД-МВ не зависит от шума, пыли, температуры, освещения. Если устройство находится в помещении, оно может быть не связано с зоной освещённости (к примеру, освещение включается на улице). Это некоторый «плюс» с точки зрения безопасности и антивандальной недоступности. Стабильная работа ДД-МВ почти не зависит от температуры окружающей среды и объекта, в то время как инфракрасный работает неуверенно, если температура воздуха и объекта близки.

Среди отрицательных свойств микроволновых датчиков называют относительно высокую цену. Как у любых электронных датчиков, реагирующих на движение объекта в контролируемой зоне, у микроволновых случаются ложные срабатывания, что является их неустранимым пока недостатком. Из практических испытаний, проведённых автором в августе 2022 года, следует, что ДД-МВ типа 201 уверенно срабатывает на расстоянии до 10 м, если рабочей зоной (антенной) устройство направлено в нужную сторону, «по бокам», флангам устройство уверенно работает примерно на 4 м. Эти результаты позволяют предполагать, что данная линейка датчиков ориентирована на направленное действие, и имеет значение, как ориентирована антенна устройства – фронтально или иначе. В темноте присутствуют ложные срабатывания (возможно устранить настройкой LUX). Однако можно рекомендовать проверенные меры для уменьшения ложных срабатываний; об этом мы поговорим в следующей статье.

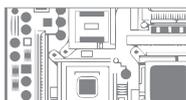
Литература

1. *Кашикаров А.П.* Электронные системы охраны с пироэлектрическими датчиками и способы их нейтрализации. М.: ДМК Пресс, 2015. 96 с.
2. *Кашикаров А.П.* Справочное пособие по системам охраны с пироэлектрическими датчиками. М.: РадиоСофт, 2016. 109 с.
3. Расшифровка степени защиты IP. Таблица и стандарты // URL: <https://electricps.ru/ingress-protection-ip>.
4. Инструкция по работе с ДД-МВ 101 и аналогичными // URL: <https://lk.iek.ru/api/store/5e29a9f1d2e8542745e9ab83.pdf>. 

ADVANTIX
ПРОМЫШЛЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Безвентиляторный компьютер 1U с резервированным питанием IPC-SYS8FN2

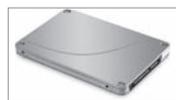
Плата управления питанием
PSC-200® AdvantiX



Компактный дизайн
Высота 1U,
для 19" стойки



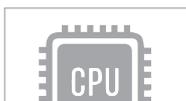
2x SSD 2,5"
с поддержкой
RAID 0/1



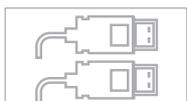
Безвентиляторная система охлаждения



Высокая производительность
Intel® Core™ i 8-9 Gen



Видеовыходы:
2x Display Port
1x HDMI



Слоты расширения:
1x PCIe
1x mPCIe
2x M.2



Гибкие возможности питания:
AC/DC с опцией резервирования



- Чипсет Intel Q370
- Слоты расширения: 1x PCIe x16 полной высоты, половинной длины, 1x M.2 с поддержкой PCIe x4 и SATA3, 1x M.2 с поддержкой PCIe x1 и USB2.0, 1x mPCIe (Full/Half)
- Поддержка российских ОС Astra Linux, Alt Linux, RedOS
- Рабочая температура от +5°C до +40°C. Опционально доступны от -20°C до +60°C (AC-версия) или от -40°C до +60°C (DC-версия)
- Порты: 4x USB 3.1, 2x USB 2.0, 2x DP, 1x HDMI, 2x LAN (RJ-45), 2x RS-232/422/485, 2x RS-232 (опция)

PROSOFT®

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU



EFM8SB20F16-QFN24 (DD1) в корпусе QFN-24 размером 4×4 мм. Для программирования МК на плате предусмотрены две возможности. Первая – с помощью USB DEBUG адаптера по двухпроводному интерфейсу C2, вторая – по интерфейсу RS-232 через COM-порт компьютера.

Для программирования по интерфейсу C2 используется разъём X1, к которому подключается кабель от USB DEBUG адаптера с сигналами этого интерфейса (C2D и RST) и «земля», а сам адаптер подключается к USB-порту компьютера (подробности см. в [2]). Для программирования по интерфейсу RS-232 используется разъём X2, к которому подключается кабель с сигналами этого интерфейса TxD, RxD, «земля» и питание +3 В (подробности см. в [3]).

RC-цепочка R1R2C1 предназначена как для штатной работы МК при включении питания (она затягивает низкое состояние сигнала RST, требующееся по штату работы, на время заряда конденсатора C1), так и в режиме программирования по интерфейсу C2 с помощью сигналов RST и C2D (резистор R2 даёт возможность легко управлять сигналом RST от этого интерфейса).

Интерфейс сопряжения МК с BME280 и дисплеем один и тот же – SPI. Для сопряжения с BME280 используется штыревой разъём X5, к которому ответным гнездом подключается модуль с BME280. Для сопряжения с дисплеем используется угловой штыревой разъём X4, к которому ответным гнездом (X1, рис. 2) подключается плата дисплея (рис. 2).

Как было упомянуто ранее, МК EFM8SB20F16 оборудован двумя интерфейсами SPI: SPI0 и SPI1. Для сопряжения с BME280 используется интерфейс SPI0, а для сопряжения с дисплеем – SPI1. Если для сопряжения с BME280 используется полный (двухнаправленный) интерфейс SPI (сигналы MOSI0, MISO0 и SCK0), т.е. в/из BME280 передаётся/принимается информация, то для сопряжения с дисплеем (точнее, с его платой – см. далее) используется однонаправленный интерфейс SPI (сигналы MOSI1 и SCK1), или, другими словами, в дисплей только передаётся информация. Скорость обмена по обоим интерфейсам SPI – 5 Мбод. Сигналы выбора кристалла CS для BME280 и дисплея разные: CSB и SCD соответственно. Обмен по SPI идёт с тем устройством, у которого состояние CS низкое (лог. 0). Помимо сигналов интерфейса SPI1

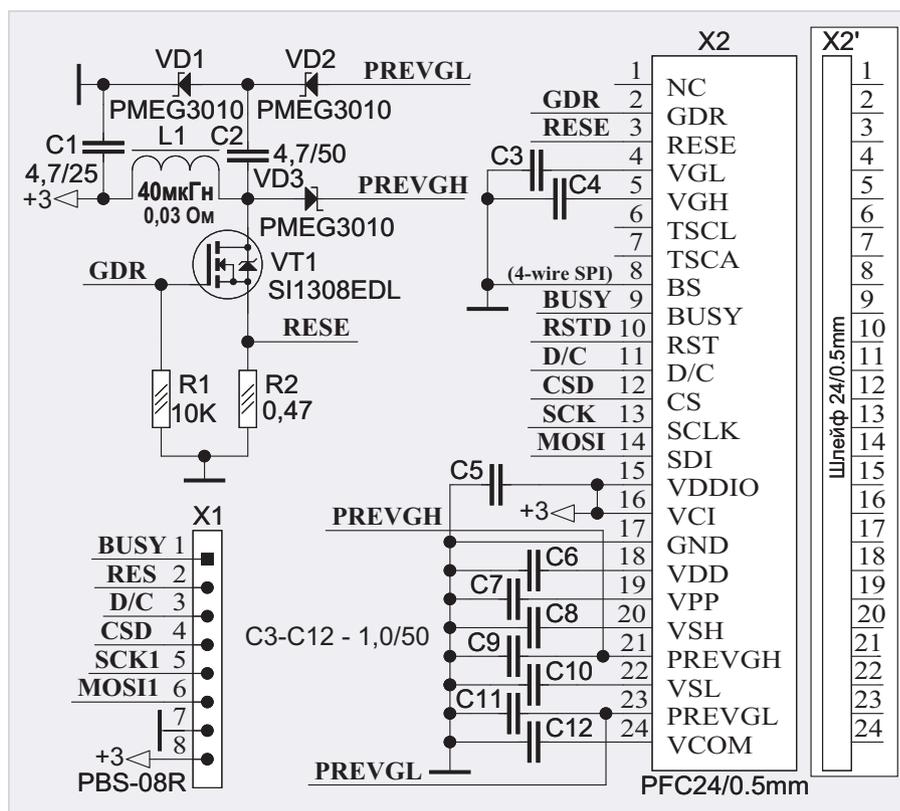


Рис. 2. Плата дисплея

(и CSD) в плату дисплея передаются сигналы D/C (Data/Command – данные/команда) и RES (сброс) и принимает сигнал BUSY (занято).

Питание на плату МК (+3 В и «земля») подаётся на угловой штыревой разъём X3; к нему ответным гнездом подключается кабель, вторая сторона которого подключается к стабилизатору напряжения +3 В, а он, в свою очередь, подключается к батарейке.

Плата дисплея (рис. 2) также не отличается особой сложностью. В ней используется повышающий DC-DC-преобразователь, построенный на транзисторе SI1308EDL (VT1), диодах Шоттки PMEG3010 (VD1–VD3) и конденсаторе C2. Назначение преобразователя – формирование двух относительно высоких напряжений: +20 В (PREVGH) и –20 В (PREVGL). Для работы преобразователя на затвор VT1 из контроллера дисплея подаётся меандр частотой около 1,8 МГц (сигнал GDR). VT1 усиливает по току этот меандр, диоды выпрямляют его, а конденсаторы C9 и C11 сглаживают пульсации двух выпрямленных напряжений. Резистор R2 ограничивает ток стока VT1, а резистор R1 выключает транзистор при отсутствии меандра (когда сигнал GDR находится в высокоимпедансном состоянии – при выключении питания в sleep-режиме). НЧ LC –

фильтр L1C1 препятствует проникновению ВЧ составляющей напряжения в тракт питания дисплея и всего устройства. Дроссель L1 представляет собой катушку, намотанную на ферритовом кольце D3.1-d1.7-h2.15 размером (D/d/h) 3,1×1,7×2,15 мм тройным проводом ПЭЛ-0,22. При количестве витков 5 индуктивность дросселя составляет около 40 мкГн, а омическое сопротивление около 0,03 Ом. Материал, из которого изготовлено кольцо, к сожалению, неизвестен, но его магнитная проницаемость μ , по опыту автора, существенно превышает 2000. Кольцо выпускается с уже скруглёнными кромками. Вместо этого кольца можно использовать кольцо K4×2,5×1,7 размером (D/d/h) 4×2,5×1,7 мм из материала M2000HM1 ($\mu = 2000$), у которого необходимо скруглить острые кромки (см. далее). На этом кольце следует намотать 10 витков тройным проводом ПЭЛ-0,22. При этом индуктивность составит около 30 мкГн, а омическое сопротивление около 0,04 Ом. Автор проверял работу устройства на обоих кольцах. Эта проверка показала, что прибор прекрасно работает при использовании любого из двух колец.

Следует отметить один интересный момент. Как в описании самого дисплея (см. datasheet на дисплей 1,5" e-paper-B), так и в описании контроллера

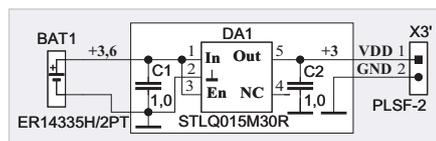


Рис. 3. Плата стабилизатора и кабель питания

UC8151, используемого в нём, в качестве дросселя (L1, рис. 2) применена катушка индуктивности для поверхностного монтажа, имеющая индуктивность 10 мкГн с максимальным током 1 А и максимальным током насыщения 0,5 А, при котором магнитопровод входит в насыщение, или, другими словами, перестаёт выполнять свои функции. Омическое сопротивление этой катушки 0,1 Ом. Выбор именно такой катушки индуктивности определяется отнюдь не её максимальным током насыщения, поскольку, как показали измерения (см. далее), максимальный ток при работе DC-DC-конвертора составляет всего 3 мА, и о насыщении магнитопровода катушки при таком токе вообще можно забыть. Дело совсем в другом, а именно – в омическом сопротивлении катушки (0,1 Ом). Действительно, с одной стороны, чтобы не пропускать ВЧ-составляющую напряжения DC-DC-конвертора в тракт питания, индуктивность катушки должна быть как можно больше (индуктивное сопротивление $X_L = \omega L$), с другой, для повышения эффективности работы DC-DC-конвертора омическое сопротивление катушки должно быть как можно меньше. С учётом того, что номинал резистора, подключённого к истоку транзистора (R2), составляет всего 0,47 Ом, омическое сопротивление катушки должно быть существенно меньше 0,47 Ом. Поэтому в описании контроллера и применена подобная катушка. Но в нашем случае при использовании вышеупомянутых двух катушек их индуктивность существенно больше 10 мкГн (40 мкГн и 20 мкГн), а омическое сопротивление существенно меньше 0,1 Ом (0,03 Ом и 0,04 Ом). Вот поэтому эти катушки идеально работают. Стоимость колец существенно различается: если кольцо K4×2,5×1,7 можно приобрести за 7–10 руб., то кольцо D3.1-d1.7-h2.15 стоит на порядок дороже – около 75 руб. Однако, поскольку оно выпускается с уже скруглёнными кромками, при его применении отсутствует «головная боль» со скруглением острых кромок, требующимся для кольца K4×2,5×1,7 (эта технология подробно описана далее).

Конденсаторы C3–C12 положены по штату работы дисплея. На плате расположен 24-контактный разъём PFC24/0.5mm (X2), к которому подключается шлейф дисплея. Разъём X1 подключается к ответному разъёму X4 платы МК (рис. 1).

Здесь следует сделать некоторое отступление по поводу причины, по которой сконструирована плата дисплея. Изначально автором был приобретён дисплей WFT0000CZ04 (1,54" e-paper-B) с разрешением 200×200 пикселей с уже готовой платой дисплея. Однако батарейка CR2477, которую автор изначально использовал, не проработав и двух дней, безнадежно «села». В связи с этим были проведены измерения потребления тока всей платы, которые показали следующее. В активном режиме обновления информации на экране дисплея, когда работает DC-DC-преобразователь, потребление тока составило около 15 мА, а в отдельные моменты – до 18 мА. Время потребления тока в активном режиме составило около 8 секунд. В sleep-режиме потребление тока составило около 3 мА. Кроме того, напряжение батарейки CR2477 в активном режиме падало до 2,75 В, а в sleep-режиме (3 мА) – до 2,9 В. Такое положение вещей автору не устроило, поскольку, как указано в описании как дисплея, так и контроллера (UC8151), потребление тока в активном режиме составляет не более нескольких мА, а в sleep-режиме – 0,6 мкА. Это и послужило причиной конструирования платы дисплея по схеме рис. 2.

Диоды VD1–VD3 (в оригинальной схеме это MBR0530 в корпусе SOD-123 размером 1,6×3,7 мм) были заменены диодами PMEG3010 в более компактном корпусе SOD323 размером 1,3×2,5 мм. Кроме того, PMEG3010 по сравнению с MBR0530 имеют меньшее прямое падение напряжения и больший максимальный ток (1 А против 0,5 А у MBR0530). Катушка индуктивности L1 (в оригинальной схеме это катушка для поверхностного монтажа номиналом 30 мкГн и размером (D/h) 7×2,5 мм) была заменена катушкой, намотанной на вышеупомянутом кольце. С оригинальной платы дисплея были удалены все компоненты, кроме дисплея, который к ней приклеен, а плата дисплея по схеме рис. 2 была приклеена пористой лентой с двусторонним липким слоем к поверхности, очищенной от компонентов оригинальной платы (см. далее). В связи с этим

автор рекомендует приобретать только один дисплей без платы дисплея. Измерения потребления тока платы по схеме рис. 2 показали следующее. В активном режиме потребление тока составило около 4 мА, а в sleep-режиме тестер показал нулевой ток (на диапазоне тестера в 30 мА ток 0,6 мкА покажет нулевое значение). Кроме того, время активного режима снизилось до 3 секунд. Это вполне устроило автора.

В связи с тем, что, как указано выше, напряжение батарейки CR2477 существенно падало в активном режиме работы дисплея, автор применил более ёмкую батарейку ER14335 (размером 2/3 AA) с напряжением 3,6 В ёмкостью 1,65 А·ч и микропотребляющий стабилизатор напряжения STLQ015M30R с выходным напряжением 3 В и падением напряжения не более 50 мВ при токе 150 мА (рис. 3). Потребление тока этого стабилизатора составляет, согласно описанию (datasheet), не более 1 мкА при токе 150 мА, а при меньшем токе, соответственно, ещё меньше. Плата стабилизатора (рис. 3) приклеена к батарейке пористой лентой с двусторонним липким слоем (см. далее). От стабилизатора отходит кабель питания, на второй стороне которого расположен разъём X3', который вставляется в ответный разъём X3 платы МК (рис. 1). Батарейка ER14335/2PT (BAT1) снабжена двумя приваренными контактами, на которые надеты 2 цанговых гнезда кабеля от платы стабилизатора.

Программные средства

Наиболее полную информацию о программировании E-ink (или E-paper) дисплеев можно найти на сайтах www.e-paper-display.com и www.good-display.com, поскольку из описания (datasheet) контроллера UC8151 понять, как программируются подобные дисплеи, достаточно проблематично. На этих сайтах приведены примеры программ для плат STM32 (на C), Arduino (на C), Raspberry Pi (на Python) и ESP8266 (на Python). Наличие подобных программ позволяет с их помощью легко запрограммировать E-ink дисплей в более простом, 8-разрядном МК, с программной памятью всего 16 кБ, каковым является EFM8SB20F16. Наиболее легко читаемы программы на Python'e, поскольку в них вся программа представлена всего одним текстовым *.ру-файлом, в отличие от программ на C, где имеются бесчисленные дополнительные *.h-файлы,

включённые (#include <...>) в основную программу, и «лазить» по этим файлам, чтобы понять работу основной программы, – дело очень неприятное, долгое и неблагодарное.

В основном при программировании E-ink дисплея имеются две проблемы. Первая – это инициализация дисплея. В примерах программ такая инициализация заключается в выводе в дисплей порядка 30–35 команд и данных, определяющих разрешение дисплея, установку счётчиков строк и столбцов на начало, различные моменты установки напряжений DC-DC-конвертора, температурные параметры и т.п., и особой сложности (инициализация) не представляет. Для решения этой проблемы нужно просто очень внимательно, без ошибок переписать (из примеров) все эти команды и данные, передаваемые вслед за командами, в свою программу, и всё будет работать.

Иное дело – вывод информации в дисплей. Здесь имеется два варианта. Но прежде чем описывать эти два варианта, сделаем некоторое отступление относительно того, что и как требуется вывести в E-ink дисплей.

Исходя из разрешения дисплея 200×200 пикселей для отображения 3 параметров: давления, температуры и влажности – имеет смысл расположить показания этих параметров на дисплее в три ряда. В первом ряду – показания давления, во втором – температуры, в третьем – влажности. Если, например, давление равно 751 мм рт. ст., температура 25°C, а влажность 45%, то в первом ряду должно быть число «751» и два символа, отражающих размерность давления, например, «мм Нг» (достаточно часто используемая), поскольку символы «мм рт. ст.» занимают много места. Другими словами, по горизонтали должно располагаться 5 символов. Такое же количество символов должно располагаться во втором и третьем ряду. Например, для температуры это будет знак («+» или «-»), показания, например, «25», символы «°» и «C», а для влажности – показания, например, «45», размерность, «%», и какой-либо символ, отражающий само понятие влажности, например, капля с делениями, как часто его обозначают. Причём, поскольку перечисленных символов для влажности всего 4, перед показаниями должен присутствовать символ пробела, чтобы общее количество символов было 5, как для давления и температуры.

Дисплей в программном смысле представляет собой строки и столб-

цы. Каждая строка имеет ширину ровно 8 пикселей, которым соответствует 8 бит или 1 байт. Таким образом, в дисплей по вертикали поместится ровно 25 строк ($25 \times 8 = 200$), начиная с нулевой и кончая 24-й. Кроме того, в дисплее имеется ровно 200 столбцов, начиная с нулевого и кончая 199-м. Если показания располагаются в 3 ряда, значит, каждый символ должен состоять из 8 строк ($8 \times 3 = 24$), и для заполнения всего дисплея должна присутствовать ещё одна пустая строка, чтобы общее количество строк было 25. Таким образом, каждый символ по вертикали должен занимать $8 \times 8 = 64$ пикселя. Поскольку по горизонтали имеется 200 столбцов, а символов 5, то, разделив 200 на 5, получим 40. Но между символами, чтобы они не сливались, должны быть предусмотрены пробелы хотя бы в 3 пикселя. Если ширина символа будет, например, 37, то по горизонтали 5 символов займут $5 \times 37 = 185$ пикселей, и останется ещё 15 пробельных столбцов, что составляет по 3 пробела на символ. Таким образом, один символ должен занимать поле в 64×37 пикселей или 8 однобайтных строк по 37 столбцов, и для его вывода в дисплей понадобится $8 \times 37 = 296$ байт. О том, как сформировать эти 296 байт, будет рассказано далее. Вывод информации в дисплей осуществляется по строкам и столбцам.

Теперь, возвращаясь к прерванной последовательности изложения, можно уже пояснить, что это за два варианта вывода.

В первом варианте специальными командами, посылаемыми в дисплей, можно сформировать 3 окна высотой по 8 строк и шириной 200 столбцов. При этом нужно указать номер начальной и конечной строки окна и номер начального и конечного столбца. Например, для первого ряда это может быть 0-я и 7-я строки, или, пропустив одну пробельную строку сверху, 1-я и 8-я строки. А номера начального и конечного столбцов указать как 0-й и 199-й. В дисплее организованы счётчики строк и столбцов. При выводе символа в окно счётчики строк и столбцов могут инкрементироваться (увеличиваться на единицу) или декрементироваться (уменьшаться). Это зависит от команды, посылаемой в дисплей. Для простоты объяснения предположим, что они инкрементируются. Пусть начальные и конечные значения счётчиков строк и столбцов равны 1 и 8 и 0 и 199 соответственно. Тогда при выводе символа

(296 байт) происходит следующее. При выводе восьми байт (с 0-го по 7-й из 296) в 0-й столбец счётчик строк инкрементируется, но после вывода 7-го байта (в строку номер 8) счётчик строк автоматически устанавливается на 1-ю строку, а счётчик столбцов инкрементируется, т.е. устанавливается с 0-го на 1-й столбец. Это позволяет не следить за счётчиками, в связи с чем все 296 байт каждого символа, если их выводить подряд, выведутся туда, куда нужно. Аналогично можно сформировать 2-е окно для 2-го ряда и 3-е окно для 3-го ряда символов, и таким же способом вывести всю необходимую информацию в дисплей. Кстати, такой же способ вывода применяется при выводе информации в OLED-дисплей. На первый взгляд кажется, что вывод информации в E-ink дисплей достаточно простой. Но здесь кроется один неприятный момент, или своеобразная ловушка (по времени). Дело в том, что, после того как информация записана в памяти контроллера, для того чтобы, она попала на экран дисплея, необходимо дать команду, которую в программах называют «update» (обновить) или «refresh» (освежить). В русском языке есть понятие «освежить в памяти». На самом деле такой «рефреш» при переносе изображения из записанного в памяти контроллера на экран дисплея занимает несколько секунд, в отличие от OLED-дисплея, у которого информация на экране появляется сразу же после записи в память контроллера. Например, «рефреш» для каждого подобного окна занимает около 5 секунд, а для всех 3 окон – более 15 секунд. Кроме того, при таком оконном выводе требуется предварительно ещё очистить весь дисплей, т.е. заполнить всю его память (а это $25 \times 200 = 5000$ байт) числами fff, и в конце дать ещё одну команду «рефреш». Причём, как ни странно, очистка экрана занимает около 3 секунд. В результате подобный оконный вывод займёт около 22 секунд (это было проверено секундомером). Естественно, при таком оконном выводе дисплей работает по полной программе и потребляет значительный ток в течение 22 секунд. Даже при обновлении показаний давления, температуры и влажности один раз в 10 минут всё равно 22 секунды – непозволительно долго. Здесь уже никакой батарейки не хватит, или её придётся достаточно часто менять. В связи с этим автор задался вопросом: а нельзя ли вывести всю информацию на экран дисплея за

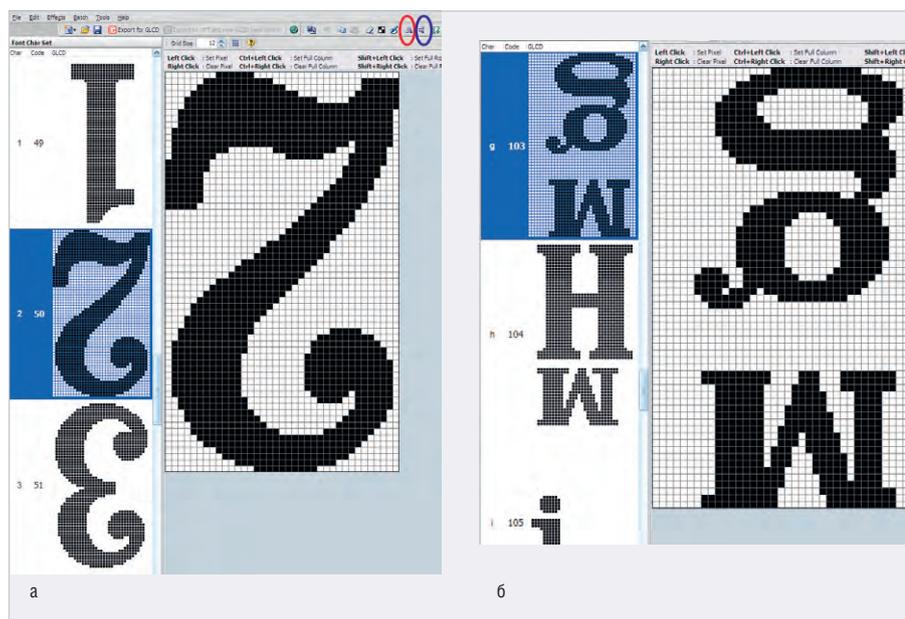


Рис. 4. Примеры отображения символов в программе GLCD Font Creator

один раз так, как это делается, например, при очистке экрана? Тогда появился ещё один вариант.

2-й вариант вывода. Пусть последние (пятые) символы в каждом из 3 рядов отражают размерности измеренных величин, например, «м/г» для давления, «С» для температуры и «капля» для влажности. Тогда, чтобы заполнить самый правый (199-й) столбец, можно вывести один верхний пробел шириной в одну строку (один пустой байт, равный ffh), далее вывести последние 8 байт (из 296) символа «м/г», затем вывести последние 8 байт символа «С» и далее вывести последние 8 байт символа «капля». В результате выведется ровно 25 строк (25 байт) в 199-й столбец, после чего счётчик столбцов автоматически декрементируется и установится на 198-й, а счётчик строк, инкрементируясь и достигнув 24, установится на нулевую строку. После этого опять пропускаем верхнюю строку и выводим, как и ранее, по 8, но уже предпоследних байт каждого символа. Таким же образом выводим и все остальные из 296 байт вышеуказанных символов. Далее аналогичным образом выводим и все остальные символы (уже числа) показаний давления, температуры и влажности. Далее даём одну команду «рефреш», и на этом весь вывод информации в дисплей заканчивается. Кроме того, при таком «безоконном» выводе очищать дисплей (с командой «рефреш») уже не потребуется. Запрограммировав подобный вывод в МК и запустив его, автор стал наблюдать за дисплеем. Экран замигал, и через 3 секунды и на дисплее полностью отразились все показания и их размерно-

сти. Такой вывод информации в дисплей автор и взял на вооружение. На первый взгляд кажется, что подобный вывод более сложен и потребует больших усилий с точки зрения программирования. Однако практика показала, что ничего сверхсложного в этом нет. В дополнительных материалах к статье приведён текст фрагмента программы с подобным выводом. Просмотрев этот фрагмент, можно убедиться, что всё довольно просто.

Теперь по поводу получения кодов символов. Для этого автор использовал программу GLCD Font Creator v. 1.2.0.0 (от компании MikroElektronika – www.mikroe.com). В ней можно выбрать практически любой шрифт, его параметры (например, размер, свойства – жирный, обычный, наклонный и т.п.). Программа сформирует все символы данного шрифта и выведет их на экран монитора компьютера. Далее необходимо убрать все пустые строки и столбцы сверху, снизу и справа, чтобы каждый символ вписался в окно определённого размера (в нашем случае это 64×37 пикселей). Это делается специальными опциями с пиктограммами, на которые необходимо навести курсор мыши и кликнуть. Для того чтобы цифры и символы выводились на дисплей справа налево и сверху вниз, каждый символ необходимо перевернуть вверх ногами (отразить по вертикали) и отразить по горизонтали. Это можно сделать всего двумя кликами мыши по соответствующим пиктограммам в меню программы (синий и красный овалы на рис. 4а). В этом случае,

например, двойка будет выглядеть как на рис. 4а, а символ м/г – как на рис. 4б.

После этого, нажав пиктограмму «Export for GLCD» и в открывшемся окне – опцию «microC», получим файл на C (его также следует назвать), в котором будут содержаться все 296 байт для каждого символа. Их остаётся только привести в приемлемый для программы вид и сформировать из них двумерный массив, например, MD[19][296], где первое измерение [19] отражает количество символов, а второе [296] – количество байт для каждого символа.

Для цифр был выбран шрифт Clarendon Condensed размера 65, жирный. Для него был сформирован файл на C с названием:

```
//GLCD FontName : Clarendon_Condensed37x64
//GLCD FontSize : 37 x 64
```

который автор и использовал для отображения цифр.

Шрифт Clarendon был выбран по следующим соображениям. Он не такой строгий, как, например, Arial или Courier New, но и не слишком вычурный. По сравнению с Times New Roman жирным Clarendon значительно «жирней», т.е. чёрные пиксели каждого символа занимают большую площадь окна 64×37 пикселей, и, естественно, символ легче читается. Кроме того, на взгляд автора, шрифт Clarendon достаточно симпатичный.

Символы, которых нет в этом шрифте, были буквально нарисованы в программе GLCD Font Creator. Это следующие символы: «м/Н» (оба символа нарисованы), «м/г» («м» нарисована, «г» взята готовая из шрифта меньшего размера) – таким образом, 2 символа «м/Н» и «м/г» превращаются в надпись «мм/Нг»; «°» нарисован, «С» был немного сужен, «%» (нарисован – оригинальный «%» сужен), символ капли с делениями (нарисован), символы «+» и «-» нарисованы. Символ пробела взят готовый (там все нули). Таким образом, общее количество символов вместе с цифрами (их 10 – от «0» до «9») составляет 19, поэтому, как указано выше, двумерный массив получился размерностью MD[19][296]. Рисование в программе очень простое: наведя курсор мыши на белый пиксель и нажав левую кнопку, можно получить чёрный пиксель, а наведя на чёрный и нажав правую кнопку – белый.

И последнее, что следует добавить по поводу программных средств, – это изменения в инициализации устройств, поскольку МК EFM8SB20 отличается от МК EFM8SB10 [1].

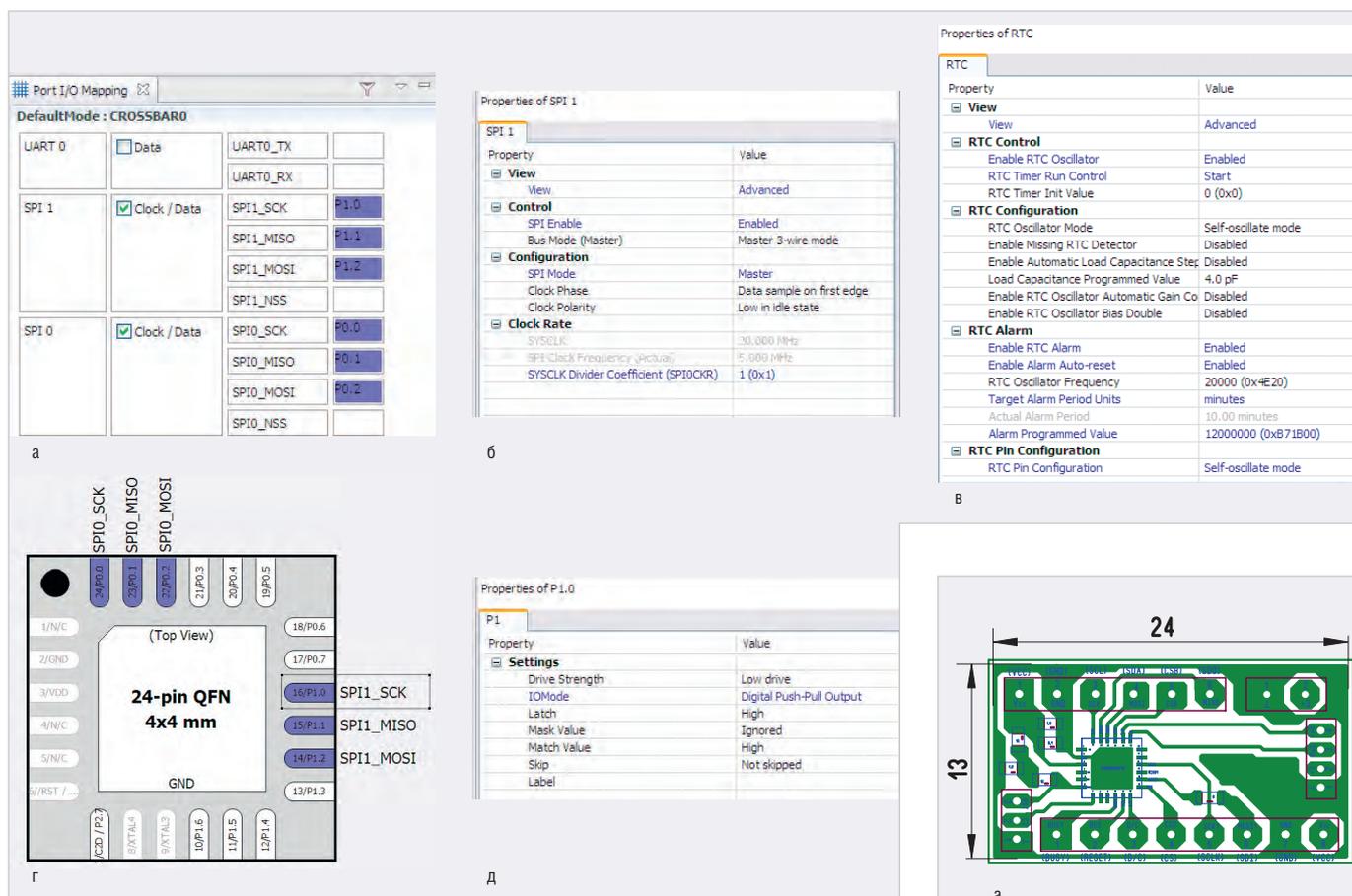


Рис. 5. Настройка устройств МК: а) разрешение SPI0 и SPI1, б) настройка SPI1, в) настройка RTC, г) настройка портов, д) пример настройки порта P1.0

Во-первых, необходимо разрешить оба SPI – SPI1 и SPI0 (рис. 5а) и настроить каждый из них, как показано на рис. 5б. Во-вторых, настроить RTC, как показано на рис. 5в (эта настройка отличается от настройки RTC в EFM8SB10 [1]). В-третьих, в связи с разными корпусами МК EFM8SB10 (QFN20) и EFM8SB20 (QFN24) настройка портов должна соответствовать рис. 5г, д. Все остальные настройки – те же самые, что и в [1].

После трансляции программы в специальном окне среды программирования Simplicity Studio v.4 (от Silicon Laboratories) отобразится результат этой трансляции (сообщение):

```
Program Size: data=117.1 xdata=0
const=0 code=11354
LX51 RUN COMPLETE. 0 WARNING(S),
0 ERROR(S)
Finished building target: EFM8SB-
20F16G-A-QFN24.omf
```

Из этого сообщения можно заключить, что в программе использована почти вся внутренняя оперативная память с прямой адресацией объемом 128 байт (data=117.1), а внешняя оперативная память с косвенной адресацией объемом 4 кБ не использована (xdata=0). Кодовая часть программы

использует далеко не всю программную память объемом 16 кБ, или 16 384 байта (code = 11 354). Остаток программной памяти составляет: $16\ 384 - 11\ 354 = 5030$ байт \rightarrow 5 кБ. Кроме того, при трансляции применена так называемая small-модель, в которой данные располагаются в области памяти с прямой адресацией (data). В этом случае, во-первых, существенно экономится программная память, а во-вторых, программа работает намного быстрее.

Разводка и внешний вид плат

Разводка плат (рис. 6–8) сделана автором с помощью программы SprintLayout v.6. Файл разводки в формате *.лауб приведён в дополнительных материалах к статье на сайте журнала.

Из рисунков разведённых плат и их внешнего вида можно заключить, что разводка плат очень проста, а сами платы небольшого размера. Здесь следует добавить, что если не предполагается программирование МК с помощью COM-порта компьютера, то разъём (X2, рис. 1) не нужен, поэтому припаять его (и сверлить для него отверстие) совсем не обязательно (в данном случае он отсутствует). На рис. 6а в его

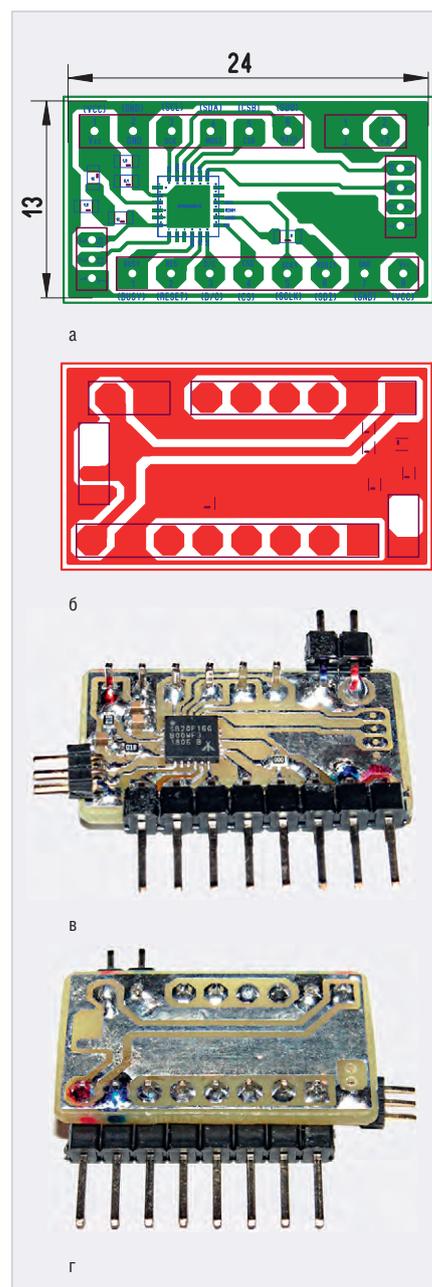


Рис. 6. Разводка и внешний вид платы МК: а, в – вид со стороны расположения компонентов; б, г – вид с обратной стороны

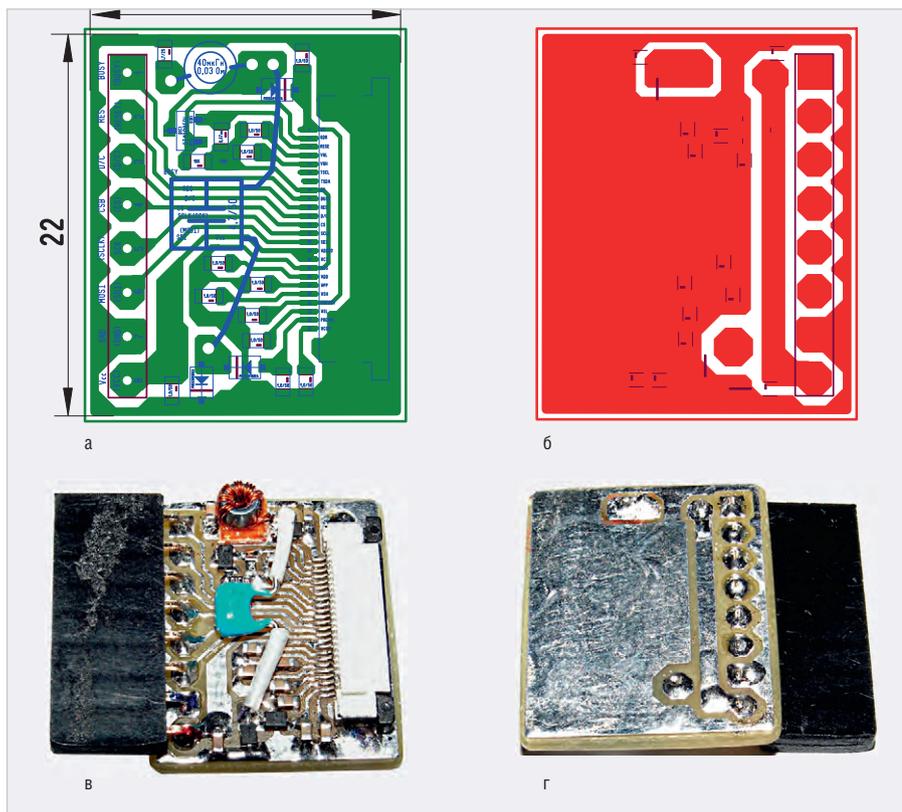


Рис. 7. Разводка и внешний вид платы дисплея: а, в – вид со стороны расположения компонентов, б, г – вид с обратной стороны

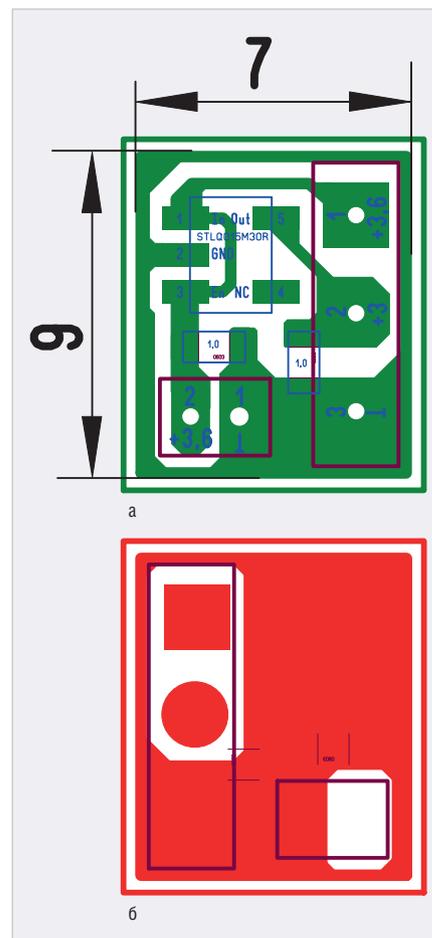


Рис. 8. Разводка платы стабилизатора: а – вид со стороны расположения компонентов, б – вид с обратной стороны

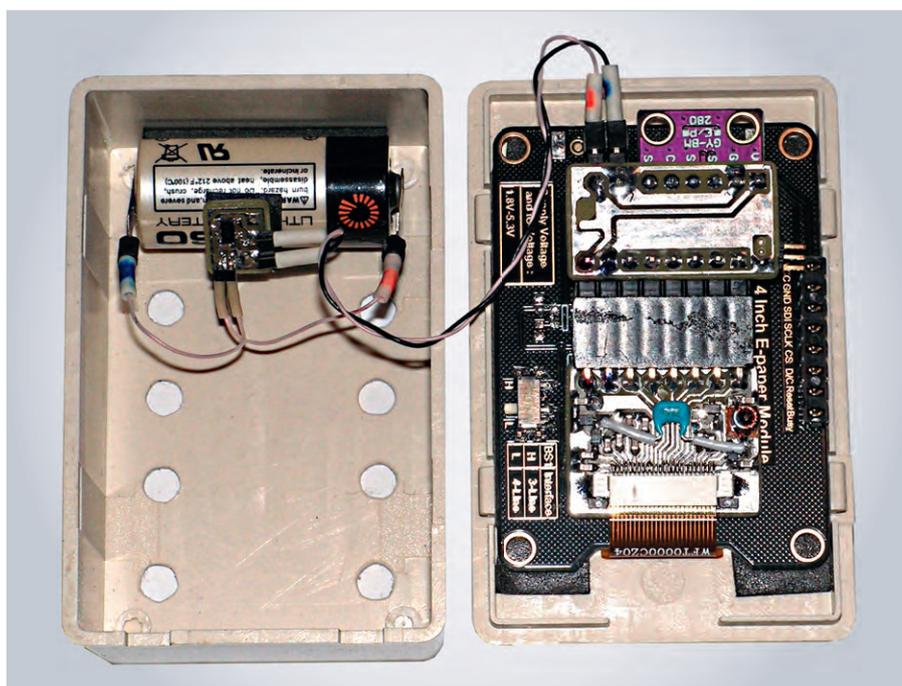


Рис. 9. Устройство в открытом корпусе

место справа в середине, на рис. 6б, г – слева в середине. Для того чтобы катушка индуктивности не касалась дорожек платы, под кольцо с намотанным проводом к плате приклеена пластина из тонкого (1 мм) текстолита (рис. 7в). Чтобы выводы единственного конденсатора, предназначенного для навесного монтажа (он голубого цвета на рис. 7в), не

касались дорожек платы, на них надет фторопластовый кембрик (тефлоновая трубка). В связи с простотой на рис. 8 приведена только разводка платы стабилизатора; её можно заменить приклеенной к батарейке пористой лентой с двусторонним липким слоем (см. далее рис. 9). Через все переходные отверстия плат (со слоя на слой) проходят либо

контакты разъёмов, либо выводы навесных компонентов, которые необходимо пропаять с двух сторон плат. Это позволило не использовать металлизацию отверстий, технология которой в домашних условиях весьма проблематична и поэтому неприемлема.

Конструкция и результаты работы устройства

Устройство расположено в корпусе (рис. 9) размером 70×45×28 мм (название корпуса «20-33» RUICHI) с защёлкивающейся крышкой (безвинтовое соединение). Для дисплея в крышке прорезано окно. Поскольку дисплей намертво приклеен к плате, с которой все компоненты были удалены (см. выше), эта плата приклеена к внутренней поверхности крышки пористой лентой с двусторонним липким слоем. К этой плате той же лентой приклеена плата дисплея, в которую вставлена плата МК, а в неё – плата с модулем ВМЕ280. Шлейф от дисплея перегнут через выемку и вставлен в плату дисплея. Батарейка приклеена той же лентой к внутренней поверхности второй половины корпуса,

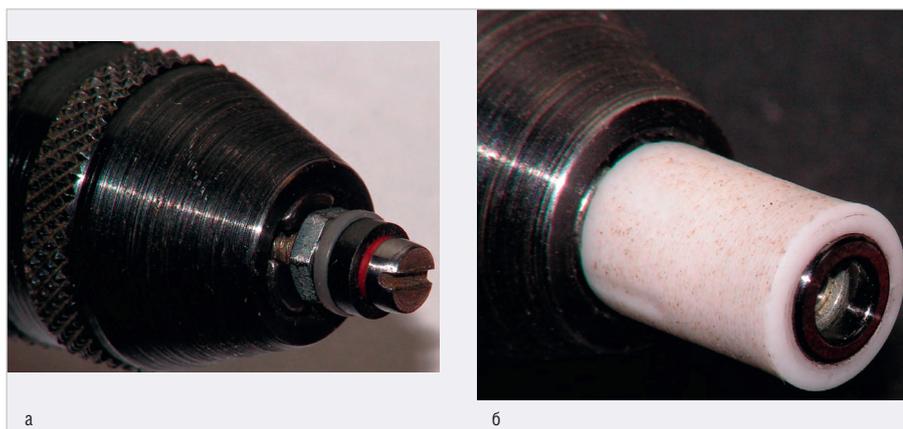


Рис. 10. Скругление кромок ферритового кольца: а – внешних, б – внутренних

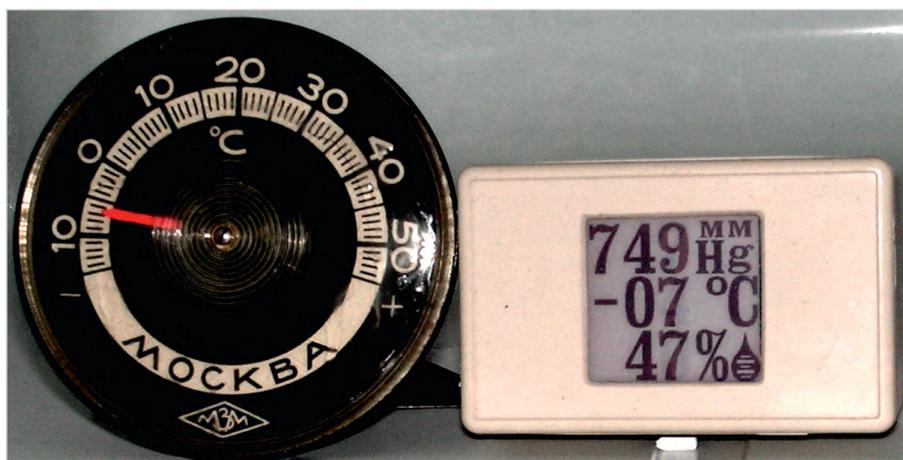


Рис. 13. Сравнение показаний уличного термометра и прибора, помещённых в морозилку холодильника

а к ней – плата стабилизатора. Для доступа воздуха к устройству в этой половине корпуса просверлены 10 отверстий диаметром 4 мм.

Технология скругления острых кромок ферритового кольца очень проста. Для скругления внешних кромок кольцо зажимается винтом с гайкой и двумя пластиковыми шайбами. Винт вставляется в патрон дрели и, при её вращении острые кромки легко снимаются мелкой наждачной шкуркой в течение нескольких секунд (рис. 10а). Для скругления внутренних кромок кольцо с натягом вставляется во втулку (например, из фторопласта), которая также зажимается в патроне дрели (рис. 10б). Результат, как говорят, налицо (рис. 11). Конечно, не все кольца имеют дефекты, как на рис. 11а, однако автор всё же рекомендует стачивать острые кромки. Всей этой процедуры можно избежать, если использовать кольцо с уже скруглёнными кромками (рис. 7в).

После подключения кабеля питания от батарейки к плате МК прибор сразу начинает работать, и остаётся только защёлкнуть крышку (рис. 12).

Для проверки работоспособности прибора при отрицательных температурах он вместе с уличным термометром был помещён в морозилку холодильника примерно на 25 минут. Хотя показания дисплея при -6°C (рис. 13) выглядят несколько тусклее, чем при комнатной температуре (рис. 12), они вполне читаемы. Здесь следует заметить, что основное назначение прибора – это работа в комнатных условиях, а не для измерения параметров в морозилке холодильника.

Заключение

Применение E-ink дисплея с разрешением 200×200 пикселей совместно с малогабаритным микропотребляющим МК EFM8SB20F16 и готовым модулем с VME280 позволило сконструировать недорогой прибор небольшого размера, измеряющий атмосферное давление, температуру и влажность. По сравнению с подобным прибором с ЖКИ [1] описанный в статье прибор может работать от одной литиевой батарейки ER14335 до 10 лет и, кроме того, визуализация его показаний существенно улучшена за

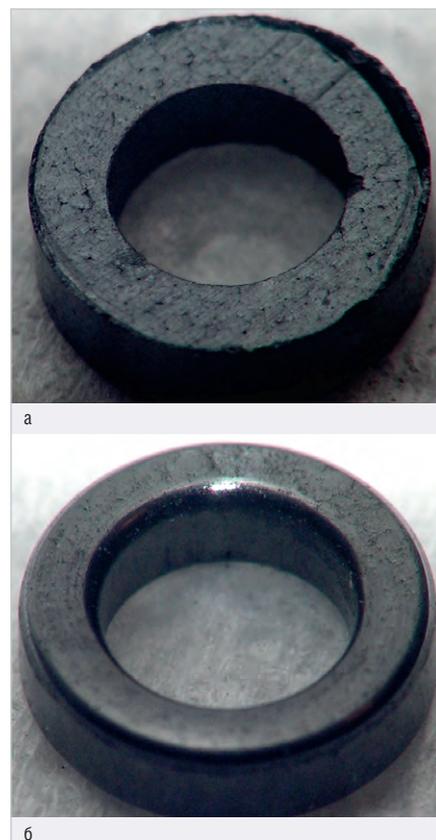


Рис. 11. Внешний вид ферритового кольца $K4 \times 2,5 \times 1,7$: а – необработанного, б – обработанного

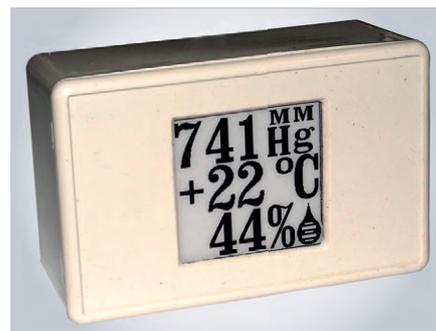


Рис. 12. Общий вид работающего прибора в сборе

счёт практически типографского качества изображения символов.

Литература

1. Кузьминов А. Барометр-гигрометр-термометр с батарейным питанием на базе MEMS-датчика VME280, микроконтроллера EFM8SB10F8 и ЖКИ-модуля H1313 // Современная электроника. 2022. № 7, 8.
2. Кузьминов А.Ю. Связь между компьютером и микроконтроллером. Современные аппаратные и программные средства. М.: Перо, 2018.
3. Кузьминов А. Программирование микроконтроллеров EFM8 с помощью встроенного загрузчика программ // Радио. 2018. № 12.



Схемотехническое моделирование в Delta Design SimOne.

Часть 2

Андрей Смирнов, Алексей Гимеин (компания ЭРЕМЕКС)

Мы начали рассказывать о возможностях моделирования электрических цепей в САПР Delta Design в журнале «Современная электроника», № 9 за 2021 год. Были рассмотрены расчёт статического режима, расчёт переходных процессов и построение частотных характеристик. Также был показан анализ устойчивости проектируемой схемы.

В данном материале будут рассмотрены конструктор фильтров, анализ чувствительности, возможности оптимизации схемы, анализ методом Монте-Карло. Также покажем процесс сопоставления SPICE-модели к компоненту.

Конструктор фильтров

В Delta Design SimOne реализована возможность создания фильтров частот.

В SimOne существует два способа представления созданного фильтра: первый – это создание компонента-двухполосника с УГО и назначенной SPICE-моделью в виде подсхемы, второй – это генерация принципиальной схе-

мы, реализующей фильтр с заданными характеристиками, в редакторе схем для дальнейшего представления созданного фильтра как функциональной группы.

Результат представления создаваемого фильтра зависит от способа вызова Конструктора фильтров.

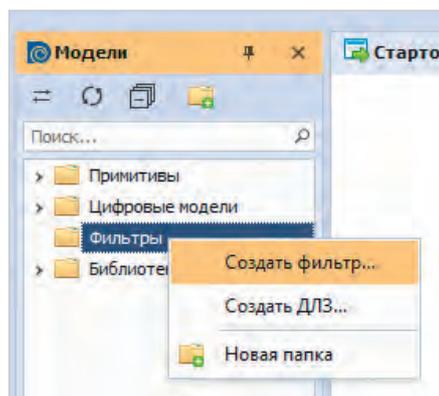


Рис. 1. Создание фильтра в панели *Модели*

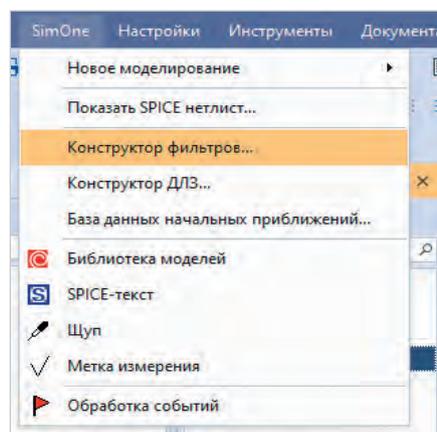


Рис. 2. Команда вызова окна *Конструктора фильтров*

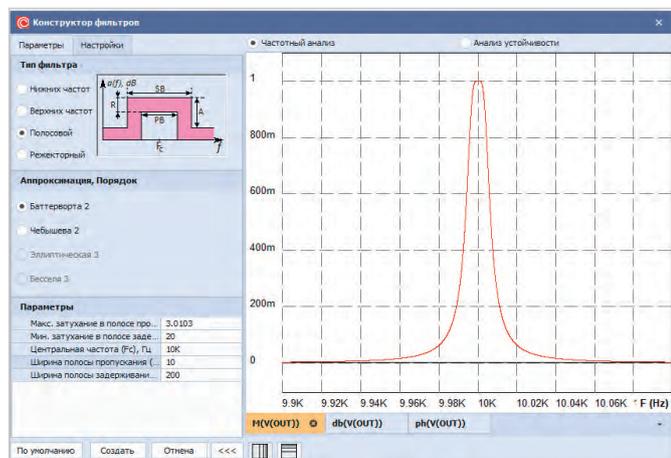


Рис. 3. Окно *Конструктор фильтров*, вкладка *Параметры*

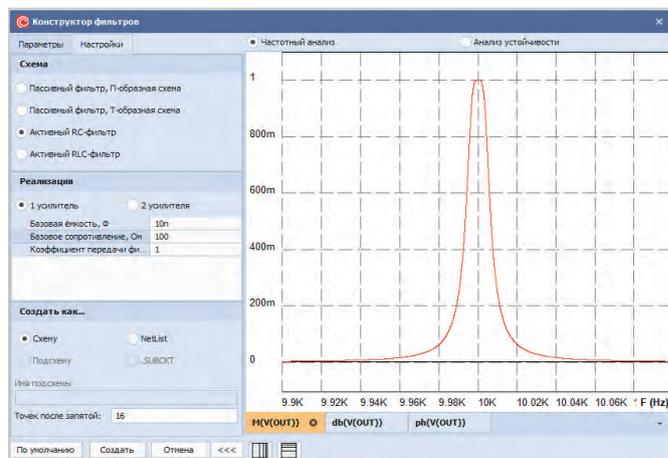


Рис. 4. Окно *Конструктор фильтров*, вкладка *Настройки*

Если создание компонента-двухполосника выполнить через панель **Модели**, в которой имеется папка **Фильтры**, то результат будет ограничен представлением в виде компонента-двухполосника с присоединённой SPICE-моделью, представленной в виде подсхемы. Для создания нового фильтра с требуемыми параметрами следует раскрыть контекстное меню папки **Фильтры** и выбрать команду **Создать фильтр...** (рис. 1).

При этом будет открыто окно Конструктора фильтров, которое предназначено для определения параметров создаваемого фильтра. Создание фильтра завершается нажатием на кнопку **Создать**.

Если выполнить команду меню *SimOne* → *Конструктор фильтров* (рис. 2), то возможно создать фильтр в виде функциональной группы с принципиальной схемой, размещённой на отдельном листе текущей схемы. В качестве примера работы с **Конструктором фильтров** подробно рассмотрим этот способ.

Рассмотрим создание полосового фильтра со следующими характеристиками: центральной частотой полосы пропускания 10 кГц и шириной полосы пропускания 10 Гц, шириной полосы задерживания 200 Гц, минимальным затуханием на границе полосы пропускания 3 дБ, максимальным затуханием на границе полосы задерживания

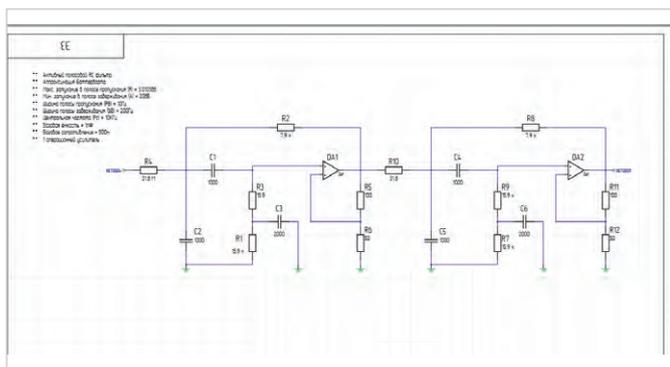


Рис. 5. Принципиальная схема полосового фильтра

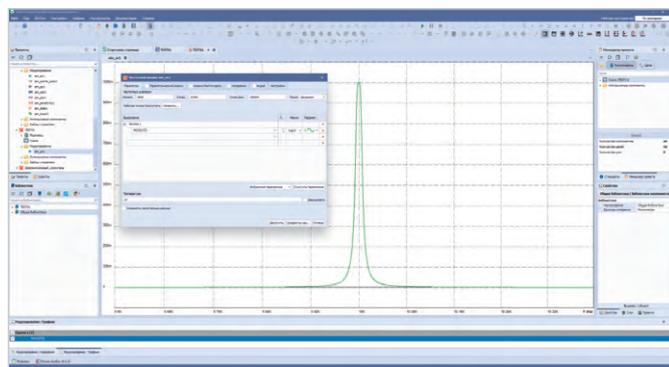


Рис. 6. АЧХ фильтра

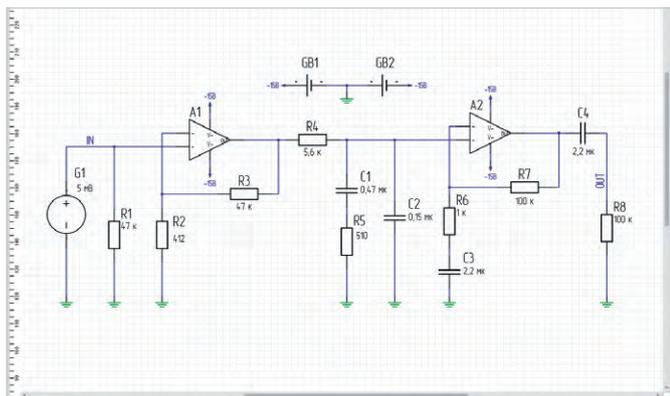


Рис. 7. Электрическая принципиальная схема усилителя

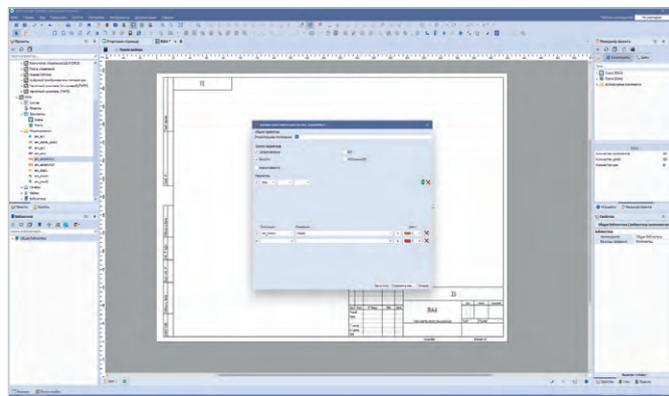


Рис. 8. Настройки расчёта чувствительности схемы

20 дБ. Находясь на открытой принципиальной схеме в главном меню, нужно выбрать команду *SimOne* → *Конструктор фильтров*.

Откроется окно **Конструктора фильтров** (рис. 3). Конструктор фильтров имеет две вкладки: *Параметры* и *Настройки*.

На вкладке *Параметры* следует выбрать тип фильтра – **Полосовой**, указать аппроксимацию полинома и порядок **Баттерворта 2** и ввести параметры фильтра: центральную частоту, ширины полос пропускания и задерживания, значения минимального затухания на границе полосы задерживания и максимального затухания на границе полосы пропускания. На графике увидим рассчитанные частотные характеристики фильтра. Для просмотра доступны амплитудно-частотная характеристика в линейном масштабе частот, а также логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика (ЛАФЧХ, диаграмма Боде). Помимо просмотра частотных характеристик фильтра, можно провести расчёт собственных частот или отобразить годограф Михайлова, чтобы оценить характеристику устойчивости фильтра на этапе создания.

Завершим настройку фильтра, выберем **Активный RC-фильтр** (рис. 4).

Для этого на вкладке **Настройки** определим тип схемы фильтра и её характеристики. В области **Создать как...** необходимо отметить значение **Схему**. После нажатия на кнопку **Создать** будет создана схема фильтра в виде функциональной группы принципиальной схемы (рис. 5). Пассивные компоненты принципиальной схемы фильтра будут иметь рассчитанные значения номинальных величин. Для активных фильтров применяется модель операционного усилителя, близкая по характеристике к идеальной.

Теперь для контроля выполним верификацию полученной схемы и построим её частотную характеристику в диапазоне частот 9,6–10,4 кГц (рис. 6).

При помощи средств измерения графиков можно убедиться, что АФЧХ фильтра соответствует целевым требованиям.

Более подробно процесс создания фильтров был рассмотрен на вебинаре [1].

Анализ чувствительности

При помощи анализа чувствительности определяются те параметры электрической цепи, которые оказывают наибольшее влияние на целевые характеристики проектируемого устройства.

В дальнейшем после анализа чувствительности обычно проводят оптимизацию схемы, позволяя существенно ограничить круг варьируемых параметров электрической цепи, что повышает скорость и эффективность оптимизации. Также анализ чувствительности позволяет идентифицировать компоненты электрической цепи, для которых статистическое отклонение параметров от номинальных величин может оказать существенное влияние на её целевые характеристики. Таким образом, его результаты используются в анализе Монте-Карло / худшего случая.

Рассмотрим анализ чувствительности на примере усилителя, моделирование которого описано в первой части этой статьи [2] (рис. 7).

Выполнять расчёт чувствительности измерений в Delta Design с помощью имитатора SimOne нужно по следующему алгоритму.

1. В редакторе схем выполнить команду **SimOne** → **Новое моделирование** → **Анализ чувствительности**.
2. Выбрать компоненты и указать их параметры, чувствительность (рис. 8) к изменению которых требуется рассчитать.

С помощью механизма измерений следует выбрать интересующие харак-

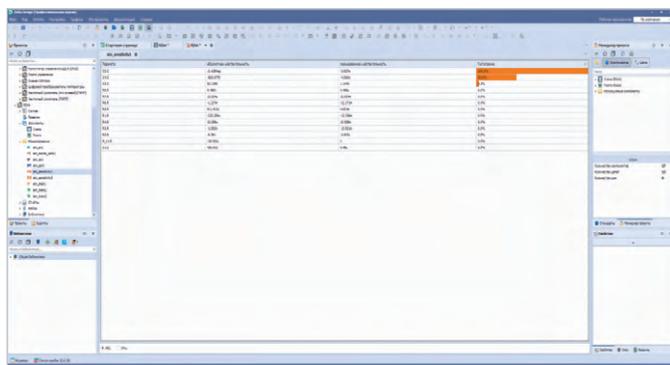


Рис. 9. Абсолютные значения чувствительности

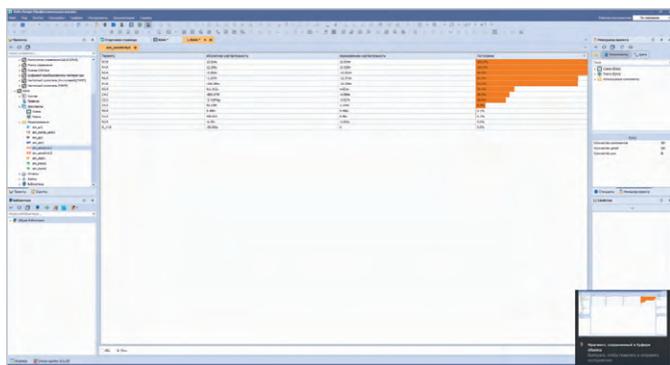


Рис. 10. Относительные значения чувствительности

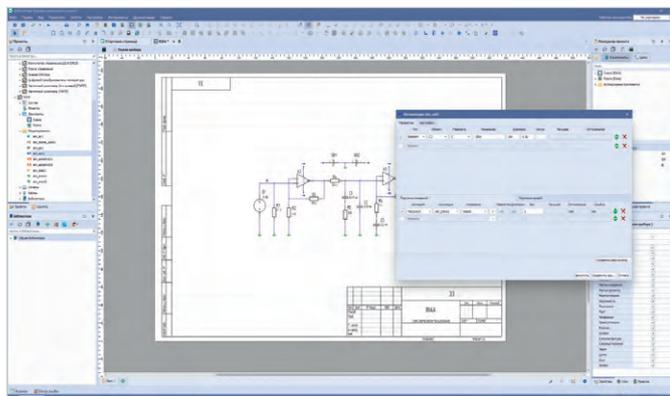


Рис. 11. Настройка параметров анализа оптимизации электрической цепи

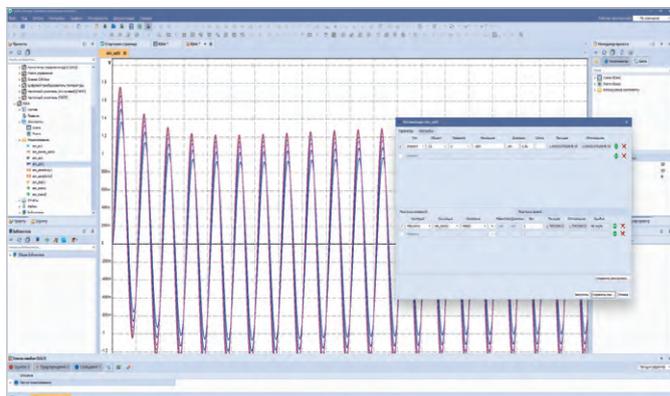


Рис. 12. Графики расчёта электрической цепи с результатами оптимизации

теристики схемы, влияние на которые необходимо оценивать.

После запуска расчёта чувствительности SimOne сначала запускает соответствующие виды расчёта электрической цепи при номинальных значениях параметров компонентов, а затем последовательно запускает расчёты при отклонении параметра каждого из них от своего номинального значения на заданное значение. После проведённого расчёта программа выведет численные значения чувствительностей и гистограммы их относительных значений (рис. 9, 10).

Оптимизация схемы

SimOne даёт возможность оптимизировать схемы. В ходе оптимизации производится настройка характеристик схем на заданные значения с помощью изменения параметров её компонентов. Также оптимизация используется для нахождения таких значений параметров компонентов, при которых характеристики схемы достигают максимальных или минимальных значений. Например, максимальный коэффициент усиления на заданной частоте, минимальное значение полосы пропускания фильтра и т.п.

Для проведения оптимизации схем в SimOne:

- указывают компоненты электрической цепи, которые можно изменять, и пределы изменения их параметров;
- в режиме **Подгонка измерений** (рис. 11): с помощью механизма **Измерений** выбираются интересные характеристики электрической цепи, которые необходимо улучшить или контролировать;
- в режиме **Подгонка кривой** указывают текстовый файл, содержащий координаты точек графика, и выражение, значение которого будут приближать к значениям указанного графика;
- выбирают алгоритм проведения оптимизации.

В ходе оптимизации Delta Design SimOne в соответствии с выбранным алгоритмом будет упорядоченным образом менять указанные параметры компонентов схемы, чтобы максимально удовлетворить выбранным критериям оптимизации схемы: привести к максимуму или к минимуму заданные характеристики либо ограничить их в указанном диапазоне, в зависимости от того, что будет выбрано пользователем. При этом создаётся вкладка с названием симуляции, окно настройки пара-

метров оптимизации остаётся открытым, а в поля **Текущее**, **Оптимальное** и **Ошибка** выводятся результаты оптимизации (рис. 12).

Анализ Монте-Карло

Анализ Монте-Карло позволяет производить анализ электрической цепи с учётом статистического отклонения параметров её компонентов от номинальных величин (рис. 13). Этими параметрами могут быть:

- параметр отдельного элемента схемы;
- параметр модели компонентов;
- параметр сигнала источников;
- глобальный параметр (параметр, который может входить в выражения, используемые для задания параметров элементов схемы, моделей, сигналов).

Результатами расчётов при всех типах анализа являются полученные семейства графиков схемы, а также гистограммы распределения исследуемых характеристик (рис. 14).

Назначение SPICE-модели компоненту

Delta Design SimOne содержит встроенную библиотеку SPICE-моделей. Но часто возникает необходимость под-

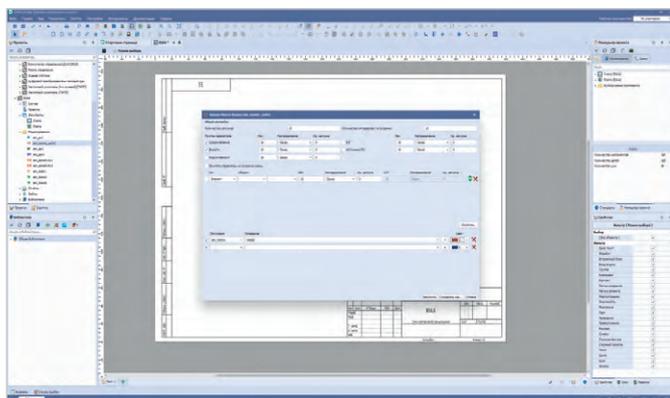


Рис. 13. Окно настройки расчётов методом Монте-Карло

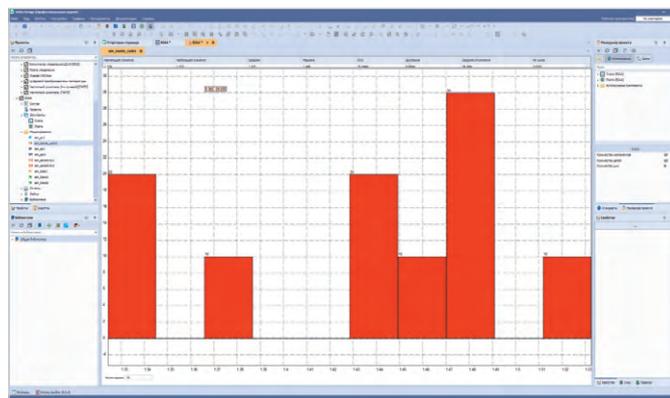


Рис. 14. Гистограмма результатов расчётов методом Монте-Карло

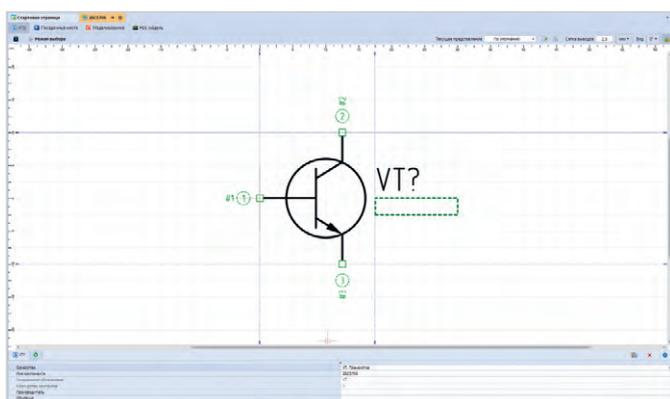


Рис. 15. Создание компонента (биполярного p-n-p транзистора)

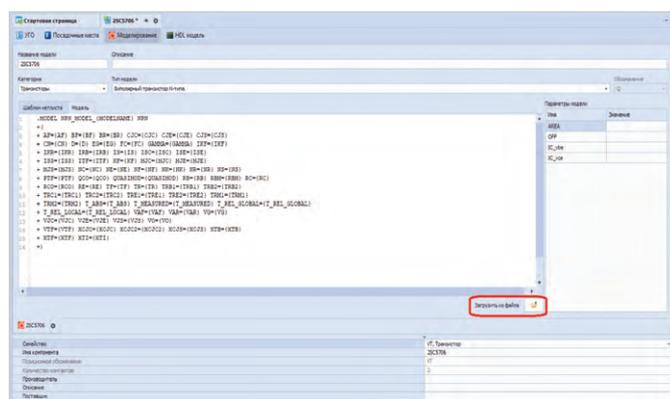


Рис. 16. Создание SPICE-модели транзистора по умолчанию

ключения модели к существующему или вновь созданному библиотечному компоненту. Покажем процедуру назначения SPICE-модели компоненту на примере.

1. В библиотеке создадим новый компонент – p-n-p транзистор (рис. 15).
2. Во вкладке компонента **Моделирование** выбираем **Добавить SPICE-модель в компонент**, в поле **Категория** выбираем **Транзисторы**, в поле **Тип модели** – **Биполярный транзистор N-типа**. По умолчанию создается SPICE-модель «примитивного» транзистора (рис. 16).
3. Можно загрузить модель компонента из внешнего файла. Модель может быть создана пользователем или получена с сайта производителя. Для этого следует нажать кнопку **Загрузить из файла** и выбрать файл модели.
4. Необходимо выводам УГО назначить выводы модели (рис. 17).

В результате получаем компонент библиотеки с подключённой SPICE-моделью.

Заключение

Рассмотренные в данной и предыдущей статье методы и инструменты

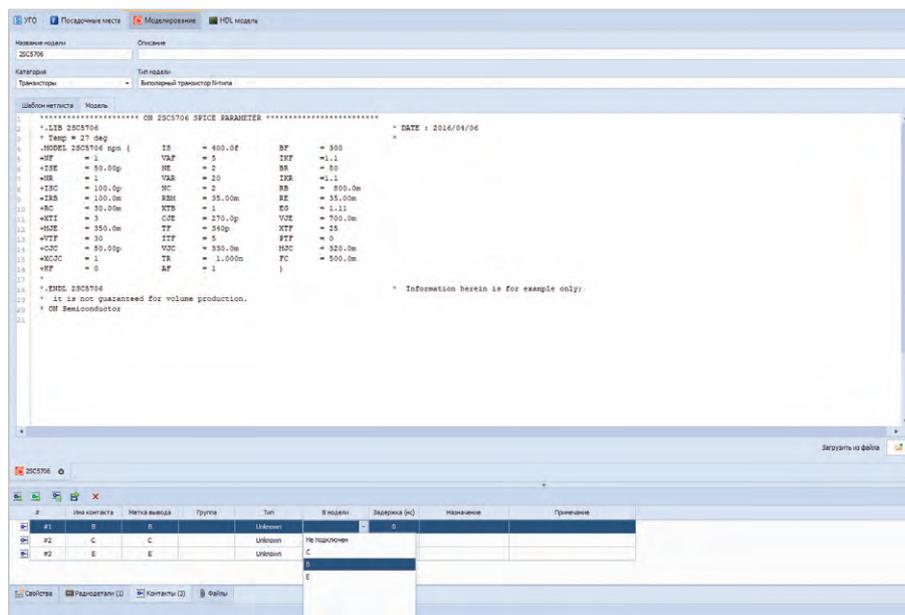


Рис. 17. Назначение выводам УГО выводов модели

схемотехнического моделирования Delta Design SimOne предоставляют инженерам-схемотехникам широкие возможности оценки характеристик и параметров электрической цепи, обеспечивают возможности оптимизации, что позволяет сократить сроки проектирования и снизить затраты на натурное моделирование электронных устройств.

Литература

1. Видеозапись вебинара компании «Эрмекс». Синтез и моделирование фильтров в Delta Design SimOne // URL: <https://youtu.be/wB6AeY5hCTA>, режим доступа свободный.
2. Смирнов А., Гимзин А. Схемотехническое моделирование в Delta Design SimOne // Современная электроника. 2021. № 9. С. 34–37.

Крупнейшие в мире перспективные электронные отечественные проекты с ёмкостью мирового рынка в триллионы долларов

Александр Гордеев, Виктор Войтович, Геннадий Святец

Статья посвящена раскрытию научно-технического потенциала России в области терагерцовых технологий на рынке услуг свыше триллиона долларов и предназначена вниманию Сбербанка, Газпромбанка, Росатома, Роскосмоса, Ростеха и других корпораций.

Минпромторг (МПТ) подготовил обновлённую концепцию развития отечественной электроники до 2030 г. [1].

Концепция направлена на резкое снижение зависимости электронной отрасли от иностранных технологий в области микро- и наноэлектроники, а также ключевых материалов, комплектующих, в том числе цифровых систем, на покрытие дефицита кадрового обеспечения и, что исключительно важно, на создание практических предпосылок для восстановления отечественного электронного машиностроения.

Концепция – это руководящая системная идея, являющаяся фундаментом перспективной Программы развития.

В концепции МПТ есть два слабых места:

- 1) кредитовый оборот,
- 2) стратегия.

Финансовая помощь государства в расширении производства, а мы считаем, что она должна быть в текущих условиях в виде субсидий (не путать с кредитами), как это делал Советский Союз, абсолютно необходима, в том числе не только для флагманских предприятий – «Микрона» или «Ангстрема», – но и для таких частных компаний, как, допустим, АО «ГРУППА КРЕМНИЙ ЭЛ», АО «ВЗПП-С» или АО «Орбита» и других, где ни одна копейка не уйдёт «налево» и где выпускают не менее важную продукцию: от оптоэлектроники силовой ЭКБ до высокочастотных микроконтроллеров или ПЛИС.

Что касается «Микрона» или «Ангстрема», то, на наш взгляд, государство недооценивает их стратегическую роль в части развития нанодифференцированных техно-

логий для грядущей интеллектуальной цифровой экономики. Субсидирование даже на уровне 10% от капиталовложений в «Северный поток» привело бы к резкому и качественному изменению положения данных компаний как на внутреннем, так и на внешнем рынках.

В части Стратегии («искусство побеждать») – ответ очевиден. В данной статье изложены стратегические направления в области терагерцовой энергетики.

Стратегия развития отечественной электроники от 17.01.2020 г. – это уровень 2019 года, особенно на фоне анонсирования компанией Zyvex Labs системы электронной литографии ZyvexLitho1 с разрешением 768 пикометров (0,768 нм). Подчеркнём, что постоянная кристаллической решётки арсенида галлия $\approx 0,56$ нанометров, а, к примеру, карбида кремния – от 0,3 (4H-SiC) до 0,43 нанометра в зависимости от политипа.

Найти $\approx \$50$ млрд ежегодно до 2025 г. для того, чтобы догнать Intel, Samsung, IBM, государству не по силам. Следовательно, чтобы не остаться «электронной Полинезией», нужно, как однажды выразился Президент РФ, «включать мозги» и выстраивать Программы развития отечественной электроники, опережающей по ключевым сегментам мировой уровень, в таких секторах, как:

- сверхэнергосплотная (до 200 кВт/дм³) силовая электроника (ВИП для серверов);
- бесшумная мощная стратегическая СВЧ-электроника в «чёрном» диапазоне длин волн (1...3 мм);
- терагерцовая электроника;
- квантовые мультикубитные компьютеры;

- 6G, 7G;
- комнатная сверхпроводимость, а также:
- тера- и петагерцовая цифра и логика (петагерцовые процессоры с встроенным ОЗУ);
- «черноволновые» (терагерцовые) системы распознавания (взамен неоднозначного направления нейросетей);
- субнано- и атомно-орбитальная спин-электроника;
- квантовая терагерцовая и петагерцовая медицина;
- твердовакуумная электроника;
- фотонно-фононные цифровые системы и логика;
- космическая магнетроника и энергия вакуума;
- изотопная цифра, в том числе доменно-изотопная Flash-технология;
- экстремальная электроника, в том числе с рабочими температурами чипов 300...800°C.

В этих направлениях Россия в ближайшие 3–5 лет абсолютно точно может захватить лидирующие позиции при условии господдержки.

Для планирования, организации и реализации таких программ нужна целевая правительственная структура – аналог МЭП СССР, – если мы хотим создавать терагерцовую экономику будущего.

1. Терагерцовая биосреда обитания человека

Высший разум сотворил человека в виде «твердовакуумного» тела, являющегося, по существу, терагерцовым генератором электромагнитного излучения [2] (тепловое излучение – это электромагнитное излучение).

До 50% излучения человеческого тела приходится на так называемый «черноволновый» диапазон длин волн с $\lambda = 5...15$ мкм ($6 \times 10^{13}...1,8 \times 10^{15}$ Гц). Необходимо отметить, что тело человека излучает не только терагерцовые частоты

* Объёмная доля атомных частиц по Резерфорду – Бору (электронов, нуклонов) в любом удельном объёме составляет не более $10^{-10}\%$ от объёма. В этой связи корпускулярная модель атома, вероятно, изжила себя, и квантовую модель неопределённости Гейзенберга, видимо, придётся доработать с объёмно-энергетической точки зрения или качественно и количественно детализировать физический вакуум по Фейнману.



* Энергия ядра Земли – это продукт космоса (энергии галактического вакуума), поскольку солнечная энергия ($\approx 1350 \text{ Вт/м}^2$) ни по каким законам физики не предотвратит угасание энергии так называемого «расплавленного железного» ядра (расплав железа – не ферро- и даже не диамагнетик).

Рис. 1. Схема аккумуляции терагерцовой энергетики в биосреде обитания человека

ты ($3 \times 10^{11} \dots 3 \times 10^{14} \text{ Гц}$), но и даже СВЧ-частоты вплоть до С-диапазона, хотя мощность такого излучения ничтожно мала.

В целом мощность излучения человеческого тела на принципах ИК-приёма, изложенных в публикации [2], способна зажечь электрическую светодиодную лампочку или LED мощностью до 20 Вт и выше [2, 3].

Способность человеческой энергетики поглощать волны на частоте собственного излучения 5...15 мкм («черноволновое» излучение) – это феноменальное естественное явление, являющееся источником жизни не только человека, но и практически всех существ на планете. Понимание физического смысла терагерцовой энергетики человека приведёт к рез-

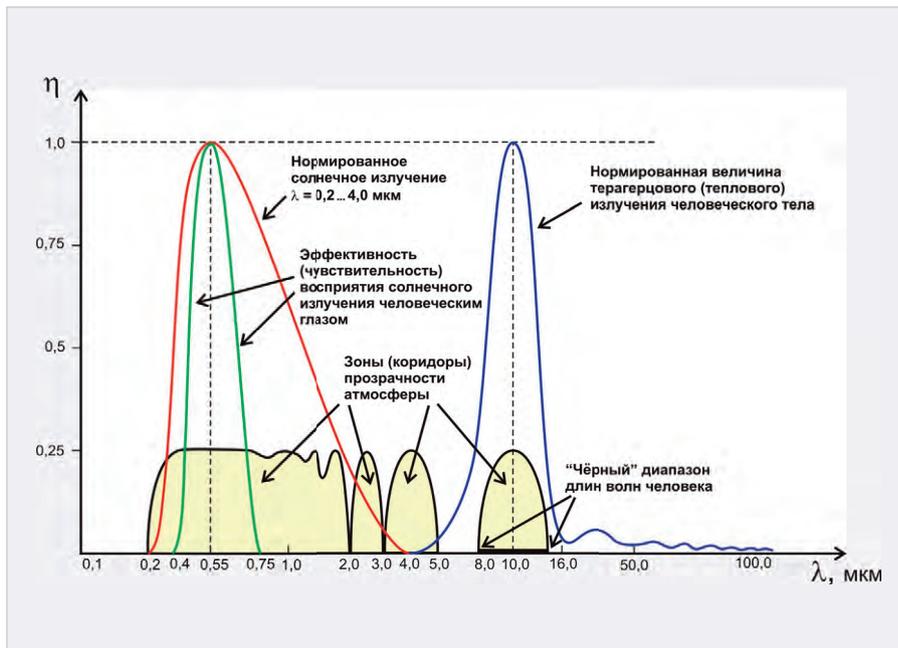


Рис. 2. Частотная зависимость нормированной мощности солнечного и человеческого электромагнитных излучений

кому изменению качества его жизни, как, собственно, понимание естественной терагерцовой биосреды человека и, конечно же, искусственных терагерцовых технологических инструментов, чему посвящена данная публикация.

Биосреда

Естественная энергетика биосреды – это энергия Солнца (начальная петагерцовая и примыкающая к ней терагерцовая) в пределах частот излучения от $1,5 \times 10^{15}$ до $(5 \dots 6) \times 10^{13} \text{ Гц}$ (0,2...4 мкм) и терагерцовая энергетика планеты Земля (атмосфера, водная и земная поверхность, фауна, живые организмы). Пустыня Сахара, лёд на Эвересте или в Антарктиде, южноамериканская

сельва или поверхность океанов – это также естественные терагерцовые генераторы для обеспечения жизни на Земле. То есть природа – это терагерцовый источник жизни для всего живого.

На рис. 1 упрощённо представлена схема поддержания энергетики биосреды обитания человека.

Сложно согласиться, что «железный гироскоп» является источником магнитного поля Земли, как и сложно согласиться с тем, что ядро Земли – это «железка».

При удивительной энергоструктуре человек – биосреда – Солнце **необходимо отметить, что божественная энергия Солнца никоим образом не накладывается на энергетику самого человека и является соприкасающейся**, т.е. Солнце излучает энергоррадиацию на Землю через атмосферный фильтр в диапазоне частот на длинах волн 0,2...4 мкм, а начальное терагерцовое излучение человека начинается с $\approx 5 \text{ мкм}$ (начальная область «черноволнового» излучения человека).

Иными словами, щелевой диапазон частот с $\lambda = 4 \dots 5 \text{ мкм}$ в будущем идеален для 9G (6G – 240...320 ГГц; 7G – 5...7,5 ТГц; 8G – 25...40 ТГц, т.е. в «окнах прозрачности» атмосферы), так что впереди непочатый край работы.

На рис. 2 показана частотная зависимость мощности излучения Солнца и человеческого тела из публикации [2], а на рис. 3, 4 – частотный спектр потолочной мощности излучения Солнца и человеческого тела [2].

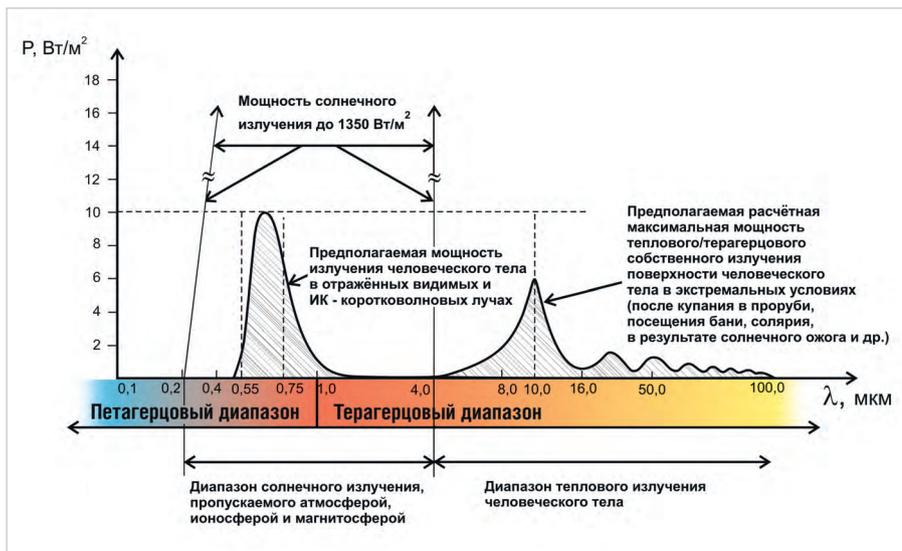


Рис. 3. Максимальная мощность излучения человеческого тела в пета- и терадиапазонах

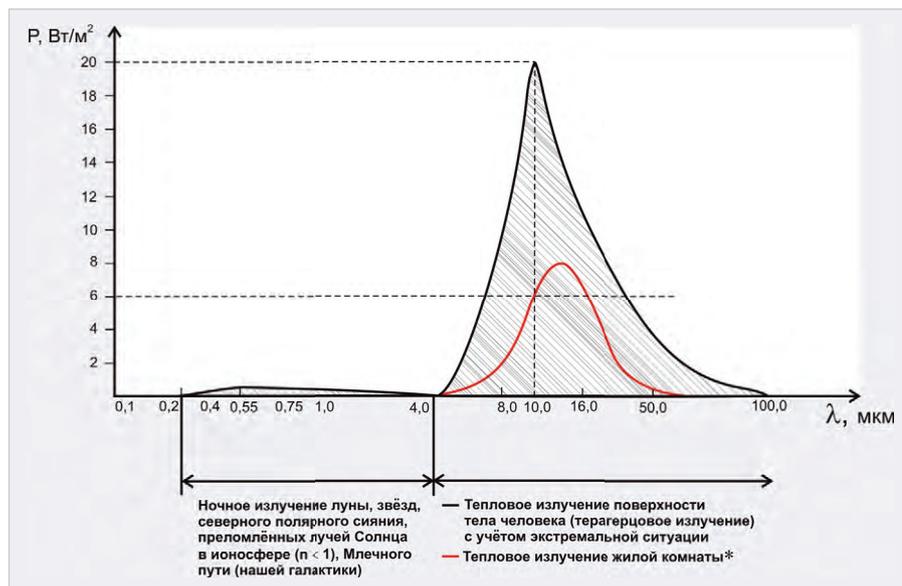


Рис. 4. Мощности излучения ночного космического пространства и тепловое излучение человеческого тела и жилой комнаты

2. Наличие в России фундаментальных теоретических наработок в области генерации усиления, приёма и транспорта терагерцовой энергии в твёрдых телах, уникальных новых материалов, прикладных технологий

Шкала длин волн в терагерцовом диапазоне находится в пределах $\lambda = 1 \text{ мм} \dots 1 \text{ мкм}$, или это частоты $3 \times 10^{11} \dots 3 \times 10^{14} \text{ Гц}$.

Предельные частоты генерации усиления и приёма на полупроводниковых приборах (pHEMT, MEMT, SBD, HBT) ограничены потолком в 2 ТГц.

С учётом «окон прозрачности» в атмосфере в дальнем («чёрном») СВЧ-диапазоне или субтерагерцовом диапазоне 240...320 ТГц и далее в диапазонах частот 5...7,5; 25...40; 60...75 ТГц совершенно очевидно, что реализовать связь, навигацию, локацию в тропосфере на частотах выше 320 ТГц (λ чуть меньше 1 мм) невозможно с позиции цифровой функции приёма/передачи, хотя это не отменяет некоторые другие терагерцовые направления, например, искривление энергии атмосферы («кривое» энергосеркало), или, допустим, на частотах 0,6...5 ТГц можно активировать (ионизировать) молекулу бензольной группы или пропана, или в функции РЭБ и др. Но в будущей терагерцовой цифровой экономике ведущие позиции будет занимать широкополосный терагерцовый Интернет. И как итог – применение дрейфового транспорта энергии на носителях заряда в полупроводниках

ограничено (например, при рабочих напряжениях 1...3 В) значением $\approx 2 \text{ ТГц}$ (борированный дырочный алмаз), а на примере практически самого быстрого электронного полупроводника – InP (HBT) – потолок рабочих частот ограничен 1 ТГц. Следовательно, необходимы другие решения транспорта мощной электромагнитной энергии в твёрдых телах в терагерцовом диапазоне. Такие фундаментальные решения в отечественной науке и, главное, в электронном отечественном материаловедении существуют. На сегодня в РФ их, по крайней мере, четыре, а именно:

- «комнатная» сверхпроводимость в наногетероструктурах $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$ (спин-электронная жидкость) (Si/3C-SiC);
- генерация с мелких ионизированных квантово-ямных примесных уровней в кремнии;
- взаимодействие оптических электромагнитных волн с Бозе – электронной жидкостью в наногетероструктурах $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$, (Si/3C-SiC);
- электронно-фононная поляроидная релятивистская проводимость в поляризованных диэлектриках ($i\text{-GaAs}_{Si}$, тринитрид AlN, Ga_2O_3 и др.).

С учётом физически и практических доказанных в имеющихся в России уникальных материалах и технологиях таких электромагнитных терагерцовых функций, как усиление [5, 6], генерация [5, 6, 7, 8], а также возможности создания оптических, точнее, фотонно-фононных терагерцовых компьютеров [8], сверхэнергосплотных СВЧ ВИП, объёмно-акустической фильтрации частот (ОАФ взамен низкочастот-

ных ПАВ), Россия уже «вчера» могла бы приступить к созданию терагерцовой интеллектуальной цифровой экономики, включая 7G.

3. Терагерцовые технологии для улучшения качества жизни человека

Впервые детектирование терагерцового излучения тела в «черноволновом» диапазоне было выполнено 100 лет назад известным английским учёным Г.Х. Харди, иностранным членом-корреспондентом РАН (1924 г.) и иностранным почётным членом АН СССР (1934 г.). Многочисленные исследования по изучению электромагнитного излучения человеческого тела были проведены членом-корреспондентом АН СССР и академиком РАН Ю.В. Гуляевым и д.ф.-м.н. Э.Э. Годиком [3].

С начала 70-х годов терагерцовые технологии резко продвинулись вперёд (ИК-фотоприёмники, генераторы излучения – лазеры, диоды на $A_{III}B_V$).

Пик ажиотажа по поводу терагерцовых технологий пришёлся на 2003–2004 гг. и, после спада в 2010 году, резко усилился в текущий период, поскольку технологии генерации и приёма терагерцовой энергии попали в число ультрабыстроразвивающихся направлений в мире, которые охватывают широкий спектр областей применения: от полимеров, фармацевтики до нефтегазового комплекса, квантовой медицины, цифровой электроники и телекоммуникаций (рис. 5).

На мировых терагерцовых технологических площадках ведутся разработки более чем 100 высокотехнологичными фирмами таких стран, как США, Китай, Германия, Великобритания, Тайвань, Япония, Франция, Бельгия и др. Разработки и исследования проводятся и в РФ, в частности, по таким направлениям, как ИК-технологии, вакуумные генераторы (гиротроны, ЛБВ/ЛОВ, твердотельные полупроводниковые приборы (pHEMT, SBD, ЛПД, HBT)), нанометровые логические цифровые системы, квантовые компьютеры, зарождаются новые направления, как, например, изотопная память, терагерцовая медицина и др. (рис. 6).

В данной публикации далее будут отражены наиболее востребованные на внутреннем и внешнем рынках терагерцовые технологии и продукты, где у России есть неплохие шансы на высокий уровень доминирования на мировом рынке с объёмами, превышаю-

щими текущий годовой уровень ВВП (в долларовом исчислении), к 2035 году.

С учётом опыта фундаментальных исследований, новых альтернативных материалов, существующего технологического задела реальные практические перспективные направления следующие:

- 1) системы распознавания образов (взамен бесперспективных нейросетей),
- 2) терагерцовая медицина (квантовая медицина),
- 3) терагерцовые ДВС автопрома будущего,
- 4) терагерцовые ОЗУ и микропроцессоры,
- 5) 6G,
- 6) 7G.

Необходимо подчеркнуть, что предложения не носят концептуальный характер, а, скорее, являются стратегическими, поскольку направлены на национальную монополизацию отдельных терагерцовых сегментов будущего мирового рынка с доходами от десятков, сотен и до триллионов долларов.

4. Ключевые терагерцовые проекты с колоссальным потенциалом мирового рынка

Системы распознавания образов

Любые биообъекты излучают тепловую, а точнее, электромагнитную энергию. Электромагнитному излучению человека посвящено большое количество работ, из которых следует выделить работу [3] академика РАН Ю.В. Гуляева (ИРЭ РАН) и д.ф.-м.н. Э.Э. Годика.

Как и в разделе 1, подчеркнём, что электромагнитное излучение человека занимает практически весь терагерцовый и почти весь СВЧ-диапазон длин волн, хотя в СВЧ-диапазоне излучение сверхмало. Как уже подчёркивалось, практически половина мощности приходится на «черноволновой» диапазон излучения человеческого тела.

Экспериментальный график черноволнового излучения человеческого тела представлен на рис. 7.

Спектр черноволнового излучения человеческого тела для каждого человека исключительно индивидуален и специфичен, что зависит от генетики, условий жизни, принимаемой пищи, среды обитания и других факторов. По сути, излучение человека – это «черноволновые терагерцовые отпечатки», по которым можно безошибочно распознавать индивидуальную личность.

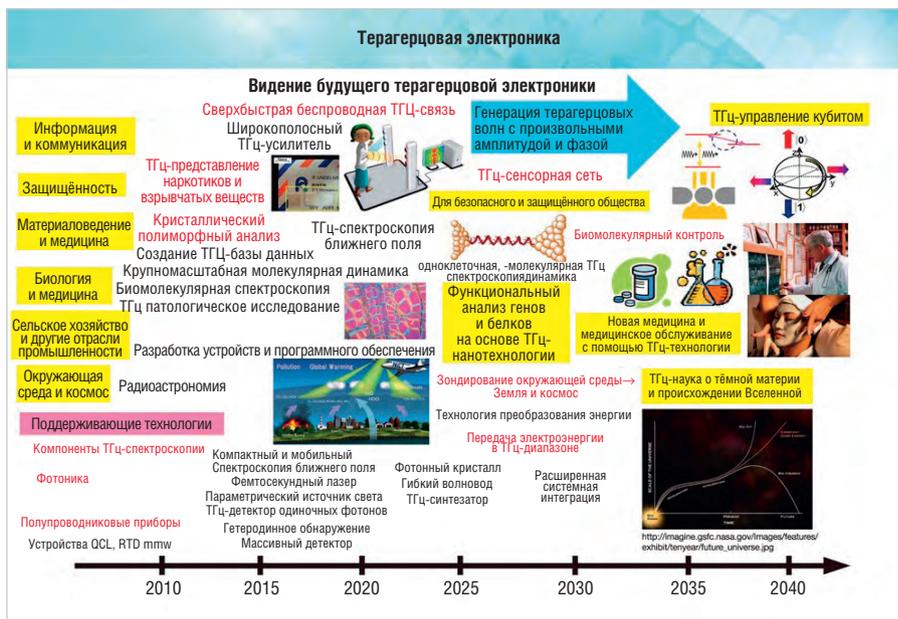


Рис. 5. Видение будущего терагерцовой электроники [17]



Рис. 6. Глобальный рынок терагерцовых технологий [18]

Излучение человека в «черноволновом» диапазоне – достаточно мощное, чтобы на разумных расстояниях с нулевой погрешностью определить и выделить личность человека. Другими словами, при наличии высокочувствительных детекторов терагерцового излучения в диапазоне 25...60 ТГц открывается абсолютно новая технология идентификации личности с огромным потенциалом на рынке.

Судите сами, какие возможности и перспективы появляются с созданием новой «черноволновой» системы идентификации. К примеру:

- безлюдный банкинг и реформирование всей банковской сети («домашний» компьютерный банкинг);
- гиперскоростной субсекундный SWIFT;
- безбилетная транспортная логистика;
- экспресс-диагностика физического, психологического состояния человека через индивидуальный гаджет;
- в перспективе – исключение понятия погранзастав, абсолютная прозрачность границ (для собственных

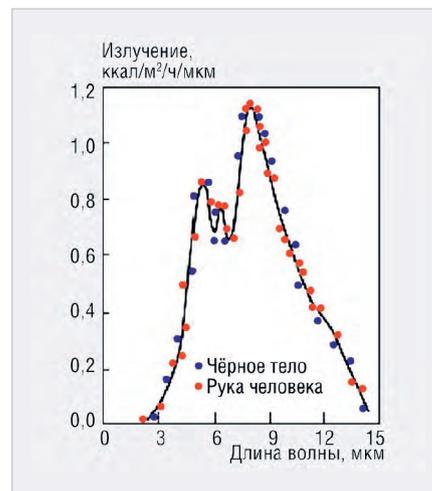


Рис. 7. Зона излучения человеческого тела [10]

и въезжающих по визам граждан, обусловленная наличием так называемого «черноволнового» биоэнергетического паспорта;

- безденежная, бескарточная торговля и коммерция («электронные деньги»);
- безопасность среды обитания;
- наземный «ДРОН» – транспорт с субмиллиметровой навигацией;
- другое.

Технические средства дифференциального приёма черноволнового излучения в России уже практически созданы: на эффекте расщепления запрещённой зоны диэлектрика $LPE i_{-Si}GaAs_{Si}$ А.И. Гордеева, В.Е. Войтовича [4] в сочетании с тринитридными и дилатационными технологиями создания новых $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$ и $A_{III}B_V$ материалов, разработанных д.ф.-м.н. С.А. Кукушкиным (ИПМаш РАН, г. Санкт-Петербург), [7, 8, 11].

С учётом проведённых фундаментальных исследований, созданных уникальных материалов в России можно создать новейшие продукты в области систем распознавания образов. Принимая во внимание то, что население Земли составляет около 7,5 млрд человек, можно сделать достаточно точный прогноз по ёмкости мирового рынка в секторе данных систем.

5. Терагерцовая медицина

По данным Международной федерации диабета (IDF), по состоянию на 2021 год в мире насчитывалось 537 миллионов человек, страдающих диабетом. Добавим сюда людей с нарушениями мозгового кровообращения или поражённых вирусными и бактериальными инфекциями, онкологическими и другими заболеваниями. Возникает вопрос, а можно ли производить гаджет, осуществляющий экспресс-диагностику, допустим, диабета неинвазивным (бесконтактным) способом, не требующим дорогостоящих расходных материалов? Можно ли за день-два излечиться от заболеваний, вызванных различными штаммами вируса SARS-CoV-2 без антибиотиков и гормональных препаратов? Можно ли вылечить онкозаболевание хотя бы на третьей стадии без применения методов химической и лучевой терапии, исключительно тяжёлых для человека?

Оказывается, искусственная терагерцовая энергия на основе низкоэнергетичных квантов (0,165...0,3 эВ) является очень эффективным инструментом для метаболизма при недостатке ферментов в организме человека. В частности, усиливается синтез белка, захват кислорода в гемоглобине, перенос микроэлементов через клеточные мембраны, происходит снижение глюкозы в клетках и повышение гемоглобина.

На примере ТГц-облучения низкоэнергетичными квантами, описанного в работах фактически основателя отечественной терагерцовой терапии Н.Т. Баграева, доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, профессора СПбПУ (кафедра экспериментальной физики) с использованием аппарата «ИК-диполь», созданного в 90-х годах, на основе мелких квантовых включений в кремнии показана эффективность лечения трофических язв, язв желудка, двенадцатиперстной кишки, артрозов, радиационных поражений, инсульта по ишемическому признаку,

проводятся исследования по лечению пневмонии, COVID-19 и др. [10].

Подчеркнём, что это только начальный этап абсолютно безвредной терагерцовой терапии на основе воздействия на клеточном уровне, характерной особенностью которой является тот факт, что длина воздействующей терагерцовой волны (4...7,5 мкм) резонирует с колебаниями, к примеру, альфа-спиральных белковых молекул с созданием благоприятных условий для снижения, например, глюкозы и повышения гемоглобина в крови.

Необходимо отметить, что проведённые научные исследования и разработанная методика диагностики и подавления онкозаболеваний. Метод основан на энергетическом отклике скопленных оксиданта – атомов кислорода в поражённых клетках, – что позволяет осуществлять не только диагностику новообразований, но и узкополосную обработку поражённой биоткани терагерцовыми волнами «черноволнового» диапазона, что приведёт к резкому росту температуры в поражённой области. При температурах свыше 43°C белок в поражённой области начнёт «сворачиваться», т.е. начнётся распад ткани поражённого участка. Собственно, не вникая в суть ТГц-волнового влияния на онкологию, в такой известной клинике, как «К-тест», г. Нижний Новгород, используется метод изотермии (специальные барокамеры для нагрева человеческого тела до температуры, близкой к 40°C) в сочетании с химиотерапией, что приводит к значительным успехам при лечении онкобольных (показатель выздоровления не ниже 25%).

В качестве задающего генератора в этом случае выступает наногетероструктурная система Si/3C-SiC со спин-электронной жидкостью на границе гетерораздела [12] и каскадные электронно-фононные ТГц-усилители, построенные на принципах, изложенных в статье соавтора данной публикации [6].

Вызывают настороженность появляющиеся в последнее время медиа-сообщения (пресса, телевидение) о создании на планете десятков, а возможно, и сотен биологических лабораторий по разработке новых вирусных препаратов специального назначения. Нетрудно догадаться, что РСЗО, управляемые снаряды, гиперзвуковые ударные средства и др. могут показаться «цветочками» по сравнению с вирусно-генетическим оружием специализированного действия, направленным на определённые мас-

сы людей по национальному признаку. Такие чудовищные средства массового летального поражения просто нечем будет подавить. Единственный путь – тщательное, шаг за шагом выяснение генетической природы вирусов – убийц целых наций с чрезвычайно короткими (до нескольких дней) сроками инкубации. Можно предполагать, что на основе энергофлуктуации поражённых генетическими вирусами участков биоткани с нарушением равновесия биохимических реакций анаболизма (синтез необходимых клетке белков, углеводов, жирных кислот) и катаболизма (разложение сложных молекулярных соединений, не усваиваемых организмом) можно выделить резонансные ТГц-волны для энергонасыщения поражённого участка с мутированными (к примеру) АТФ или ГТФ-молекулами, которые будут избирательно разрушать ДНК биоорганизма.

Выявив физико-химическую природу целенаправленного поражения реакций метаболизма (анаболизма и катаболизма), можно на основе методик, экспериментов и опыта д.ф.-м.н. Н.Т. Баграева, с учётом новых технологических приёмов создания практически монохроматичных ТГц-волн резонансного воздействия на основе диэлектриков с насыщенными водородоподобными квантовыми ямами в запрещённой зоне на основе i-GaAs, i-GaP, а также наногетерослоёв $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$, создать эффективное средство против вирусов-убийц.

Также нельзя оставлять без внимания неосторожное обращение археологов с артефактами органического происхождения в период отступления вечной мерзлоты в сторону севера из-за возможности появления опасных возбудителей болезней, законсервированных в ледниковый период, которые, возможно, стёрли с лица Земли предыдущие земные цивилизации. Выход заключается в создании сверхэффективных клинических экспресс-методов предотвращения катастрофических для человечества пандемий с созданием в ВОЗ международной структуры с высокотехнологичными энергосредствами.

В заключение раздела подчеркнём, что большому кругу людей требуются кардиостимуляторы, нейростимуляторы, слуховые аппараты, разного рода биодатчики и др. Для энергопитания в этих устройствах сегодня используют компактные Li-батареи. Но в условиях минусовой температуры, большой

влажности и при длительной работе Li-батареи теряют свою эффективность вплоть до полной разрядки и замораживания процессов ионного переноса/разделения заряда. Потеря работоспособности Li-батареи, например, для пациентов с осложнёнными формами мерцательной аритмии может обернуться летальным исходом. Нужны «вечные» батарейки. Такие решения есть и, кстати, в том же «черноволновом» диапазоне человеческого тела. Этот новый вид мини/микроресурсов электрической энергии на основе преобразования тепла человеческого тела в электроэнергию подробно раскрыт в публикации [2]. Таким образом, наряду с солнечной voltaикой, ветровольтаикой, бетавольтаикой появляется новый вид генерации электроэнергии – терагерцовая тепловольтаика. Можно сказать, что такие батарейки являются «вечными», поскольку они пожизненно обеспечивают электроэнергией указанные выше аппараты пользователя.

6. Терагерцовые ДВС автопроста будущего

В публикации [13] показан СВЧ радиационно-волновой крекинг нефти на основе «деструкции молекул исходного сырья и молекул газа с образованием продуктов, содержащих светлые фракции бензина и керосина с низким молекулярным весом» (цитата из вышеуказанной публикации).

Физический смысл вышесказанного состоит в энергетике распатывания молекулярных связей «тяжёлой» нефти и распада на более лёгкие углеводородные соединения. (В принципе, конечно, можно в пределе заливать в бак автомобиля просто нефть.)

Возникает вопрос, а можно ли создать реальную атомарную «деструкцию» бензольных и полиэтиленовых молекул бензина, солянки или пропана?

Известно, что бензин – диэлектрик, как и пропан. Следовательно, квантово-точечную энергию атомов водорода и углерода можно модулировать в широких пределах на основе функции $\epsilon = f(\omega)$, где $\omega = 2\pi f$, f – частота электромагнитной радиации.

В итоге, принимая во внимание количественную оценку квантово-точечной энергии атома по Пойнтингу $W = \frac{\epsilon E^2}{8\pi} = \frac{\mu H^2}{8\pi}$, совершенно отчётливо проявляется технологическая возможность осуществить диссоциацию (или деструкцию) полимолекул бензольных

групп или полиэтиленовых групп в бензине или пропане.

Что ожидаем в этом случае? Прогноз напрашивается сам собой на основе того, что терагерцовая энергия на 1–3 порядка выше, чем СВЧ, то есть существует хорошая вероятность, что:

1) если мы имеем КПД бензинового ДВС $\leq 25\%$, то есть вероятность его удвоить;

2) если мы имеем КПД пропанового ДВС $\leq 20\%$, то есть возможность его поднять в 2,5 раза.

Можно предотвратить надвигающуюся планетарную катастрофу в виде загрязнения окружающей среды технологическими отходами лития (производство и утилизация литий-ионных батарей, применяемых в электромобилях). К 2025 году планируется выпустить до 50 млн электромобилей и до 100 млн электровелосипедов и электромотоциклов. Однако наука движется вперёд, и следует принимать во внимание открытие новых материалов с относительной диэлектрической про-



LITEMAX

ВАШ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОПУТЧИК!

Полосковые дисплеи для транспорта

- ЖК-дисплеи серии SPANPIXEL™ с яркостью до 3000 кд/м²
- Размеры по диагонали от 6,2 до 65"
- Разрешение до 4K2K
- Угол обзора 178° (во всех плоскостях)
- Диапазон рабочих температур (некоторых моделей) –30...+85°C
- Возможна разработка под заказ
- Ресурс до 100 000 часов

PROCHIP
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 • INFO@PROCHIPRU • WWW.PROCHIPRU



Реклама

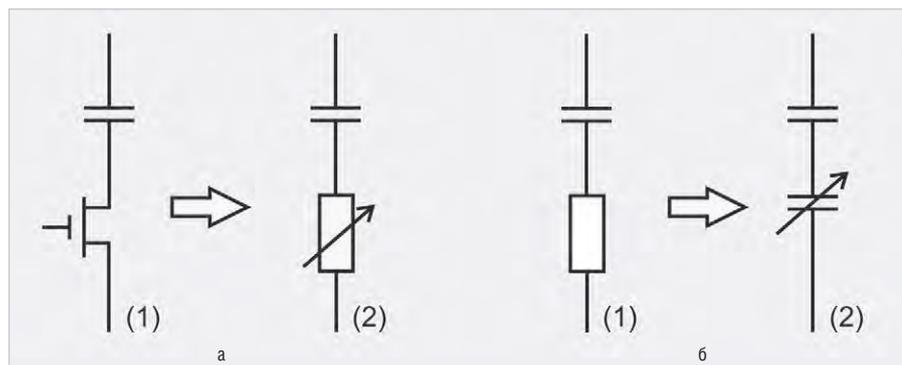


Рис. 8. Схемы DRAM: а) базовая ячейка DRAM на основе накопительной ёмкости (заряд/разряд «1», «0») и MOSFET электрический эквивалент; б) эквивалентная схема тера-, петагерцовой DRAM на базе комбинаций диэлектрических ячеек на основе атомов Ga или Al с уровнем атомной поляризации, эквивалентным Li в ниобате лития (LiNbO₃)

нищаемостью порядка 10⁶ и более, а также успехи в области нанотехнологий по созданию «отрицательной» ёмкости на основе монокристаллических слоёв (ALD) таких структур, как Cr_{0.5}Ni_{0.5}O₂ и других, и на этой основе: «отрицательных» и «положительных» LC-контуров накопления и хранения энергии с гипердобротностью. Это также один из экологических вариантов создания электромобилей (LC-контур и бензин, в принципе, выполняют одну функцию – «энергопривода» автомобиля) [14, 15].

Итак, при комплексном воздействии на впрыскиваемую бензоксиловую смесь ТГц электромагнитного и плюс мощного магнитного поля с di/dt ~ 10¹² А/с или значительно выше мы можем создать исключительно сильную глубокую модуляцию диэлектрической (ε) и магнитной (μ) проницаемостей паров бензина или пропана, а также ионизацию паров воды и кислорода на основе интенсивного излучения в 3C-SiC структурах. Можно также рассматривать фотокатодную радиацию для облучения воздушной и углеводородной смесей на основе Si/3C-SiC электродов [11]. А это модуляции квантово-точечной энергии атомов водорода и углерода из условия εE² = μH².

При нахождении резонансной частоты мы можем диссоциировать/деструктуризировать углеводородные топливные молекулы и, более того, прогреть их до практически рабочего уровня, что резко повысит КПД термохимической реакции в камере ДВС, или ионизировать через параллельную форсунку воздух (кислород + пары воды). Другими словами, нет физико-технологических препятствий для «озонирования» молекул кислорода и воды.

При этом в обоих случаях дополнительно можно применить ещё один мощный инструмент – магнитное поле

на базе сверхпроводимости при комнатной температуре электронных спаренных доменов в структурах д.ф.-м.н., профессора С.А. Кукушкина (ИПМаш РАН) на основе дилатационной гетеросистемы Si/3C-SiC [12] через создание терагерцового ключа с магнитным затвором (на период синхронизации впрыска по датчикам Холла). На этой основе появляется возможность изменения как в воздушной смеси, так и в углеводородных впрыскиваемых молекулах магнитной восприимчивости и, следовательно, осуществления атомной энергонакачки $\frac{\mu H^2}{8\pi}$. Другими словами, появляется возможность выделения атома водорода и даже его вероятного сепарирования перед впрыском из углеводородной молекулы, поскольку m_C/m_H = 12 : 1.

Частоту вращения колёс в HEV-автомобиле можно утроить, не теряя экономичности и крутящего момента.

Данный проект может резко изменить урбанизацию, конъюнктуру и экологию мирового автопрома. Почему бы не финансировать из бюджета это направление? Физические принципы – есть, технология получения уникальных ТГц материалов – есть, технология их обработки и на основании этого готовые продукты в экспериментальном виде – получены. Что ещё надо? Это же «твёрдая нефть». Это – «экспортозамещение».

7. Терагерцовые электронно-фононные ОЗУ, первичные процессорные решения

Базовая ячейка DRAM на основе накопительной ёмкости (заряд/разряд → «1», «0») и MOSFET электрический эквивалент показаны на рис. 8 (а).

На рис. 8 (б) показана эквивалентная схема тера-, петагерцовой DRAM на базе комбинаций диэлектрических ячеек на основе атомов Ga или Al с уровнем

атомной поляризации, эквивалентным Li в ниобате лития (LiNbO₃). Атомы Ga и Al способны к глубокой модуляции уже в СВЧ-диапазоне (эффект Погеля) и тем более в терагерцовом диапазоне. В качестве накопителя «1» или обнуления «0» могут выступать обе ёмкости на рис. 8 (б). Очевидно, что из асимметричного полумоста на основе конструктива на рис. 8(б) можно выстраивать логику ИЛИ-НЕ, в том числе на основе интерференции терагерцовых волн, тем более, что, в отличие от световых или ИК «пиксельных» проблем, здесь всё технологически и физически решается на субмикронном и нанометрическом 2D-планарных уровнях. Полезны будут и мостовые триггерные логические терагерцовые системы для построения микропроцессоров. Добавим сюда ещё и фазовую логику на металлах, стоящих правее в ряду восстановления по водороду (Cu/Au/Ag), тогда с терагерцового дальнего диапазона на доступных 95...180 фото- и литографических проектных нормах можно шагнуть в петагерцовую «цифру» и «логику» на релятивистских длинах электрон-фононных колебаний ~ 65...28 нм и менее. Необходимо подчеркнуть, что данные неординарные решения Россия могла бы начать разрабатывать уже в 2018 году. Ещё более значительные перспективы открываются для России в тера- и петагерцовом компьютерном проектировании на основе двухфотонной «цифры» и «логики», точнее, на рекомбинационных процессах генерации противозонных «электронных» и «дырочных» фотонов в ячейке памяти или логики [9]. Что это такое? Это означает, что 2...5 мегаваттный экзафлопсный суперкомпьютер «Ломоносов» может быть размещён в планшете, доступном школьнику, с питанием от Li-батареи.

Перспективы создания 6G в РФ

Здесь, в принципе, у России также всё есть, и к этой работе также можно было бы приступить уже «вчера», т.е. в период 2018–2020 гг. Но для этого нужны талантливые люди, которые профессионально владеют зонной теорией, ФТТ, математической физикой, фотоникой, фононикой и нанотехнологиями. Такие уникальные специалисты в РФ имеются в достаточном количестве. С их помощью возможно сократить катастрофический разрыв в уровне электроники со странами Запада. Удобный частотный диапазон для 6G – это полоса 240...320 ГГц, когда электро-

магнитные волны ещё способны относительно на приемлемом расстоянии проникать в плотные слои атмосферы.

Структура 6G базовых станций резко отличается от 4G и 5G конструктивных решений. Создание широкополосной связи, навигации и Интернета на волнах вблизи $\lambda \sim 1$ мм требует космических платформ и создания многотысячной группировки миниспутников на подионосферных орбитах (≤ 180 км).

За энергетику таких спутников беспокоиться не нужно, поскольку на LPE GaAs-мультиструктурах возможно создание солнечных батарей с удельной мощностью до $0,4 \text{ кВт/м}^2$ и циклом работоспособности на радиационной орбите как минимум в три раза выше, чем в случае фотовольтаики на кремнии.

Электронно-фотонно-фононные бортовые системы могут обеспечить скоростной Интернет с потолочными скоростями до 100 Гбит/с и GPS-позиционированием с разрешением на уровне толщины человеческого волоса, т.е. порядка $40..60 \text{ мкм}$ ($0,04..0,06 \text{ мм}$). Это полезно не только индивидуальным пользователям, но и, к примеру, МЧС и др. Телеметрию можно реализовывать на лазерных LPE GaAs- или тринитридных уникальных материалах ($-0,75 \text{ мкм}$ или $0,38 \text{ мкм}$). Что касается длительности пребывания таких спутников на такой абсолютно необходимой с позиции баллистики орбите, как ~ 180 км, то здесь возможно использование «вечных подъёмников»: корректировщиков орбиты на основе взаимодействия искусственного мощного импульсного магнитного поля на сверхпроводящих элементах [12] со слабой плазмой ионосферы, которая будет усиливаться скоростным фактором дрейфа миниспутника на орбите.

Таким образом, неплохо решается проблема «иссаякания» ионов, например, атома криптона (Kr) в бортовых баллонах для ионного бортового двигателя, корректировщика орбиты спутника.

Что касается стандартных (по аналогии с 5G) блоков базовых станций ($\sim 20..50 \text{ Вт}$), то, скорее всего, из-за высокой плотности наземной атмосферы реализация наземных базовых 6G GSM-станций невозможна. Здесь требуются миниспутники.

В итоге есть возможность обеспечить GSM, GPS, РОФАР («три в одном») мощной группировкой миниспутников.

Приёмник в виде планшета или гаджета может быть построен на новейшей СВЧ-элементной базе, как на LPE/МОСVD-гетеросистемах, так и на три-

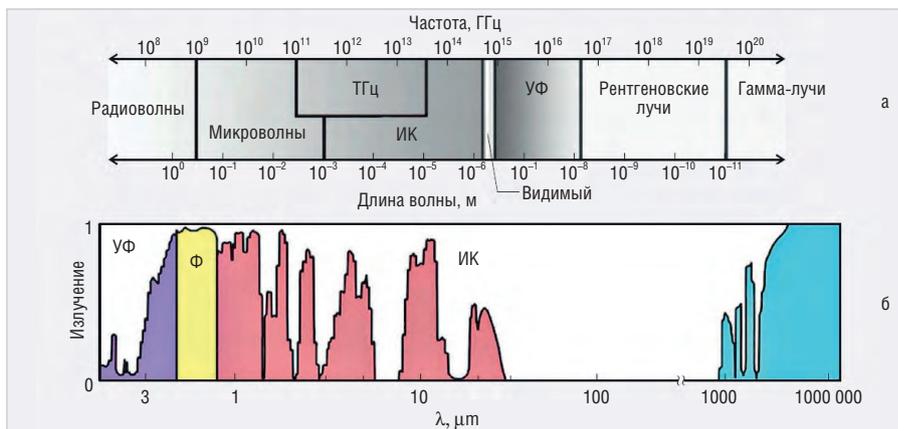


Рис. 9. Окна прозрачности атмосферы и спектр электромагнитного излучения: а) спектр электромагнитного излучения; б) спектр пропускания земной атмосферы

Таблица 1. Имеющиеся в разработке на этапе освоения или в опытном производстве тера- и петагерцовые инструменты/пинцеты/параметры

Пинцеты	Частота	7G	8G	9G	10G
1. Частота в окнах прозрачности атмосферы (ТГц)		5...7,5	25...37	60...75	Около 790 (петагерцовый диапазон)
2. Скорость (Терабит/сек)		До 3	До 15	До 30	До 300
3. Наличие базового разработанного материала		LPE i_{-Si} GaAs _{Si} Тринитриды Сверхпроводимость на $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$; В перспективе: LPE i_{-Si} GaP _{Si} / i_{-Ge} GaP _{Ge}	LPE i_{-Si} GaAs _{Si} Тринитриды Сверхпроводимость на $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$; В перспективе: LPE i_{-Si} GaP _{Si} / i_{-Ge} GaP _{Ge}	LPE i_{-Si} GaAs _{Si} Тринитриды Сверхпроводимость на $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$; В перспективе: LPE i_{-Si} GaP _{Si} / i_{-Ge} GaP _{Ge}	LPE i_{-Si} GaAs _{Si} Тринитриды Сверхпроводимость на $A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$; В перспективе: LPE i_{-Si} GaP _{Si} / i_{-Ge} GaP _{Ge}
4. Функциональные системы, наличие базы для разработок					
Генераторы		+	+	+	+
Усилители		+	+	+	+
Смесители		+	+	+	+
Фильтры		+	+	+	+
VGM		+	+	+	+
АЦП		+	+	+	+
Процессоры с ОЗУ		+	+	+	+

Таблица 2. Оценка, прогноз, ожидание мирового рынка услуг на фоне текущих рыночных объёмов

№ п/п	Проекты / Текущие сегменты рынка	Объём услуг	Объём рынка, \$ триллионы (текущий - 2022 г., проектный - 2035 г.)
1	Системы распознавания образов* Текущий (нейросети и другое); Проектный**		0,05 0,5
2	Терагерцовая медицина Текущие медицинские услуги Проектный**		1,6 0,3
3	Автопром Текущий Проектный		3 0,8
4	Объём цифровых и цифроаналоговых схем (процессоры, ОЗУ, ПЗУ, ПЛИС, БМК, АЦП, ЦАП и др.) Классический (т.е. полупроводниковый) Проектный**		0,5 0,3
5	6G Текущий Проектный**		0 0,3
6	7G Текущий Проектный**		0 > 1

* С учётом гаджетов: очков ночного, теплового и «дневного» видения, т.е. в сплошном лиственном лесу видение на 100 метров.
** Абсолютно новые рынки.

нитридных или дилатационных гетеросистемах, в том числе на новом радиационно-стойком поколении рНЕМТ, а также униполярно-инжекционных, зонно-релятивистских материалах или на сверхпроводниках ($A_{IV}B_{IV}/A_{IV}$), не требующих охлаждения. Бортовые суперкомпьютеры будут созданы на принципах, изложенных в предыдущем разделе.

Приёмный блок будет выстраиваться на комбинации брэгговских решёток (VGM-резонаторы) и диэлектрических галлиево-алюминиевых антенн с последующим усилением субтерагерцового сигнала на электронно-фононных принципах.

Входные компараторы также будут выполнены на диэлектриках с суперквантованием и высочайшей избирательной способностью на новом поколении терагерцовых АЦП.

Нет проблем с синтезаторами (генераторами частот), а также узловым звеном: объёмно-акустическими фильтрами на акустических фонах, допустим, тринитридном AlN.

Абсолютно бесшумные выходные усилители могут быть выполнены на 40-нанометровых 2DEG-структурах в GaAs с присадками индия (этот чрезвычайно полезный эффект обнаружил д.т.н. П.П. Мальцев (ИСВЧПЭ РАН). С VGM-резонаторами успешно справится МИФИ, где сосредоточены лучшие специалисты в области нанофотоники.

Как итог, чего не хватает в РФ для разработки 6G-системы, превосходящей мировой уровень? Скорее всего, адекватного понимания, взаимодействия и координации в этой области между управляющими структурами и интеллектуальной научно-технической элитой.

Терагерцовая 5...7,5 ТГц GSM-, GPS- и фононная локация

Окна прозрачности атмосферы и спектр электромагнитного излучения показаны на рис. 9 (а, б) [16].

Какие возможности есть у России в области разработок 7G, 8G, 9G, 10G? С учётом раздела «Терагерцовые электронно-фононные ОЗУ», первичные процессорные решения – просто исключительные на фоне зарубежных технологий, что предопределяет неизбежность лидерства России на триллионном рынке услуг и построения интеллектуальной тера- и, в перспективе (2040 г.), петагерцовой экономики.

Наглядное представление российского технологического и терагерцового уровня показано в сводной табл. 1.

Общая ёмкость проектных услуг и продуктов на мировом рынке к 2035 году прогнозируется на уровне более чем 3 триллиона долларов (т.е. два ВВП РФ) (табл. 2).

В России есть всё для реализации указанных проектов, а именно:

- выполнен огромный объём работ в области фундаментальных и прикладных исследований (см. раздел «Список литературы»);
- разработана практическая мелкосерийная технология уникальных материалов (LPE GaAs- и гетероструктуры на его основе, атомнозамещённые гетероструктуры Si/3C-SiC, тринитридные гетеросистемы, спинэлектронные материалы, изотопноцифровые кристаллы, фотонные и фононные кристаллы);
- разработана стартаповская технология получения силовых, СВЧ-, оптоэлектронных, светодиодных, лазерных, спинэлектронных, пироэлектронных, фотонных, изотопноцифровых приборов.

Организация научно-технологических центров

В центре дорожной карты указанных проектов находится проект по созданию «Центра экстремальной электроники, фотоники и фоники» с рабочими температурами продуктов проекта до +1000°C и с исключительной радиационной стойкостью.

Проект с осени 2021 г. находится в Правительстве Ульяновской области.

В текущий период проект передан в Ростех (АО «Концерн радиостроения «Вега»), через члена совета директоров в Концерн «КРЭТ», заместителю председателя комитета по науке ГД, в АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей» (через АО «ОКБ «Планета»), часть проекта находится в инвестиционном портфеле Росатома.

Комплексная, новая Программа по ЭКБ проекта с опережением мирового уровня на 5-6 лет будет разработана в ноябре 2022 г., и она может стать базой для Новой Стратегии развития отечественной электронной промышленности до 2030 года, т.е. стать стратегией обеспечения национальной монополии в отдельных сегментах мирового рынка в областях субнано- и наноэлектроники, силовой, СВЧ-, ТГц-электроники, фотоники и фоники и спинэлектроники. То есть фактически созданы условия не для концепций, а для стратегического планирования «Программы экспортозамещения» («Твёрдая нефть»).

Заключение

1. В статье представлены реальные мегапроекты на основе создания новых уникальных, не имеющих аналогов на мировом рынке материалов: LPE GaAs- и гетеросистемы, атомно-защищённые наноструктуры в системе Si/3C-SiC, в том числе для спинэлектроники / комнатной сверхпроводимости; тринитридные, с самоорганизацией гетеросистемы, изотопноцифровые, фотонные, фононные кристаллы.
2. Пора «включать мозги» (по меткому выражению Президента РФ) и принять наши предложения в реальную стратегическую Программу развития электроники, фотоники, фоники и спинтроники с опережением мирового уровня как минимум на пять лет.
3. Необходимо возродить МЭП РФ, поскольку на кону национальный суверенитет.

Литература

1. Электронику начнут с чистого нуля // Коммерсант. 2022. № 168. 13 сент. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5558844>.
2. Войтович В.Е., Гордеев А.И., Звонарев А.В. Терагерцовая тепловольтаика на основе монокристаллов LPE i-GaAs (SiO) в 2 ч. // Современная электроника. 2017. № 3; 2017. № 4.
3. Гуляев Ю.В., Годик Э.Э. Физические поля биологических объектов // Вестник Академии наук СССР. 1983. № 8.
4. Гордеев А.И., Войтович В.Е., Звонарев А.В. Новая физическая твердотельная электроника на основе терагерцового расщепления и деформации запрещённой зоны LPE SiGaAsSi-кристаллов. Ч. 1 // Радиотехника. 2017. № 10.
5. Ахманов С.А., Хохлов Р.В. Об одной возможности усиления световых волн // ЖЭТФ. 1962. Т. 43. № 1. С. 351–353.
6. Гордеев А.И. Перспективные терагерцовые поляризованные информационные системы в 2 ч. // Современная электроника. 2016. № 6; 2016. № 7.
7. Баграев Н.Т., Кукушкин С.А., Оситов А.В. и др. Терагерцовое излучение из наноструктур карбида кремния // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55, вып. 11. С. 1027–1033.
8. Баграев Н.Т., Кукушкин С.А., Оситов А.В. и др. Регистрация терагерцового излучения с помощью наноструктур карбида кремния // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55, вып. 12. С. 1195–1202.
9. Гордеев А.И., Войтович В.Е., Святец Г.В. Перспективные фотонные и фононные отечественные технологии для терагер-

- цовых микропроцессоров, ОЗУ и интерфейса с сверхнизким энергопотреблением // Современная электроника. 2022. № 2.
10. Баграев Н.Т., Клячкин Л.Е., Маляренко А.М. и др. Терагерцовая кремниевая наноэлектроника в медицине // Инновации. 2011. № 10 (156).
 11. Кужушкин С.А., Шарофидинов Ш.Ш. Новый метод получения объёмных кристаллов AlN, GaN и AlGaIn с использованием гибридных подложек SiC/Si // Физика твёрдого тела. 2019. Т. 61, вып. 12.
 12. Кужушкин С.А., Оситов А.В. Эпитаксиальный карбид кремния на кремнии. Метод согласованного замещения атомов (Обзор) // Журнал общей химии. 2022. Т. 92. № 4. С. 547–577.
 13. Джандосова Ф.С., Забияк В.Г., Шаехов М.Ф. Использование СВЧ-излучения в процессе глубокой переработки нефти и нефтепродуктов на основе технологии радиационно-волнового крекинга // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 23. С. 179–182.
 14. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными значениями ϵ и μ // Успехи физических наук. 1967. Т. 92. № 7. С. 517–526.
 15. Сапогин В.Г., Прокопенко Н.Н. Отрицательная интегральная индуктивность – измерительный миф или физическая реальность? // Материалы XII Международного научно-практического семинара (г. Шахты, 27–28 ноября 2015 г.), с. 61–65. URL: <https://250250.ru/files/mikan2015.pdf>.
 16. Баграев Н.Т., Головин П.А., Клячкин Л.Е. и др. Источники и приёмники терагерцового излучения на основе микрорезонаторов, встроенных в краевые каналы кремниевых наносандвичей // ЖТФ. 2020. Т. 9. № 10. С. 1663–1671.
 17. Японское общество прикладной физики (JASP) // URL: https://www.jsap.or.jp/docs/academicroadmap2013/JSAP_ARM-03_TerahertzElectronics.jpg.
 18. Аналитическое агентство по исследованию рынка Research and Markets // URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5457916/terahertz-technology-market-forecast-to-2028>.



НОВОСТИ МИРА

РАЗРАБОТЧИКОВ ОБЯЖУТ ОПТИМИЗИРОВАТЬ ПО ПОД LINUX

Минцифры определило три наиболее перспективные для господдержки отечественные операционные системы (ОС), включённые в реестр российского ПО, о чём сообщает «Коммерсантъ». В дальнейшем министерство хочет обязать рос-

сийских разработчиков адаптировать своё программное обеспечение под эти системы.

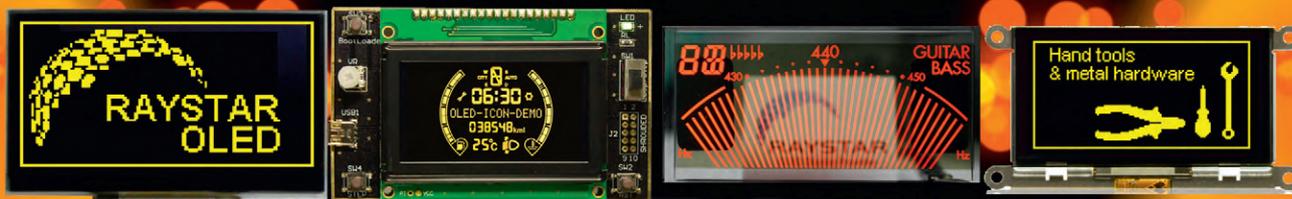
По словам собеседника, близкого к Минцифры, министерство в июле заказало Центру компетенций по импортозамещению в ИКТ (ЦКИКТ) исследование, чтобы определить наиболее популярные у российских компаний ОС.

По итогам опроса выделены три приоритетные ОС: Astra Linux (ГК «Астра»), ОС «Альт» («БазАльт СПО») и «Ред ОС» («Ред Софт»). Все они базируются на Linux. Проведение исследования подтвердили в пресс-службе Минцифры. В ГК «Астра», «Ред Софт» и «БазАльт СПО» отказались от комментариев.

industry-hunter.com



OLED-дисплеи Raystar



Специсполнение по ТЗ заказчика

Прозрачные модели

АВТОМОБИЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА • СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ • ИЗМЕРИТЕЛИ МОЩНОСТИ • БЫТОВАЯ ТЕХНИКА • МЕДИЦИНСКИЕ ПРИБОРЫ

Характеристики

- Яркость экрана до 150 кд/м² обеспечивает считывание изображения при ярком солнечном свете
- Высокая контрастность 10 000:1
- Широкий угол обзора до $\pm 175^\circ$
- Цвет свечения: жёлтый, зелёный, красный, белый, синий
- Формат изображения: 122×32, 128×64, 240×64, 256×64 и 96×64 точки

- Низкая потребляемая мощность 10 мА (схемы управления – токовые)
- Светоэмиссионная схема: не требуется система подсветки
- Короткое время отклика: 10 мкс при температуре +25°C
- Широкий диапазон рабочих температур от –40 до +80°C
- Малая толщина модуля дисплея, небольшой вес
- Срок службы: 50 000 ч для белого и синего цвета; 100 000 ч для жёлтого, зелёного, красного цветов

PROCHIP
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА
(495) 232-2522 ▪ INFO@PROCHIP.RU ▪ WWW.PROCHIP.RU



Реклама

РЫНОК

- №1... 9 **Новости рынка**
- №1 / стр. 8 **Ведущие производители полупроводниковых электронных компонентов и дефицит их продукции. Часть 1. Контрактные производители** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №2 / стр. 6 **Ведущие производители полупроводниковых электронных компонентов и дефицит их продукции. Часть 2. Производители-универсалы (IDM)** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №3 / стр. 8 **Ведущие производители полупроводниковых электронных компонентов и дефицит их продукции. Часть 2. Производители-универсалы (IDM), окончание** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- №3 / стр. 18 **Новейшие разработки в области медицинской электроники для борьбы с вирусом и не только** АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №5 / стр. 12 **Электросамолёты. Что нас ждёт?** АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №6 / стр. 6 **Реализация прототипа ИУС на основе блокчейн-технологии** НАТАЛЬЯ ЗОРИНА, НИКОЛАЙ КУЗНЕЦОВ, ЛЕОНИД ШАПЕТЬКО
- №6 / стр. 10 **Современные подходы и тенденции в архитектуре IIoT-систем** СЕРГЕЙ РЫЛОВ
- №6 / стр. 14 **Автоматизированная система управления регулированием давления газа в производстве азота методом короткоциклового безнагревной адсорбции** АЛЕКСАНДР САРКИСОВ
- №6 / стр. 18 **Прогнозирование качества шлифования с помощью цифрового двойника** БОРИС СОЛОВЬЁВ
- №7 / стр. 24 **Зачем нужны квантовые вычисления? Часть 1. Что такое квантовый компьютер** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №8 / стр. 12 **Способы прогнозирования периода стойкости режущих инструментов** АРТЁМ ГАМОВ
- №8 / стр. 16 **Использование онтологического инжиниринга при анализе технологических линий** ЕВГЕНИЙ КУРНАСОВ, АННА ВОЛОДИНА, ГАЛИНА БОГОМОЛЬНАЯ, ДМИТРИЙ КИСЕЛЕВ
- №8 / стр. 20 **Программно-аппаратный комплекс системы контроля и управления доступом** ИВАН ПОДЗОРОВ
- №8 / стр. 24 **Зачем нужны квантовые вычисления? Часть 2. Основные этапы развития квантовых компьютеров с вентиляционной обработкой** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ
- №8 / стр. 34 **Применение цифровых двойников в промышленности** СОМАЙЕ МАЛАКУТИ, ПИТЕР ВАН ШАЛКВИК, БИРГИТ БОСС, ЧЕЛЛУРИ РАМ САСТРИ
- №9 / стр. 8 **Зачем нужны квантовые вычисления? Часть 3. Современные квантовые вычислители** ВИКТОР АЛЕКСЕЕВ

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

- №1 / стр. 22 **Новейшие достижения компании SV Microwave/Ampheol в области радиочастотных соединений** КИВА ДЖУРИНСКИЙ
- №1 / стр. 26 **Мощные резистивные поглотители (фиксированные аттенуаторы и эквиваленты нагрузок) с воздушным охлаждением** ИГОРЬ БЕЛКОВ, ЮРИЙ ЕРЕМЕЕВ, ИЛЬЯ МАЛЫШЕВ
- №2 / стр. 16 **Инновационные способы соединения печатных плат СВЧ** КИВА ДЖУРИНСКИЙ
- №2 / стр. 20 **Современные продукты компании Microchip. Особенности 8-разрядных микроконтроллеров** ЮРИЙ ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ
- №3 / стр. 24 **Адаптеры SMP (вилка) – SMA (розетка) зарубежных компаний. Справочные материалы** КИВА ДЖУРИНСКИЙ
- №3 / стр. 30 **Эксплуатационные характеристики МЭМС-компонентов БИНС ООО «Лаборатория Микроприборов»** АЛЕКСАНДР БЕКМАЧЕВ, ЕЛЕНА КОЧУРИНА, АЛЕКСАНДР МУСАТКИН

- №4 / стр. 8 **Потери мощности сигнала в радиочастотных соединителях** КИВА ДЖУРИНСКИЙ
- №4 / стр. 14 **Радиационно-стойкие неизолированные импульсные стабилизаторы напряжения для локального преобразования энергии** ВИКТОР БЕЗРОДНЫЙ
- №6 / стр. 20 **Уроки импортозамещения от MT Microsystems: МЭМС-компоненты для навигации и связи** АЛЕКСАНДР БЕКМАЧЕВ
- №7 / стр. 10 **Магнитно-резонансная томография и радиочастотные соединители** КИВА ДЖУРИНСКИЙ
- №7 / стр. 18 **Современные продукты компании Microchip. Особенности 16-разрядных микроконтроллеров и цифровых сигнальных контроллеров** ЮРИЙ ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ
- №9 / стр. 24 **Микроволновые датчики движения для помещений. Обзор функционала и практические рекомендации** АНДРЕЙ КАШКАРОВ

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- №2 / стр. 26 **Выберите подходящее оборудование для тестирования и контроля температуры аккумуляторных батарей** БЕРНАРД ЭНГ
- №4 / стр. 22 **Практика измерений входных и выходных характеристик источников вторичного электропитания с применением опции R&S RT06-K31** НИКОЛАЙ ЛЕМЕШКО, МИХАИЛ ГОРЕЛКИН, ПАВЕЛ СТРУНИН

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

- №1 / стр. 30 **НЧ-генератор синусоидальных сигналов с 12 фиксированными частотами** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №2 / стр. 30 **Применение встроенных в микроконтроллер EFM8LB12 конфигурируемых логических элементов для прецизионного измерения временных интервалов** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №2 / стр. 42 **Акустический автомат лестничного освещения с ШИМ-управлением яркостью** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ
- №3 / стр. 36 **Установка ЭЛТ 8ЛОБИ в осциллограф С1-94** СЕРГЕЙ ГЛИБИН
- №3 / стр. 38 **Septentrio: спутниковая навигация для ответственных задач** АЛЕКСАНДР БЕКМАЧЕВ
- №4 / стр. 32 **Фотореле с нестандартным алгоритмом для светодиодной лампы** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ
- №4 / стр. 36 **«Умный» дом для райцентра** СЕРГЕЙ ШИШКИН
- №4 / стр. 42 **Надёжный сигнализатор – датчик уровня жидкости** ЕВГЕНИЙ УФИМЦЕВ
- №5 / стр. 18 **О необходимости подавления помех, возникающих в цепях цифровых систем при работе электромагнитных реле большой мощности** ИЛЬЯ СТРУКОВ
- №5 / стр. 22 **Инфракрасный радар-парковщик** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ
- №5 / стр. 24 **ЗУ для Li-Ion АКБ 6F22 («Крона»)** СЕРГЕЙ ГЛИБИН
- №6 / стр. 26 **Доверие к искусственному интеллекту и факторы риска его применения в различных сферах жизни** РОМАН БОЛБАКОВ, МИХАИЛ КОВАЛЕНКО, АНТОНИО-КРИСТИ ИСАЕВ
- №6 / стр. 28 **Разработка портативного устройства и комплекса программ для тестирования и настройки многофункциональных аварийных вычислителей-регистраторов** АНДРЕЙ ВАСЕНЕВ
- №6 / стр. 30 **Применение свёрточной нейронной сети для решения проблемы регистрации скан-копий документов в электронном архиве** ЕКАТЕРИНА ВОЛГИНА
- №6 / стр. 34 **Опыт применения трёхзначной логики в управлении технической системой** ГРИГОРИЙ БЕДНОВ
- №7 / стр. 48 **Барометр-гигрометр-термометр с батарейным питанием на базе MEMS-датчика BME280, микроконтроллера EFM8SB10F8 и ЖКИ-модуля H1313. Часть 1** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №7 / стр. 54 **«Умная теплица» на шести сотках** СЕРГЕЙ ШИШКИН
- №7 / стр. 60 **Индикатор разряда АКБ в беспроводной клавиатуре** СЕРГЕЙ ГЛИБИН
- №7 / стр. 62 **Дистанционный регулятор яркости люстры с функцией плавного включения** АЛЕКСАНДР ОДИНЕЦ

- №8 / стр. 42 **Барометр-гигрометр-термометр с батарейным питанием на базе MEMS-датчика BME280, микроконтроллера EFM8SB10F8 и ЖКИ-модуля H1313. Часть 2** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ
- №8 / стр. 50 **Термометрия элеватора по системе «Power over Ethernet»** АНДРЕЙ ШАБРОНОВ
- №9 / стр. 30 **Модернизированный барометр-гигрометр-термометр с батарейным питанием на базе микроконтроллера EFM8SB20F16 и E-ink дисплея** АЛЕКСЕЙ КУЗЬМИНОВ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- №1 / стр. 36 **Работа с последовательным интерфейсом SPI в программной среде Proteus 8.11. Часть 2**
ТАТЬЯНА КОЛЕСНИКОВА
- №1 / стр. 44 **Монтаж компонентов и связанные с ним технологии подсистема ГРИФ-4 – Монтаж. Часть 2**
ЮРИЙ ЁЛШИН
- №1 / стр. 48 **Работа с последовательным интерфейсом I²C в программной среде Proteus 8.11**
ТАТЬЯНА КОЛЕСНИКОВА
- №1 / стр. 58 **Delta Design Simtera. Новости первой российской САПР проектирования, моделирования, а также синтеза RTL для конфигурирования ПЛИС** НИКИТА МАЛЫШЕВ, АЛЕКСЕЙ ЕРЁМИН, АРТЕМ ВАРГАНОВ,
СЕРГЕЙ ЯРЦЕВ
- №1 / стр. 62 **Цифровые двойники в промышленности: истоки концепции, современный уровень развития и примеры внедрения** ДЕНИС ХИТРЫХ
- №2 / стр. 46 **Применение программы CodeVisionAVR для управления буквенно-цифровыми дисплеями в Proteus 8.11** ТАТЬЯНА КОЛЕСНИКОВА
- №2 / стр. 60 **Этапы работы с многоплатным проектом в САПР Delta Design** ИВАН ВОЛКОВ
- №3 / стр. 44 **Проектирование устройств вывода информации с использованием цифрового генератора шаблона в Proteus 8.11** ТАТЬЯНА КОЛЕСНИКОВА
- №5 / стр. 26 **Разработка автоматизированной системы управления балансировкой шлифовальных кругов на основе цифрового двойника** ЕЛИЗАВЕТА КАШИРСКАЯ, АСЛИДДИН НАЗРИЕВ
- №5 / стр. 30 **Прикладное применение комплексных нейронных сетей** СЕРГЕЙ КУЛИКОВ
- №5 / стр. 33 **Цифровизация натурального эксперимента** ЕЛИЗАВЕТА КАШИРСКА
- №5 / стр. 36 **Новейшие кварцевые генераторы с высокой кратковременной стабильностью и особенности их применения** ЮРИЙ ИВАНОВ, АРКАДИЙ НИКОНОВ
- №5 / стр. 42 **Прогнозирование времени отказа оборудования технологического процесса с помощью искусственной нейронной сети** ИМАД ХАМАМЕХ
- №5 / стр. 46 **Проектирование информационно-управляющей системы анализа статистических данных функционирования производственной системы** ЕЛИЗАВЕТА КАШИРСКАЯ, ЕЛЕНА ВОРОБЬЁВА
- №5 / стр. 48 **Прогнозирование состояния технологического процесса** АНДРЕЙ БРИЛЛИАНТОВ
- №6 / стр. 36 **Проектирование устройств вывода информации с использованием цифрового генератора шаблона в Proteus 8.11. Часть 2** ТАТЬЯНА КОЛЕСНИКОВА
- №6 / стр. 50 **Разработка модуля выдачи и контроля исполнения производственного задания информационно-управляющей системы класса MES** МАРИЯ БАХМЕТЬЕВА
- №7 / стр. 33 **Проектирование источников питания** ФРЕДЕРИК ДОСТАЛЬ
- №7 / стр. 40 **Гибко-жесткие печатные платы (Delta Design)** СЕРГЕЙ ПОПОВ
- №7 / стр. 46 **Создание адаптивной системы управления шаговым двигателем** АЛЕКСАНДР ПЕТРУШИН
- №9 / стр. 38 **Схемотехническое моделирование в Delta Design SimOne. Часть 2** АЛЕКСЕЙ ГИМЕИН

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

- №4 / стр. 44 **Системы RFID в СВЧ, микроволновом диапазоне, перспективы их развития и некоторые способы защиты данных** АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №4 / стр. 52 **Использование плоскостей симметрии волноводных структур при расчёте в ANSYS HFSS** ВИКТОР КОНЕВ, АЛЕКСАНДР КУРУШИН, ЕВГЕНИЙ ЛАВРЕЦКИЙ, ЕВГЕНИЙ НОВОСЁЛОВ, ВАЛЕНТИН ЧЕРНЫШОВ
- №5 / стр. 52 **Высокоизбирательные перестраиваемые фильтры** АНДРЕЙ ЯКОВЛЕВ, АЛЕКСАНДР ТЮМЕНЦЕВ
- №5 / стр. 54 **Метод брянских партизан** АЛЕКСАНДР ЦУПРИКОВ
- №5 / стр. 58 **Ионизирующие излучения и их воздействие на полупроводниковые материалы (по данным литературных источников). Часть 1** ОКСАНА ВОВК, МИХАИЛ МАРЧЕНКО, ВЛАДИМИР СОКОЛОВ
- №6 / стр. 54 **Ионизирующие излучения и их воздействие на полупроводниковые материалы (по данным литературных источников). Часть 2** СЕРГЕЙ КРАВЧУК, ВЛАДИМИР СОКОЛОВ, МИХАИЛ МАРЧЕНКО, ОКСАНА ВОВК
- №8 / стр. 54 **О применении для нормировки классифицированной выборки наблюдений при распознавании объектов по межчастотному корреляционному признаку** ВЛАДИМИР БАРТЕНЕВ
- №8 / стр. 58 **Дискретный синтез цифрового гауссова фильтра** ВЛАДИМИР БУГРОВ

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

- №1 / стр. 68 **Нижегородская радиолaborатория: история первого советского научно-исследовательского центра в области радиотехники** ВЛАДИМИР БАРТЕНЕВ
- №3 / стр. 64 **Необычные адаптивные системы СДЦ** ВЛАДИМИР БАРТЕНЕВ
- №3 / стр. 70 **Старое-новое изобретение А.С. Попова и его перспективы** АНДРЕЙ КАШКАРОВ
- №6 / стр. 62 **К 100-летию со дня рождения М.И. Кривошеева – патриарха отечественного и мирового радио- и телевидения** ВЛАДИМИР БАРТЕНЕВ

КОМПЕТЕНТНОЕ МНЕНИЕ

- №2 / стр. 65 **Перспективные фотонные и фононные отечественные технологии для терагерцевых микропроцессоров, ОЗУ и интерфейса со сверхнизким энергопотреблением** АЛЕКСАНДР ГОРДЕЕВ, ВИКТОР ВОЙТОВИЧ, ГЕННАДИЙ СВЯТЕЦ
- №4 / стр. 58 **BigTech и захват планеты** АЛЕКСАНДР ГОЛЫШКО
- №5 / стр. 8 **Как избежать в условиях санкций технологического «суицида» в отечественной электронике?** АЛЕКСАНДР ГОРДЕЕВ
- №8 / стр. 8 **Минпромторг – импотент? Да** ИВАН ПОКРОВСКИЙ
- №9 / стр. 42 **Крупнейшие в мире перспективные электронные отечественные проекты с ёмкостью мирового рынка в триллионы долларов** АЛЕКСАНДР ГОРДЕЕВ

ПЕРСОНА НОМЕРА

- №7 / стр. 8 **Интервью с генеральным директором АО «Завод «Снежень» на выставке «Экспоэлектроника-2022»** КРИСТИНА ДУНАЕВА

ФОРМУЛА УСПЕХА

- №3 / стр. 62 **Четыре составляющие успеха АО «Завод «Снежень»** ЕЛИЗАВЕТА МАТЮХИНА

СВОДНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

- № 9 / стр. 52 **СВОДНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ЖУРНАЛА ЗА 2022 ГОД**

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

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

Подписка только для юридических* лиц

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

Журнал «СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА» ПЕЧАТНАЯ версия

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

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

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

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

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

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

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

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

Внимание!

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

Оплата данного счета означает согласие с условиями поставки товара.

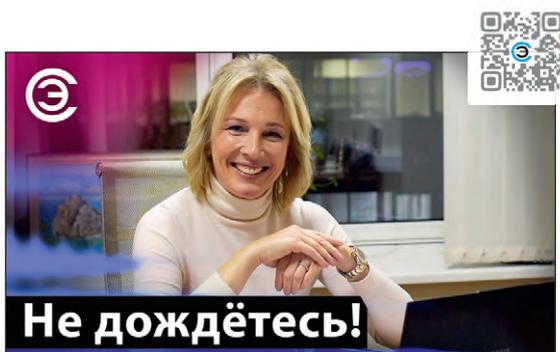
Руководитель

Седов К. В.

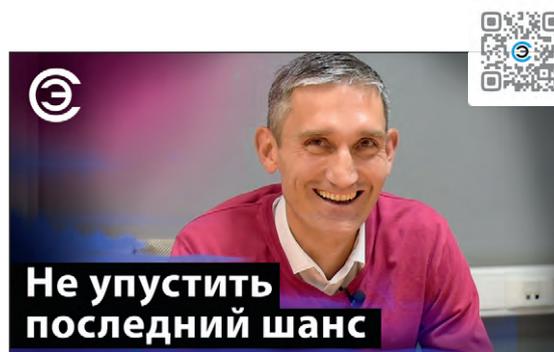




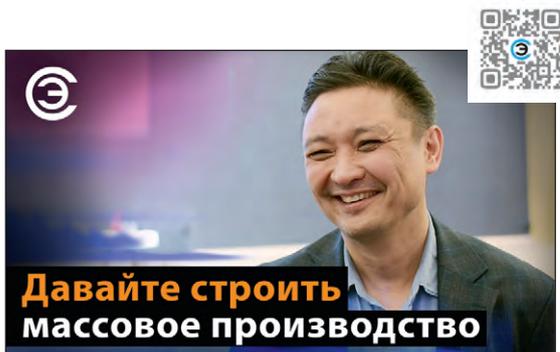
Смотрите на канале СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА



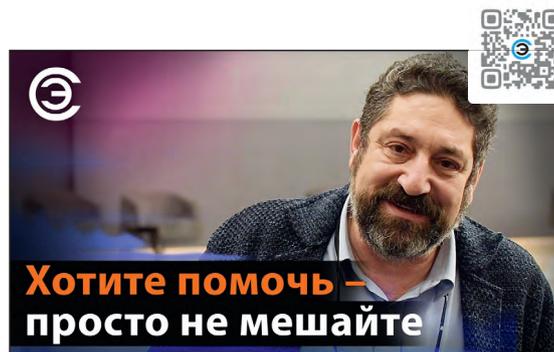
*Светлана Легостаева,
АНО «Консорциум «Вычислительная техника»*



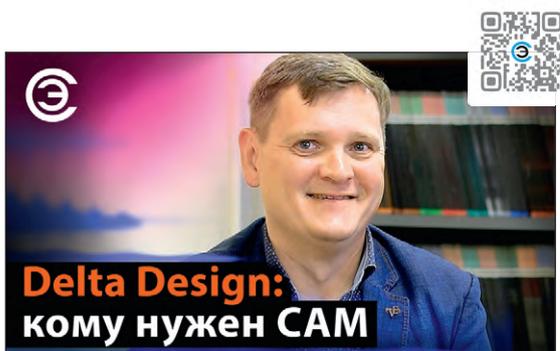
*Иван Покровский,
Центр современной электроники*



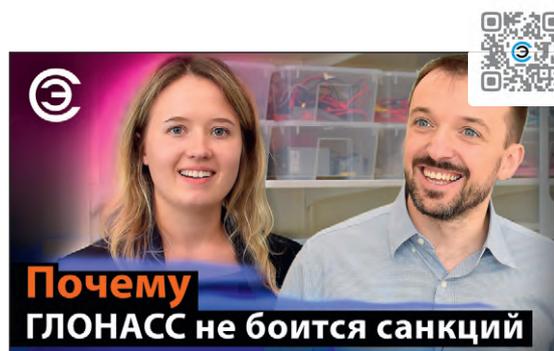
Айрат Хисамов, ООО «Стратнанотек»



*Евгений Берлин,
Лаборатория вакуумных технологий*



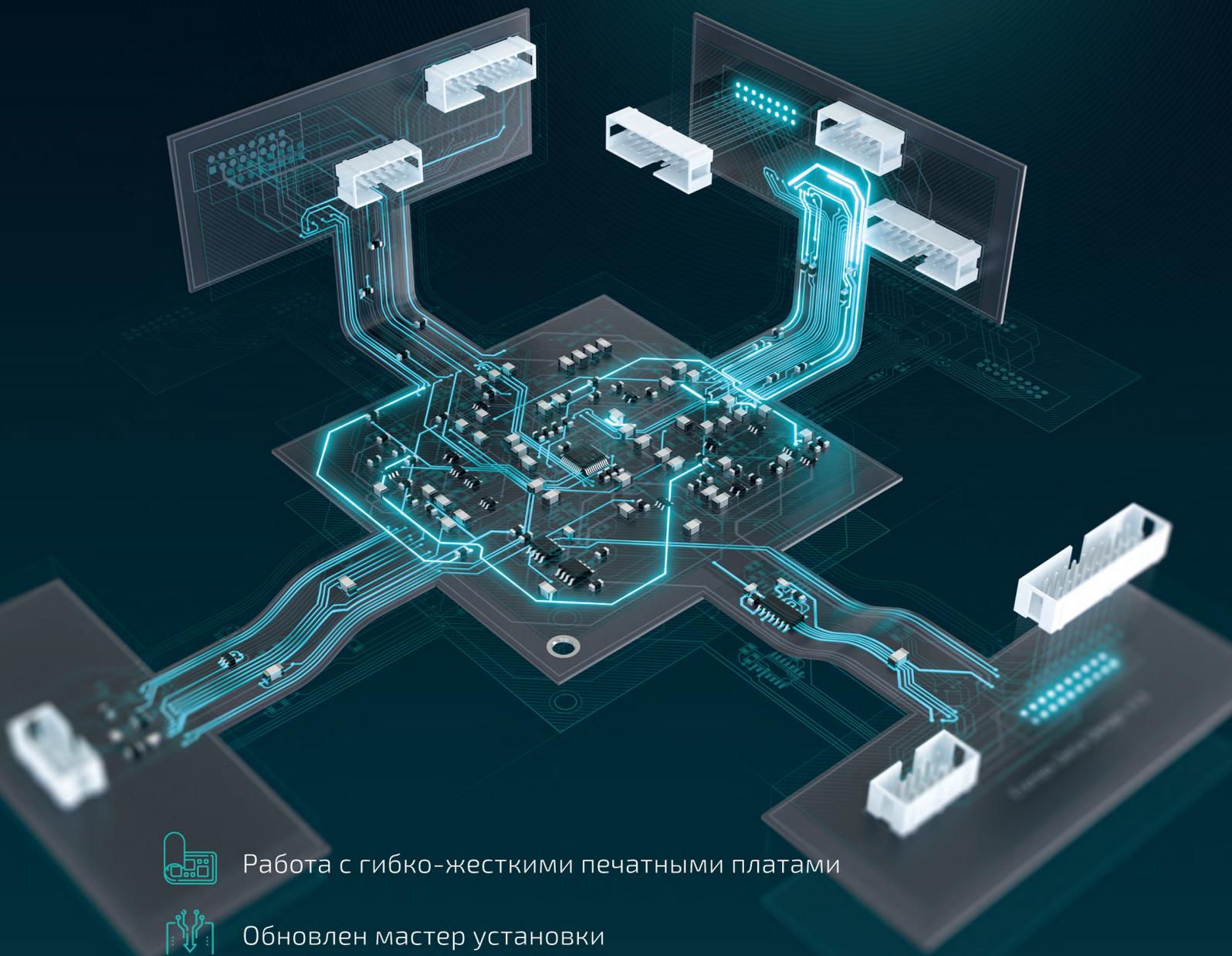
*Сергей Попов,
менеджер по продукту, ЭРЕМЕКС*



*Илья Корогодин и Елена Волнухина,
Лаборатория Навигационных Систем*

DeltaDesign 3.6

Новая версия российской САПР электроники



Работа с гибко-жесткими печатными платами



Обновлен мастер установки



Добавлены дисперсионные линии задержки в SimOne



Обновлены менеджер библиотек, редактор печатных плат, схемотехнический редактор



Чтобы получить консультацию по новой версии и внедрить САПР Delta Design на вашем предприятии, обратитесь к специалистам ЭРЕМЕКС