

ADVANTIX

ПРОМЫШЛЕННЫЕ РАБОЧИЕ СТАНЦИИ



**ВЫСОКАЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ**



**ПОДДЕРЖИВАЕМЫЕ
ФОРМАТЫ ПЛАТ
ATX, MATX, PICMG 1.3**



**ФОРМ-ФАКТОРЫ
2U, 4U, TOWER,
WALLMOUNT**



**УСИЛЕННОЕ
ИСПОЛНЕНИЕ КОРПУСА**



**ВЫСОКАЯ
НАДЕЖНОСТЬ**



**ПОВЫШЕННАЯ
ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНИХ
ВОЗДЕЙСТВИЙ**



**ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ
РЕБРА ЖЕСТКОСТИ**



**ГОРЯЧАЯ ЗАМЕНА
ПЫЛЕВЫХ ФИЛЬТРОВ**

- Промышленные системные платы повышенной надежности для работы 24/7
- Любые встраиваемые процессоры Intel 8 и 9 поколений
- Оперативная память до 64 ГБ nonECC или с поддержкой ECC
- Поддержка RAID 0, 1, 10, 5
- Хранение данных: SSD или HDD диски – внутренние или с горячей заменой
- Опции расширения: видеокарты, COM-порты, платы ввода-вывода и другие
- Поддержка Windows 10/11, а также российских ОС: Astra Linux, Alt Linux, РедОС

Новые DC/DC-конвертеры DDRH и RSDH до 1500 В для высоковольтных сетей



ПРИМЕНЕНИЯ

- ◆ Станции зарядки электромобилей и электробусов
- ◆ Ж/д транспорт
- ◆ Системы хранения энергии
- ◆ Альтернативная энергетика
- ◆ Телекоммуникационные центры
- ◆ Центры обработки данных





Здравствуйте, уважаемые друзья!

Как всегда, мы рассказываем вам о перспективных разработках и новинках, знакомим с актуальной для отечественных разработчиков компонентной базой и новыми технологиями в области микроэлектроники. Уже довольно продолжительное время по просьбам читателей мы не только публикуем материалы в бумажном виде, но и выкладываем их на сайты журналов нашего издательства. Заботясь о повышении вашего удобства и комфорта, в настоящее время мы ведём работу по созданию единого новостного портала издательства в Интернет. В результате появится ещё более информативный ресурс с новыми интересными возможностями как для наших читателей, так и для авторов и рекламодателей. О начале функционирования портала мы обязательно вас известим отдельно. Кстати, знаете ли вы, что...

... Читать и обсуждать статьи, публикуемые в журналах нашего издательства «СТА-Пресс» – «Современной электронике» и «Современных технологиях автоматизации», можно уже сейчас свободно и совершенно бесплатно на наших сайтах www.soel.ru и www.sta.ru. Читайте на здоровье и делитесь ссылками с друзьями и коллегами!

... Прославиться в профессиональном сообществе, заслужив любовь и уважение наших многочисленных читателей, – не так уж сложно. Для этого нужно всего лишь прислать на адрес info@soel.ru материалы статьи, и мы с радостью обсудим с вами публикацию, которую прочитают тысячи наших подписчиков. Для нас статьи об отечественных достижениях в области электроники и промышленной автоматизации являются безусловным приоритетом, и мы особенно рады новым авторам, продвигающим российские разработки.

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. Хахимов
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, 2023

ЧИТАЙТЕ
ЖУРНАЛ



В ЭЛЕКТРОННОЙ ВЕРСИИ
на сайте soel.ru

И
В ПЕЧАТНОЙ ВЕРСИИ
по подписке

СОДЕРЖАНИЕ 7/2023

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

| | |
|------------|---------------------|
| AdvanteX | 43 |
| ADVANTIX | 2-я стр. обл. |
| Litemax | 59 |
| Raystar | 37 |
| RFCore | 39 |
| Компонента | 4, 23 |
| КОМПЭЛ | 4-я стр. обл., 1, 6 |
| Морион | 5 |
| Снежить | 1-я стр. обл., 6 |
| Суперайс | 5, 21 |
| ЭЛЕКОНД | 9 |
| ЭРКОН | 4, 11 |

Читайте в «СТА» № 3/2023:

ДОЛГО ЛИ УМЕЮЧИ:

используем возможности OPC UA по максимуму

ЧИНИТЬ НЕЛЬЗЯ, ПРОСТАИВАТЬ:

нужно ли обслуживать промышленную электронику

ИГОЛКА В СТОГЕ СЕНА:

как обрабатывают большие данные на производстве



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

РЫНОК

4 Новости российского рынка

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

7 Беспроводные локальные вычислительные сети связи. Новости мониторинговых решений

Надежда Любимая

14 Одномолекулярные аналоги электронных компонентов.

Часть 1. Перенос заряда через одну молекулу

Виктор Алексеев

24 Объединение человека и машины для совершенствования полупроводниковых технологий

Керен Канарик, Войцех Осовецкий, Ю Лу и другие

(перевод: Александр Малыгин)

30 Электронные системы фиксации сейсмической активности, сейсмометры, геофоны и датчики в системах контроля и безопасности

Антти Суомалайнен

40 Электронный самоликвидирующийся стимулятор восстановления повреждённых тканей на основе PLGA. Опыт США и России

Андрей Кашкаров

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

44 Тензодатчики деформации и акселерометры FBG-технологии с волоконно-оптической связью

Надежда Морозоватая

52 ПЛИС фирмы Gowin Semiconductor. Часть 3. Инструментальные средства программной поддержки и разработка аппаратной части проектов ПЛИС GOWIN

Павел Редькин

60 Новые DC/DC-конвертеры на DIN-рейку MEAN WELL для высоковольтных сетей постоянного тока

Игорь Елисеев

Новости российского рынка

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

Значимость качества соединения: разъёмы WEIPU

Существует множество отраслей, где требуются тесты и измерения для обеспечения безопасной и эффективной работы. Это касается сельского хозяйства, здравоохранения, обороны, телекоммуникаций, возобновляемой энергетики, светодиодного освещения, Интернета вещей и т.д. Измерительное оборудование, используемое для мониторинга и контроля процессов, критически важно для бесперебойной работы систем.

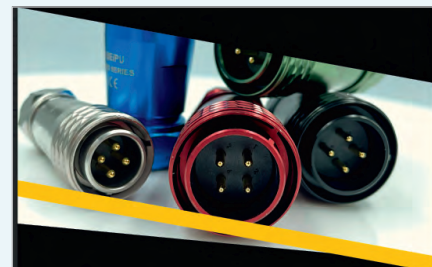
Качественным результатом измерительного оборудования является устойчивое и хорошее соединение. Надёжные и высококачественные разъёмы также обеспечивают производительность, точность и эффективность оборудования, что, в свою очередь, снижает затраты на передачу данных. Неправильное соединение увеличивает время, необходимое для процесса тестирования, и может привести к сбою теста с риском получения непра-

вильных результатов. В некоторых случаях тестовые и измерительные приборы должны работать в чрезвычайно сложных условиях: при экстремальных температурах, радиации, сильных ударах и взаимодействии с дождём, пылью и грязью.

Надёжное соединение является решающим фактором для качества измерительного оборудования, поэтому выбор надёжных и высококачественных разъёмов является первоочередной задачей для многих отраслей. Компания WEIPU предлагает высококачественные решения для точного измерения, тестирования и контроля при измерении температуры, влажности, давления, движения, скорости, вибрации и силы.

Популярные серии разъёмов:

- SP – пластиковый разъём с резьбовым соединением и защитой IP68;
- SF – латунный разъём с механизмом быстрого подключения (push-pull), рейтинг защиты IP67;



- WY – сплав цинка с замковым механизмом типа байонет, защита от вибрации и рейтинг защиты от IP55 до IP67. Доступны различные размеры;
- ST – резьбовой разъём из сплава цинка с рейтингом защиты IP67 и пазом диаметром 12 мм для монтажа на панель. Для консультаций по продукции WEIPU, пожалуйста, обратитесь к специалистам официального дистрибьютора WEIPU Connector в России – АО «Компонента».

www.komponenta.ru
+7 (495) 150-21-50

Отечественные чип-резисторы, адаптированные к требованиям стандарта AEC-Q200 и экологических директив

АО «НПО «ЭРКОН» представляет новую разработку – чип-резисторы P1-8B-... (A, I, C), адаптированные к требованиям стандарта AEC-Q200 (требования к компонентам автомобильной электроники) и экологическим нормам по ограничению содержания вредных веществ (директива RoHS или её аналоги).

Особенностью резисторов является бесвинцовая технология изготовления, подтверждение испытаниями на воздействие изменениями температуры среды (термошока) не менее 1000 циклов, влажной средой и другим видам воздей-



ствий по стандарту AEC-Q200. Дополнительной особенностью резисторов P1-8B с индексом «И» является стойкость к воздействию импульсов большой длительности, резисторов P1-8B с индексом «С» – стойкость к воздействию электростатического разряда.

Резисторы рекомендованы для применения в составе электронных устройств промышленного оборудования и автотранспортных средств с

Электрические характеристики резисторов P1-8B-... (A, I, C)

| Типоразмер | Номинальная мощность рассеяния Pном, Вт | Диапазон значений номинального сопротивления, Ом | Допускаемое отклонение сопротивления от номинального значения, % | | Предельное рабочее напряжение, В |
|------------|---|--|--|------------------------|----------------------------------|
| | | | P1-8B-...A | P1-8B-...И, P1-8B-...С | |
| 0402 | 0,063 | От 1 до 1×107 вкл. | ±2; ±5 | ±10; ±20 | 50 |
| 0603 | 0,1 | От 1 до 1×107 вкл. | ±2; ±5 | ±10; ±20 | 75 |
| 0805 | 0,125 | От 1 до 1×107 вкл. | ±2; ±5 | ±10; ±20 | 150 |
| 1206 | 0,25 | От 1 до 1×107 вкл. | ±2; ±5 | ±10; ±20 | 200 |
| 1210 | 0,33 | От 1 до 1×107 вкл. | ±2; ±5 | ±10; ±20 | 200 |
| 2010 | 0,5 | От 1 до 1×107 вкл. | ±2; ±5 | ±10; ±20 | 250 |
| 2512 | 1,0 | От 1 до 1×107 вкл. | ±2; ±5 | ±10; ±20 | 300 |

Характеристики импульсного режима резисторов P1-8B с индексом «И»

| Типоразмер | Номинальная мощность рассеяния Pном, Вт | Параметры импульсного режима (не менее 1000 импульсов) |
|------------|---|--|
| 0402 | 0,063 | Римп = 3 Вт, τ = 1 мс, T = 10 с |
| 0603 | 0,1 | Римп = 8 Вт, τ = 1 мс, T = 10 с |
| 0805 | 0,125 | Римп = 12 Вт, τ = 1 мс, T = 10 с |
| 1206 | 0,25 | Римп = 20 Вт, τ = 1 мс, T = 10 с |
| 1210 | 0,33 | Римп = 40 Вт, τ = 1 мс, T = 10 с |
| 2010 | 0,5 | Римп = 50 Вт, τ = 1 мс, T = 10 с |
| 2512 | 1,0 | Римп = 100 Вт, τ = 1 мс, T = 10 с |

требованиями повышенной эксплуатационной надёжности при высоком уровне импульсных помех и высокой вероятностью возникновения электростатических разрядов.

По вопросам приобретения представленной, а также разработки аналогичной продукции по требованию заказчика можно обратиться в группу развития бизнеса АО «НПО «ЭРКОН» по адресу электронной почты mozulyakinae@erkon-nn.com или по телефону +7 (831) 202-25-52, доб. (261).

С другими изделиями, выпускаемыми АО «НПО «ЭРКОН», можно ознакомиться на официальном сайте.

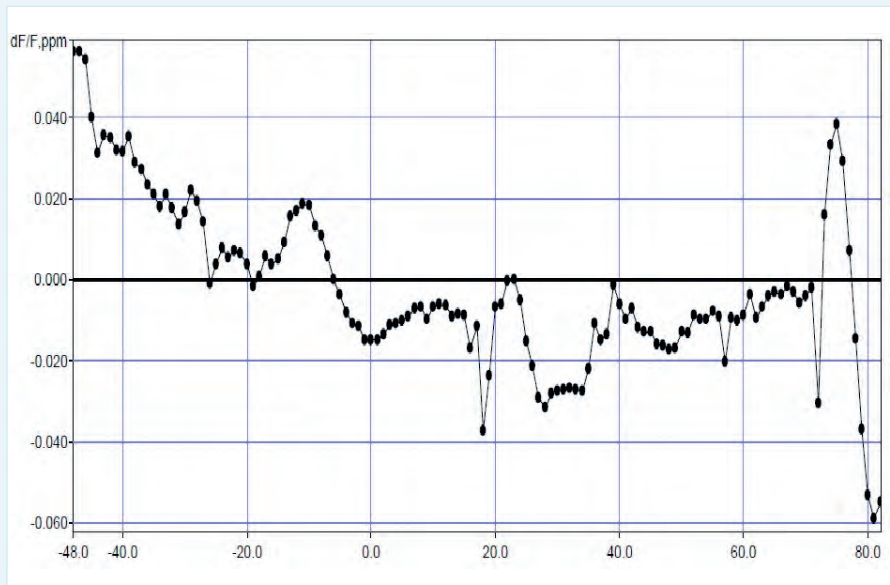
www.erkon-nn.ru
+7 (831) 202-25-52
+7 (831) 465-64-31

Прецизионный термокомпенсированный кварцевый генератор ГК415-ТК от АО «Морион»

АО «Морион» (Санкт-Петербург), ведущее предприятие России и один из мировых лидеров в области разработки и серийного производства пьезоэлектронных приборов стабилизации и селекции частоты, сообщает о разработке нового термокомпенсированного генератора ГК415-ТК категории качества ОТК. Благодаря своей высокой долговременной и температурной стабильности он в некоторых случаях может использоваться вместо термостатированных кварцевых генераторов, при этом обладая существенно меньшим потреблением и быстрым выходом на режим.

Основные характеристики генератора ГК415-ТК.

- Диапазон частот: от 9,8 до 20 МГц.
- Ток потребления: менее 11 мА.
- Выход на режим: менее 2 с.
- Температурная стабильность: до $\pm 5 \cdot 10^{-8}$.
- Интервал рабочих температур: от -50 до $+85^\circ\text{C}$.



- Долговременная стабильность: до $\pm 4,5 \cdot 10^{-7}$ в течение наработки 50 000 ч.
- Габаритные размеры: $36 \times 27 \times 10$ мм.
- Корректировка частоты по протоколу I²C.
- Напряжение питания: 5 В и 12 В.
- Выходной сигнал: SIN.

Основные области применения: телеком-

муникационное оборудование, переносные радиостанции, навигационные приборы, тактирование для точных счётчиков.

Дополнительную информацию по этому и другим изделиям можно узнать по тел. +7 (812) 775-17-94, а также на сайте АО «Морион» www.morion.com.ru.

Портативные осциллографы Micsig для требовательных задач

Компания «Суперайс» является официальным дистрибьютором Shenzhen Micsig Instruments Co., Ltd., производителя портативных осциллографов и пробников под торговой маркой «MICSIG».

Осциллографы используются для решения таких задач, как:

- диагностика, ремонт и обслуживание электронных устройств в полевых условиях;
- исследование электрических сигналов бортовых систем автомобилей, датчиков и электроприводов;
- тестирование и отладка систем энергоснабжения на промышленных объектах;
- контроль качества производства электроники.

Производимые компанией устройства имеют компактный и эргономичный корпус. Они также оснащены встроенным Li-Io аккумулятором, обеспечивающим автономную работу до пяти часов. Экран с разрешением 1280×800 пикселей, а также современный пользовательский интерфейс обеспечивают полностью сенсорное управление.

Встроенная память на 32 Гбайт предназначена для хранения снимков и видеозаписей осциллограмм регистрируемых сигналов. Обращение к внутренней памяти возможно через классический USB Host



стандарта 3.0, порт USB Type-C, а также по беспроводной связи Wi-Fi.

Все устройства Micsig оснащены функцией демонстрации экрана путём подключения дополнительного монитора к порту HDMI. Также в них реализована поддержка удалённого управления. Оно осуществляется через специализированное компьютерное программное обеспечение либо мобильное приложение на базе Android или iOS.

Компания предлагает два вида устройств: универсальные и для автомобильной диагностики.

Серия автомобильных осциллографов АТО позволяет проводить диагностику датчиков, цепей питания и зажигания, выполнять различные комбинированные тесты. Устройства поддерживают работу с протоколами: CAN, CAN FD, LIN, Flexray и K-line.

Серия универсальных осциллографов ТО поддерживает БПФ и продвинутые математические операции, декодирование сигналов UART, LIN, CAN, SPI и I²C. Они имеют 4 аналоговых канала, полосу пропускания до 300 МГц и частоту дискретизации до 2 ГВ/б/с.

Также компания предлагает сверхкомпактные устройства серии Smart: STO1004 и SATO1004. Они оснащены сенсорным 8" экраном, а также боковой панелью с многофункциональными кнопками и 5-позиционными джойстиками. Такое исполнение будет комфортно пользователям, предпочитающим сочетание мобильности и классических органов управления.

Компания «Суперайс»
www.supereyes.ru
+7 (800) 550-13-57

Импортозамещение соединителей Harting серии HAN от АО «Завод «Снежеть»

АО «Завод «Снежеть» – разработчик и производитель соединителей специального и производственно-технического назначения. Является активным участником государственной программы по импортозамещению. В 2016 году были разработаны промышленные силовые разъёмы СНП356 (аналоги серии Han фирмы Harting).

В номенклатурную линейку входят контактные вставки (вилка, розетка) и модульные вставки (модуль-вилка, модуль-розетка), кабельные и блочные кожухи, а также защитные крышки, кабельные вводы, контакты. В соответствии с группой исполне-

ния возможно применение винтовых, обжимных или пружинных контактов. Соединители СНП356 выпускаются одного типа, 23 типонаименований, 92 типоконструкций.

Виды монтажа в аппаратуре:

- объёмный под обжатие одиночных проводов;
- объёмный винтовым способом присоединения одиночных проводов;
- объёмный пружинным способом присоединения одиночных проводов.

Способ сочленения частей соединителя – врубной, уровень защиты коммутирующих цепей от влияния электромагнитных полей и радиочастотных излучений – неэкранированный.

Технические условия: ВЖАЯ.430424.002ТУ (ОТК), IP68.



Ведутся совместные работы с предприятиями по созданию новых номенклатурных линеек в рамках программы импортозамещения. Предприятие находится в поисках сложных наукоёмких работ по созданию электротехнических изделий, не уступающих импортным аналогам.

www.sneget.ru
+7 (4832) 78-88-33

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

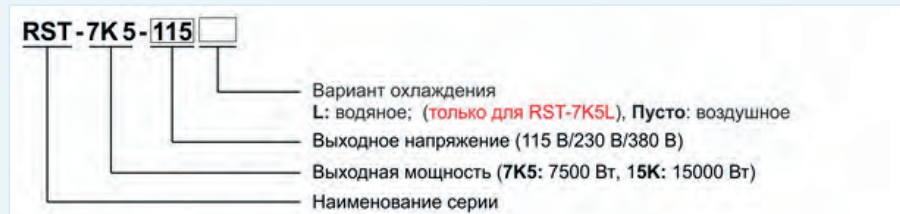
Новые RST-7K5/15K – мощные и надёжные ИП от MEAN WELL для промышленного технологического оборудования

Компания MEAN WELL разработала новое семейство мощных трёхфазных источников питания для промышленного технологического оборудования (электролиз и др.), централизованного питания шины, высоковольтных зарядных систем, мощного лазерного оборудования – RST-7K5 и RST-15K – мощностью 7,5 кВт и 15 кВт соответственно.

Данные источники питания во многом схожи с аналогичной новой продукцией – SHP-10K, но не имеют возможности управления по цифровой шине, зато обладают более широким диапазоном по аналоговому управлению внешним напряжением (1...120%) и предназначены для систем, в которых управление по цифровому интерфейсу является избыточным. Номинальное выходное напряжение ИП имеет значения 55, 115, 230, 380 В (DC) с возможностью ручной подстройки. Источники питания допускают параллельное включение до четырёх штук для 7,5 кВт и до двух штук для 15 кВт с КПД на уровне 95%. В ИП реализованы сигналы контроля и мониторинга основных параметров: перегрева, DC-OK, AC-OK и неисправности вентилятора. Имеются дистанционное включение-выключение (ON-OFF) и дополнительный канал напряжения (12 В / 0,1 А). Источники питания могут работать при полной нагрузке в диапазоне температуры –30...+45°С. Высота изделий – менее 2U, что позволяет их устанавливать в стандартные 19-дюймовые RACK-стойки. Серия RST-7K5 выпускается в двух конструктивных вариантах: с воздушным охлаждением

Основные параметры ИП RST-7K5 и RST-15K

| Наименование | Выходная мощность, кВт | Выходное напряжение, В | Температурный диапазон, °С | Возможности | Особенности |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|---|
| RST-15K-115/230/380 | 15 | (90...400 В) 115/230/380 В | –30...+70 | ККМ, регулируемый, компенсация на проводах, параллельное включение, дистанционное Вкл/Выкл, сигнал DC OK, AC OK, дополнительный выход 12 В, контроль вентилятора | воздушное охлаждение |
| RST-7K5-115/115L/230/230L/380/380L | 7,5 | (90...400 В) 115/230/380 В | | | воздушное охлаждение/ водяное охлаждение |



Расшифровка наименования

и с водяным охлаждением (символ L в наименовании). Гарантия на продукцию – 5 лет.

Источники питания уже доступны для заказа в РФ. Кроме того, в настоящий момент в РФ можно приобрести ИП на 3 кВт с напряжением 120/250/400 В серии CSP-3000.

Особенности:

- мощность 7,5 кВт и 15 кВт;
- трёхфазный вход;
- выходное напряжение 55, 115, 230, 380 В (DC);
- управление выходными параметрами в широких пределах с помощью внешнего напряжения;
- высокий КПД 95%;
- выбор модели с воздушным или водяным охлаждением (только для 7,5 кВт);
- параллельное соединение (до 4/2 шт. в

зависимости от серии);

- полная выходная мощность в диапазоне температуры –30...+45°С;
- комплекс защитных мер;
- встроенные сигналы контроля ВКЛ-ВЫКЛ, DC-OK, AC-OK, перегрев, неисправность вентилятора;
- 5 лет гарантии.

Применение:

- питание промышленного технологического оборудования;
- электролиз;
- централизованное питание шины;
- высоковольтные зарядные системы;
- зарядные станции для электромобилей;
- мощные лазерные установки;
- тестовое оборудование;
- мощное передающее оборудование.

Беспроводные локальные вычислительные сети связи. Новости мониторинговых решений

Надежда Любимая

Пользователей ожидает рост количества устройств с подключением к Интернету в ближайшие годы. Соответственно, растут и различные электронные сети обмена информацией. Перспективный тренд актуален и для России. Специалисты РЭА озадачены – как организовать мониторинг БЛВСС, эффективно управлять большими сетями и какие подходы в области локальной сетевой и серверной безопасности использовать. В статье представлены некоторые доступные решения по ситуации и анализ развития направления.

В 24-м году XXI века уже недостаточно решить техническую проблему в определённый срок: важным стало определение проблематики до того момента, когда её заметил пользователь. Так характеризуется надёжное и устойчивое развёртывание сети Wi-Fi на стадионе, крупном аэропорте, беспроводной сети для заказчика с многофилиальной структурой. Всё это решения, рассчитанные на более чем 1 тыс. точек доступа и возможных подключений, и тенденция к росту этого количества продолжается. Особенности современной ИТ-инфраструктуры таковы, что объёмы передаваемых данных растут, увеличивается нагрузка на беспроводные сети и затраты на обслуживание филиалов. Сбой в работе сетей или их элементов может привести к финансовым и репутационным рискам. Поэтому важно обеспечить широкому кругу пользователей безопасную доступность сервисов и приложений БЛВСС, создав устойчивую технологическую инфраструктуру, и тем самым подготовиться к вызовам времени с помощью многофакторного мониторинга. Интересно, что Москва – уже сегодня один из ведущих мегаполисов мира по качеству, скорости и покрытию сотовой связи и мобильного Интернета. По заявлениям структур мэрии, сетями LTE покрыто более 99,7% территории столицы России.

Сопутствующие решения для БЛВСС

А пока, по сообщению столичного градоначальника от 4 февраля этого года, метро Москвы по согласованию с

ГРЧЦ получило новые каналы – радиочастоты для управления беспилотными поездами. «Также прорабатываем возможность внедрения автономного хода и беспилотного управления», – добавил действующий градоначальник, мэр Москвы с 21 октября 2010 года С.С. Собянин. Журналисты тут же, без административных намёков, разумеется, раздули инфоповод до вселенского значения, а на самом деле желательно читать первоисточник. Есть большая разница между «прорабатываем возможность» и внедрением проекта в реальность. Таким образом, анонсировано, что Московский метрополитен готов к запуску беспилотных поездов. Надо заметить, что управление по радиоканалу под землей имеет свои характерные особенности – именно поэтому вдоль тоннелей (иногда это видно и на станциях) везде по линии протянут кабель – антенна. Другая антенна в кабине локомотива. Поезда метро уже много лет управляются в принципе дистанционно, в автоматизированном режиме. Поезд на электрической тяге несложно остановить, обесточив «третий рельс», который спрятан под защитным кожухом слева по ходу движения состава. Также дистанционно можно вызвать экстренное торможение состава и управлять набором скорости. К сожалению, или к счастью, дистанционно не получается управлять поездом метро в части изменения вправо-влево направления движения, несмотря на то, что в старых локомотивах рядом с машинистом было «колесо», напоминающее руль; состав может двигаться только

прямолинейно и с реверсом, а машинист нужен только для реагирования в экстренных ситуациях. Также сообщалось, что и в Казанском метрополитене будут использовать беспилотные ж.-д. составы. В 2019 году в Москве собирались пустить «беспилотный трамвай», в 2020-м Минтранс и РЖД пытались создать виртуальный полигон для беспилотных поездов. В 2021 году «Российские космические системы» создали платформу для управления беспилотными поездами через ГЛОНАСС. В текущем 2023-м анонсировали пуск электропоезда «Ласточки» без фактического, кроме экстренных случаев, управления машинистом. О беспилотных электромобилях журнал «Современная электроника» также неоднократно сообщал. Понятно, что все подобные проекты реализуются несколько позже громких анонсов, но всё же шаги к этому осуществляются. Тут важно другое – по теме нашей статьи – понять, что реализация анонсированных инициатив немыслима без подготовки безопасного применения управления и связи по БЛВСС. Итак, столичная подземка получила радиочастоты, с помощью которых можно управлять «беспилотными поездами». Также в нашей стране анонсировали систему, способную с помощью компактных сейсмических датчиков определять движение людей и элементы техники на условно большом расстоянии. На рис. 1 представлен внешний вид системы.

ТАСС сообщило, что цифровое устройство сейсмического мониторинга разработано специалистами концерна «Созвездие» (входит в «Росэлектронику»). Система сейсмического мониторинга местности состоит из датчика размером 20 см, электронного модуля, антенны и ПО, совместимого с любым типом операционных систем, включая мобильные устройства. Радиус действия одной антенны составляет 10 км, она способна контролировать 50–70 датчиков, зона продуктивной работы которых составляет до



Рис. 1. Внешний вид датчика системы сейсмического дистанционного мониторинга

400 метров [7]. Из новостной ленты ясно, что разработка отмечена золотой медалью Московского международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед». Всё же великие изменения ждут современную электронику, как направление развития, уже в ближайшие годы.

Многообразие доступных цифровых сервисов прямо связано с применением современных технологий управления городской инфраструктурой и новых сервисов для горожан в проекции перспективного развития виртуальной и дополненной реальности, IoT и робототехники с применением дистанционно управляемых моделей (беспилотных средств доставки услуг). Отсюда ясно, что для обеспечения прогресса и конкурентной способности в цифровой век необходимо развивать и совершенствовать инфраструктуру безопасной связи в формате БЛВСС.

Особенности конструктивного поиска решений разработчиками РЭА

В проекции особенностей технической мысли разработчиков РЭА, несомненно, важен гиперсистематизирующий склад ума, он позволяет экспериментировать с закономерностями и последовательностями, приводит к новым изобретениям и открытиям. Около 40 000 лет назад некий древний человек на территории современной Германии взял кость и превратил её во флейту – на сегодняшний день самый старый музыкальный инструмент в мировой истории. Составляющие действия: изготовление флейты из кости, создание последовательности звуков через продувание напором воздуха сквозь кость изо рта, совершенствование флейты путём производства в кости новых отверстий, всё это – механизм систематизации исходных данных. То, что свойственно сегодня пытливному уму разработ-



Рис. 2. Вид многофункционального роутера AIR-AR18321-R-K9

чиков РЭА. Создание новых и подчас сложных инноваций, инструментов характеризуется паттерном «если-и-тогда». Казалось бы, музыка – не более чем последовательность (ритмическая и тональная) алгоритмов, которые можно изменять, используя правило «если-и-тогда». Но в итоге воздействие на человека последовательности звуков, музыки порой приобретает колоссальное значение в искусстве и даже порождает другие искусства и изобретения [5]. Чтобы переживать креативный эмоциональный опыт, нужно уметь распознавать данные как набор паттернов. Тот же механизм систематизации, сделавший возможным создание костяной флейты древним человеком, ответственен за изобретение текстовых сообщений, а в наши дни – за инновации в области БЛВСС [2].

Проблемное поле БЛВСС

Проблемное поле в трудности предсказания пропускной способности сети для приложений в отдельный момент времени. Электронные контроллеры при перенастройке радиочастотного плана не контролируют взаимодействие между точками доступа в развёрнутой Wi-Fi-сети в зданиях с большим количеством помехообразующих факторов [4]. Практически обеспечить «прозрачность» прохождения беспроводного сигнала, повышенную видимость в сложных и удалённых условиях – такова, с одной стороны, задача развития отрасли, а с другой – задача противодействия новым вызовам времени (конкуренция и безопасность коммуникаций, проблема несанкционированного доступа и похищения данных). Таковы решения, ожидаемые от разработчиков РЭА и в целом электронных технологий в ближайшие месяцы.

Тенденции и решения

Телеком-рынок – основной мотиватор и стимулятор технологий развития

беспроводной связи, в том числе формата Wi-Fi и последующих, более совершенных. В числе компаний-лидеров по объёму контрибуции условно нового стандарта – Huawei, Qualcomm, Intel. Причём главная задача практико-ориентированных специалистов РЭА – создание надёжной технологической инфраструктуры беспроводной сети. На рис. 2 представлен вид многофункционального роутера AIR-AR18321-R-K9, установленного с помощью автора в системе БЛВСС в НМИЦ им. В.А. Алмазова Минздрава России (Санкт-Петербург).

В журнале «Современная электроника» № 2 за 2023 г. на с. 51 сообщается о возможной технологии слежки за людьми с помощью Wi-Fi-роутера. Раскроем анонс найденных исследователями из университета Карнеги-Меллон возможностей дистанционного контроля и вариант – «наблюдение» за одушевлёнными подвижными объектами с помощью Wi-Fi, когда роутер – раздатчик сигнала установлен в смежных и других помещениях. Таким образом, можно «видеть сквозь стены» [9]. Технология с использованием БЛВСС позволяет дистанционно определять позы и положение людей и отображать их в формате 3D. В сравнении с известными и типичными формами наблюдения (камеры слежения, радарные технологии и др.) инновационная идея способна стать прорывной в области здравоохранения, безопасности, и даже игр (VR), а также будет востребована в других отраслях. Возможный контроль «через стены и перегородки» с помощью БЛВСС и формата Wi-Fi позволит решить типичную проблему камер наблюдения – плохое освещение и составит конкуренцию радарным датчикам, LiDAR, кроме того, данное техническое решение дешевле и экономичнее по энергопотреблению. Кроме того, камеры видеонаблюдения не обладают конфиден-

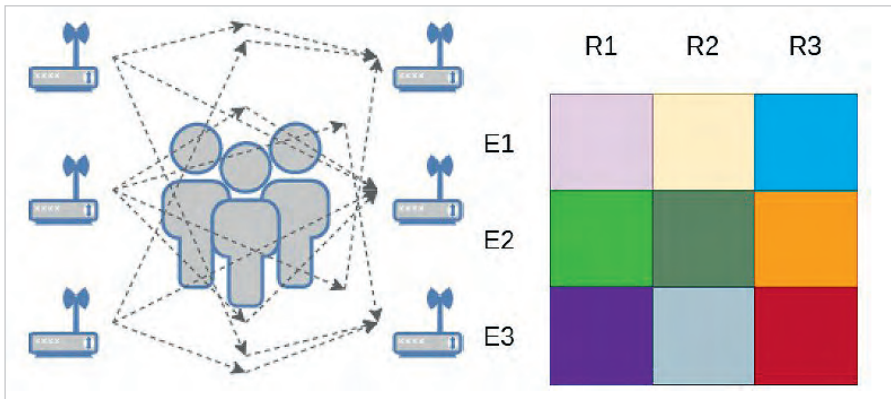


Рис. 3. Иллюстрация метода получения каркасного изображения человека с помощью отражённого сигнала Wi-Fi (CSI)



Рис. 4. Иллюстрация оценки позы объекта по отражённому сигналу Wi-Fi в сценариях с окклюзией. Стандарт антенн 6Dbi PR-SMA 2,4 ГГц

циальностью. При совершенствовании этой технологии, что, несомненно, дело ближайших лет, а не столетий,

людям даже на бытовом уровне открываются новые возможности. Подробнее об этом в первоисточнике [9].

Из условных «минусов» уместно говорить о том, что люди могут потерять доверие к Wi-Fi-маршрутизаторам в типичном (незащищённом) формате. Поэтому следующий шаг и внимание разработчиков направляются на пути повышения безопасности БЛВСС и устойчивости их к несанкционированным попыткам контроля. Итак, инновационный метод не лишён недостатков, но он может быть усовершенствован. На рис. 3 дана иллюстрация принципа определения границ и граней объектов с помощью Wi-Fi и в целом БЛВСС дистанционно и сквозь стены.

Данные CSI дискретизируются с частотой 100 Гц как комплексные значения в 30 различных поднесущих частотах, линейно разнесённых в диапазоне 2,4 ГГц ±20 МГц и передающихся между тремя антеннами-источниками и тремя приёмными антеннами. Технология DensePose разработана на основе трёхмерных изображений одушевлённых, имеющих способность теплового наполнения и отражения сигнала в RGB-проекции. Интеллектуальный анализ осуществляется на информации о состоянии канала

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭЛЕКОНД

оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы
 K50-15, K50-17, K50-27, K50-29, K50-37, K50-68, K50-77, K50-80, K50-81, K50-83, K50-84, K50-85, K50-86, K50-87, K50-88, K50-89, K50-90, K50-91, K50-92, K50-93, K50-94, K50-95(чип), K50-96, K50-97(чип), K50-98, K50-99, K50-100, K50-101(чип), K50-102, K50-103, K50-104, K50-105, K50-106

объемно-пористые танталовые конденсаторы
 K52-1, K52-1M, K52-1БМ, K52-1Б, K52-9, K52-11, K52-17, K52-18, K52-19, K52-20, K52-21, K52-24, K52-26(чип), K52-27(чип), K52-28, K52-29, K52-30

оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы
 K53-1А, K53-7, K53-65(чип), K53-66, K53-68(чип), K53-69(чип), K53-71(чип), K53-72(чип), K53-74(чип), K53-77(чип), K53-78(чип), K53-79(чип), K53-80(чип), K53-82

ионисторы (суперконденсаторы)
 K58-26, K58-27, K58-28, K58-29, K58-30, K58-31

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

КОНДЕНСАТОРЫ
разработка и производство

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

Реклама

Таблица 1. Технические характеристики модуля Up Squared Pro 7000 с разными вариантами процессоров

| Чип | Ядра | Потоки | Частоты | L3 кэш | CPU | Мощность |
|--------------|------|--------|------------|---------|----------------------------|----------|
| Core i3-N305 | 8 | 8 | До 3,8 ГГц | 6 Мбайт | Intel UHD 32EU до 1,25 ГГц | 15 Вт |
| Intel N97 | 4 | 4 | До 3,6 ГГц | 6 Мбайт | Intel UHD 24EU до 1,2 ГГц | 12 Вт |
| Intel N50 | 2 | 2 | До 3,4 ГГц | 6 Мбайт | Intel UHD 16EU до 750 МГц | 6 Вт |

Wi-Fi (CSI), соотношении между волной передаваемого сигнала и волной принятого сигнала. Данные обрабатываются с использованием архитектуры нейронной сети с компьютерным зрением, и так выполняется оценивание изменения граней, то есть позы человека. Чтобы упростить и таким образом ускорить создание каркасной визуализации человека, исследователи условно разбили человеческую фигуру на 24 сегмента [9]. UV-координаты поверхности человеческого тела выявляются из сигналов Wi-Fi с использованием трёх компонентов. Сначала первоначальные CSI проходят через амплитудную и фазовую очистку, затем декодируются с преобразованием CSI до 2D-карт объектов, которые уже можно позиционировать как изображения для визуализации. 2D-объекты передаются в модифицированную архитектуру DensePose-RCNN для оценки UV-карты, представления соответствия между 2D- и 3D-изображениями одушевлённых предметов. Точность локализации заявлена около 0,5 метра – из-за случайного фазового сдвига, допускаемого стандартом связи IEEE 802.11 n/ac, и помех электронным устройствам в аналогичном диапазоне частот (микроволновая печь и даже сотовые телефоны). Для решения задачи исследователи обратились к архитектуре глубокого обучения в компьютерном зрении и нейронной сети, которая может выполнять оценку позы по сигналам Wi-Fi. Рис. 4 иллюстрирует, как алгоритм может оценить позу, используя сигнал Wi-Fi в сценариях с окклюзией и несколькими людьми [9].

Так, исследователи пытались контролировать обучение сети трансляционной модальности и Wi-Fi-DensePose RCNN на основе Wi-Fi предварительно обученной сетью на основе 2D-изображений. Напрямую готовить сеть на основе Wi-Fi вместе с сетью на основе изображений не получилось,

так как сети получают входные данные из разных доменов. Тем не менее обнаружение движущихся объектов без видеочамер или датчиков LiDAR (Light Detection and Ranging) не является новым. В 2013 году исследователи из Массачусетского технологического института уже презентовали способ использования сигналов сотовых телефонов для «игнорирования стен», а в 2018 году их коллеги усовершенствовали версию описанной выше технологии [9].

Элементная база

Для обеспечения скоростной связи в БЛВСС, в том числе в формате Wi-Fi, и с претензией на надёжность необходимо совершенствование элементной базы сетевого оборудования и, в частности, роутеров, точек доступа и «раздачи» беспроводного сигнала. Производители одноплатных компьютеров регулярно выпускают новые модели, и среди них есть задействованные в БЛВСС – платы с электронными компонентами для DIY-систем и с RISC-V-чипами. Как пример, приводим разработку компании Pine64 (известна производством «умных» паяльников, модульных телефонов и др. РЭА). На плате установлен процессор StarFive JH7110 (SiFive U74 1.5GHz) на базе архитектуры RISC-V. Девайс оснащён 128 Мбайт QSPI NOR Flash, 2.4GHz/5Ghz MIMO Wi-Fi 802.11 b/g/n/ac, Bluetooth 5.2, двумя гигабитными Ethernet-портами, HDMI 2.0, слотом PCIe, SD Card, eMMC, 1 портом USB 3.0, 3 портами USB 2.0, аудио-разъёмом 3,5 mm, 40-pin GPIO. Размеры 133×80×19 мм. Подробнее об этом в материале [1].

Заслуживает профессионального внимания одноплатная система с процессором Rockchip RK3588S, поддержкой до 32 Гбайт ОЗУ, несколькими портами и разъёмами разного фактора и назначения. Устройство является усовершенствованной вер-



Рис. 5. Внешний вид усовершенствованной версии модели Orange Pi 5B образца 2023 года



Рис. 6. Вид сбоку модуля Up Squared Pro 7000

сией модели Orange Pi 5B, выпущенной в 2022 году. Но с новацией: появилась встроенная поддержка Wi-Fi 6 с модулем AR827EP и Bluetooth 5.0, а также модуль eMMC с объёмом памяти от 32 Гбайт до 256 Гбайт. Это делает её пригодной для применения в роутерах и системах БЛВСС. Внешний вид устройства представлен на рис. 5.

Ещё один вариант – модуль Up Squared Pro 7000 с процессором Intel Core i3-N305. Есть вариант чипа Intel N50 с 4 Гбайт ОЗУ и 32 Гбайт внутренней памяти. И вариант с Intel N97, Intel Atom x7425E, Core i3-N305 с максимальной комплектацией 16 Гбайт ОЗУ и 64 Гбайт внутренней памяти. Вид сбоку модуля Up Squared Pro 7000 представлен на рис. 6.

В табл. 1 представлены технические характеристики модуля Up Squared Pro 7000 с разными вариантами процессоров.

Дополнительно система оснащена слотами M.2 2280 и SATA 3, а также коннектором и слотом M.2 2230 E-Key для беспроводного модуля, а также имеется 40-пиновый разъём для расширения.

Технологии для эффективных беспроводных сетей

В предыдущих версиях стандарта Wi-Fi упор разработчиков сделан на увеличение пропускной способности, а при разработке Wi-Fi 6 стало понятно,

что в современных БЛВСС с большим количеством терминалов недостаточно только высокой скорости передачи данных. Технологии развиваются в направлении расширения функционала и эффективности БЛВСС – с соответствующим созданием конкретных моделей передачи данных. К примеру, такова организация множественного доступа с ортогональным частотным разделением каналов (Orthogonal frequency-division multiple access, OFDMA). При взаимодействии сразу нескольких устройств одновременно информация передаётся при том же служебном трафике, количество которого значительно не увеличивается, но результативность использования частотных радиоканалов повышается.

Джиттер и «инерция» в передаче сигнала сокращаются, и этим устраняются критичные для приложений пикселизация картинки (видеотрафик) и «разрывы» потока, а также эхо-эффект при передаче аудио (голосовых сообщений). Так, модуляция 1024-QAM определяет условный прирост скорости передачи данных на 25–30%. запатентованная технология Smart Antenna даёт увеличение радиуса покрытия до 30%.

Технология целевого времени пробуждения (Target Wake Time, TWT) обеспечивает экономию заряда элементов питания, что крайне важно для устройств (в том числе портативных) IoT, особенно когда данные передаются в канал управляемыми «порциями», по «расписанию», редко или непостоянно. Экономия батарей питания электронные платы и альтернативные источники пополнения заряда – вообще мировой тренд, и периодически мы узнаём об успехах разработчиков РЭА в этом направлении – готовится статья об оптоэлектронном беспроводном управлении в медицинских технологиях, а также получить представление по теме можно в [6].

Используются электронные средства, в том числе PLK для согласования совместной работы точек доступа для «уличных условий» с расширенным температурным диапазоном, в герметичном антивандальном корпусе и специального назначения, с обеспечением «скоростного» обмена данными в роуминге – с обеспечением защиты от несанкционированного вторжения в БЛВСС даже значительного масштаба. Продолжающаяся интеграция

Wi-Fi и IoT, в том числе с технологией Bluetooth Low Energy (BLE), уже позволяет подключать к системе универсальные модули Zigbee, RFID, Thread, UWB с помощью всего пары движущихся пальцев специалиста – в разъёмное соединение (доступный для расширения слот) подключается PCIe-модуль IoT. Как вариант, доступно альтернативное подключение того же модуля к USB-порту устройства доступа (роутера). Отсюда несомненная польза для разработчиков и потребителей системных решений в возможностях комбинированного подключения. Тем не менее дополнительно необходим более совершенный уровень мониторинга и контроля БЛВСС. С помощью усовершенствованной системы мониторинга нового поколения в условиях условно большого количества подключённых пользователей и их возможностей действуют программно определяемые сети (POS). В основном, это система мониторинга и управления нового поколения.

Функционал RADIUS сервера позволяет реализовать аутентификацию пользователей мультифакторным способом. Уже известные решения поиска и устранения неисправно-



ЭРКОН

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

ПРОИЗВОДСТВО, РАЗРАБОТКА И ПОСТАВКА ПОСТОЯННЫХ РЕЗИСТОРОВ, АТТЕНУАТОРОВ И ЧИП-ИНДУКТИВНОСТЕЙ

- Современная производственная база
- Высокое качество
- Индивидуальный подход к потребителю
- Изделия по вашему ТЗ

НОВИНКИ

Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (от 50 Вт-2000 Вт)
 Атенуаторы ПР1-25 (от 50 Вт - 2000 Вт)
 ТПИ - тепловые чип-перемычки
 СВЧ-резисторы Р1-160 (до 40 ГГц)
 Мощные СВЧ-резисторы Р1-170 (до 1000 Вт)
 Силовые резисторы Р1-150М (до 1500 В)

603104, Г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6.
 тел. : 8 (831) 202 - 24 - 34 (многоканальный)
 8 (831) 202 - 25 - 52 (отдел продаж)
 E-mail: gr@erkon-nn.ru
 www.erkon-nn.ru

Реклама



стей NCE-Campus и CampusInsight от Huawei позволяют выделить трафик в особый канал заранее зарезервированного сетевого ресурса. Это даёт как дополнительную защиту передачи данных, так и приоритет трафика, что устраивает на условно-бытовом уровне VIP-пользователей. Что касается критичной инфраструктуры, бизнес-сессий и относительно более защищённых (военных) решений, одним из вариантов по ситуации является ретроспективный анализ проблем пользователей с выявлением причин неисправности и консультационных возможностей по её устранению. Такой оптимизации БЛВСС очень способствуют алгоритмы Big Data в формате ИИ. Техническое решение аккумулирует большой объём статистических данных и может на их основе предсказывать поведение сети, учитывать в том числе 3D-модель локации, где развернута Wi-Fi-сеть, с тем чтобы прогнозировать препятствия и выполнить глобальную оптимизацию и «сброс» точек доступа при необходимости.

Такую систему можно развернуть на серверах или виртуальных машинах с обычной сетевой инфраструктурой – проводной или беспроводной – осуществлять тестовый обмен данными и анализировать результаты: статистику, предиктивную аналитику по работе сети, потенциальные пути её оптимизации [3].

Мониторинг беспроводной инфраструктуры необходим для обеспечения непрерывности бизнес-процессов и сервисов по всей инфраструктуре – в части не только Wi-Fi, но и технологических доменов, разнофакторных электронных устройств, приложений. Как правило, в крупных компаниях уже используются 5-6 различных точечных систем мониторинга, работающих в каждом крупном отделе; в результате может возникать рассогласованность действий между специалистами, отвечающими за работу сервера и сетевых подключений. Для решения существуют различные технологические продукты. К примеру, таковы системы мониторинга производительности сети (Network Performance Monitoring, NPM) с единой платформой контроля и безопасности. Альтернативные варианты тоже есть, к примеру, Omnis Security, куда входят продукты Arbor anti-DDoS, Cyber Investigator и др., а также решения по мониторингу качества работы сервисов и приложений – платформа Service Assurance. Последнее состоит

из двух решений: nGenius Pulse позволяет контролировать состояние проводной и беспроводной инфраструктуры, выполнять различные синтетические тесты для проактивной оценки работы приложений с точки зрения конечного пользователя. Второе в рамках Service Assurance – решение nGenius One уровня NPM через захват сетевого трафика, сетевых взаимодействий и последующий анализ работы приложений, транспортных протоколов, оценку замедлений и ошибок в работе приложений и быстром поиске проблем. При этом основным источником данных для nGenius One являются реальные сетевые пакеты, пакеты взаимодействия устройств [9]. При помощи технологий SPAN/RSPAN или с помощью трафика TAP и пакетных брокеров копии сетевого трафика передаются на специализированные коллекторы InfiniStream (программно-аппаратный комплекс) или vStream, затем после обработки и анализа пакеты передаются в виде Smart Data на основной компонент – сервер nGenius One, где производится визуализация графики и формируются отчёты. На дашбордах администраторы контролируют сервисы и работу приложений, с помощью встроенного функционала baselining-а обнаруживают отклонения и ошибки в автоматическом режиме. Решение nGenius Pulse используют для сбора информации о состоянии сетевой, беспроводной и серверной инфраструктуры с возможностями синтетических тестов от архаичного контроля доступности по ICMP, доступности TCP-порта, Wi-Fi-авторизации, загрузки канала связи до корректного, непрерывного и надёжного выполнения сценариев бизнес- и специальных приложений. Решение nGenius Pulse состоит из головного модуля – nGenius Pulse Server, SNMP коллектора и агентов nPoint в виде ПО для рабочей станции или отдельно. Отличительная черта связана с возможностью параллельных тестов по проводному и беспроводному каналам. Это оперативно выявляет проблемы в беспроводной инфраструктуре [3]. Надёжная беспроводная инфраструктура с помощью мониторинга БЛВСС – это измерение и контроль опыта конечного пользователя вне зависимости от типа сервиса, от приложения, и самое главное – вне зависимости от любого окружения, где этот сервис должен быть доступен. Подробнее о применении инструментов мониторинга беспроводных сетей можно узнать в [4].

Выводы

Сегодня важно обеспечить доступность сервисов и приложений, работающих через БЛВСС, в том числе POS-терминалы оплаты, товарные склады большого объёма (ритейл) с мобильными терминалами, везде, где устойчивость сети – ключевое звено безопасного и оперативного решения этих вопросов. Поэтому и требования к защищённым беспроводным сетям, что немислимо без систем их мониторинга, растут с каждым годом. Всё проанализированное подталкивает разработчиков к развитию новых технологий Wi-Fi с высокой скоростью передачи данных в условиях профессиональной конкуренции. Решения «починить всё» нажатием лишь одной волшебной кнопки пока не придумано. Но это не значит, что его в локальном или развёрнутом виде не случится завтра.

Литература

1. Апрельские «одноплатники»: 5 новых моделей для разработки корпоративных и DIY-проектов // URL: <https://habr.com/ru/companies/selectel/articles/729074/>.
2. Барон-Коэн С. Искатели закономерностей: Как аутизм способствует человеческой изобретательности / пер. с англ. М. Смирновой. М.: Альпина нон-фикшн, 2023. 320 с. // URL: <https://nplus1.ru/blog/2023/04/12/the-pattern-seekers>.
3. Возможности интеграции БЛВСС и их преимущества // URL: https://promo.croc.ru/wi-fi_monitor.
4. Инструменты мониторинга БЛВСС // URL: <https://www.tadviser.ru/a/634207>.
5. Кашкаров А.П. Как преодолеть творческий кризис? Ростов н/Д: Феникс, 2015. 154 с.
6. Кашкаров А.П. Новейшие разработки в области медицинской электроники для борьбы с вирусом и не только // Современная электроника. 2022. № 3 // URL: <https://www.soel.ru/online/noveyshie-razrabotki-v-oblasti-meditsinskoy-elektroniki-dlya-borby-s-virusom-i-ne-tolko/>.
7. «Росэлектроника» создала сейсмодатчики, способные чувствовать движение объектов за сотни метров // URL: <https://ruselectronics.ru/news/24725-roselektronika-sozdala-seysmodatchiki-sposobnye-chuvstvovat-dvizhenie-obektov-za-sotni-metrov/>.
8. Сообщено о технологии слежки за людьми с помощью Wi-Fi-роутера // Современная электроника. 2023. № 2. С. 51. URL: https://www.soel.ru/magazines/PRINT/SoEl_2023-2pr/2/.
9. DensePose из Wi-Fi // URL: <https://arxiv.org/abs/2301.00250>.
10. Сурабекян С. Учёные научились с помощью Wi-Fi «видеть» людей сквозь стены // URL: <https://3dnews.ru/1080498/signal-wifi-moget-bit-ispolzovan-chtobi-videt-lyudey-skvoz-steni-v-detalyah>.



НОВОСТИ МИРА

«Росэлектроника» разработала новое поколение СВЧ-приборов для космоса

Холдинг «Росэлектроника» Госкорпорации Ростех разработал лампы бегущей волны нового поколения для применения в космических аппаратах. Новые изделия более компактны и энергоэффективны, но при этом имеют рабочую полосу частот в 2 раза шире, чем предыдущие модификации подобных изделий. Образцы новых СВЧ-приборов впервые демонстрируются на форуме «Армия-2023».



Лампы бегущей волны (ЛБВ) предназначены для усиления мощности СВЧ-сигналов в бортовых радиопередающих трактах космических аппаратов связи.

ЛБВ, разработанные входящим в «Росэлектронику» НПП «Алмаз» при поддержке Минпромторга России, имеют двуханодные электронные пушки, что позволяет более гибко настраивать изделие и регулировать его режимы питания в более широком диапазоне. Благодаря применённым схемотехническим решениям потребляемая мощность новых СВЧ-приборов удалось сократить на 10 – 20%, а массогабаритные характеристики – на 15%.

«Новые ЛБВ соответствуют всем требованиям к электронно-компонентной базе радиопередающей аппаратуры спутников связи и других космических аппаратов. Нам удалось значительно повысить уровень технических характеристик по сравнению с предыдущими модификациями. ЛБВ не содержат импортных комплектующих, производство выполняется только по отечественной технологии, которая содержит ноу-хау и является интеллектуальной собственностью России. Конструкция данных изделий является базовой для разработки следующих поколений приборов с улучшенными параметрами,» – рассказал генеральный директор НПП «Алмаз» Михаил Апин.

Также на стенде «Росэлектроники» НПП «Алмаз» представило первые серийные ЛБВ с охлаждением коллектора методом излучения тепла в открытое космическое пространство. Данный тип приборов позволяет снизить тепловую нагрузку на систему обеспече-

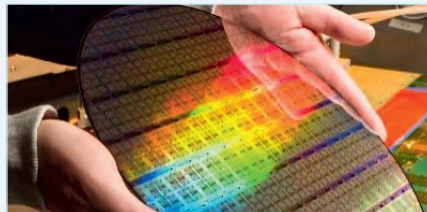
ния терморегуляции космического аппарата более чем в 2 раза, что, в свою очередь, увеличивает стабильность работы спутника в режимах приёма-передачи информации. Охлаждение ЛБВ методом инфракрасного излучения в открытое космическое пространство способствует уменьшению выделения тепла внутри космического аппарата и экономит энергию на функционирование системы охлаждения и терморегулирования.

Международный военно-технический форум «Армия-2023» проходит 14 – 20 августа в Конгрессно-выставочном центре «Патриот».

*industry-hunter.com
rbc.ru*

Минпромторг выделил более 9 млрд рублей на ОКР по выпуску чипов 65–250 нм

На российском портале госзакупок Минпромторгом объявлены тендеры на проведение ОКР по разработке отечественных технологий производства микрочипов по техпроцессам от 65 до 250 нм. Конечно, данные чипы уже «прошлый век», но спрос на них достаточно высок.



Данные тендеры в количестве пяти единиц и в виде открытых конкурсов имеют общую стоимость более 9 млрд рублей, а заявки будут приниматься до 17 июля с подведением итогов 21 и 26 числа. Причём выполнить все указанные работы подрядчики должны до 2026 года.

Победителям конкурсов предстоит произвести расчёты по ультрафиолетовым объективам и оптической системе лазера, подготовить проект-эскиз установки, всю необходимую документацию, включая конструкторскую с технологической, а также изготовить опытные образцы установки в количестве двух штук.

Как уже уточнялось, все заявленные в тендерах ОКР касаются технологических процессов производства полупроводников микросхем с топологией от 65 до 250 нм, тогда как российский «Микрон» сейчас способен выпускать микрочипы по технологическим нормам 90 – 180 нм, а освоенный им 65-нанометровый техпроцесс применяется лишь в штучных партиях изделий.

Здесь необходимо отметить, что зеленоградский «Ангстрем», который также занима-

ется выпуском полупроводниковой продукции, не раскрывает технологические нормы, применяемые в производстве, но они однозначно уступают тем, которые уже освоил «Микрон».

Помимо этого, к производству микрочипов с топологией 180 и 250 нм в ближайшей перспективе должны приступить на новосибирском «Востоке», но недавно сообщалось о том, что с запуском новой производственной линии на предприятии какие-то проблемы.

techcult.ru

Российские учёные создали диод с «односторонним движением»

Учёные из Центра компетенций НТИ «Фотоника» при Алфёровском университете разработали новый тип диода на основе нитрида галлия (GaN), который может применяться в различных электронных устройствах, включая космическую электронику. Этот диод с барьером Шоттки создан с использованием нитевидных нанокристаллов нитрида галлия.

Профессор Иван Мухин объяснил, что ни-



трид галлия является интересным полупроводниковым материалом, который может использоваться в создании нового поколения электронных компонентов для силовой электроники, сверхвысокочастотной электроники и оптоэлектроники. Он также отметил, что диоды Шоттки, основанные на энергетическом барьере между металлом и полупроводником, могут выполнять различные функции, например, преобразовывать переменный ток в постоянный или генерировать электромагнитное излучение.

Учёные Центра НТИ «Фотоника» синтезировали нитевидные нанокристаллы нитрида галлия и создали диоды, которые показали отличные характеристики в частотном диапазоне до 160 ГГц. Они отметили, что использование кремниевых подложек для синтеза нанокристаллов имеет экономические преимущества, так как кремний является основным материалом в полупроводниковой промышленности.

Этот прорыв в разработке диодов открывает новые возможности для создания компонентов систем связи следующего поколения, а также для различных датчиков и устройств Интернета вещей. Результаты исследования были опубликованы в журнале Nanotechnology.

ferra.ru

Одномолекулярные аналоги электронных компонентов

Часть 1. Перенос заряда через одну молекулу

Виктор Алексеев

В предыдущих номерах журнала была напечатана первая часть ознакомительного цикла публикаций «Квантовые электронные компоненты», посвящённая квантовым транзисторам. Данная статья знакомит читателей с другим широким классом наноэлектроники – одномолекулярными устройствами (single molecules device – SMD), которые основаны на свойствах органических молекул с двумя внешними электродами проводить туннельный ток.

Разнообразие, универсальность, возможность контроля и манипулирования делают проводящие органические молекулы потенциально важными компонентами наноэлектронных устройств. Сегодня разработка молекулярных полупроводниковых устройств является одним из наиболее перспективных направлений в микроэлектронике.

В то же время существует ряд серьёзных проблем, возникающих на пути к реальным технологическим приложениям.

Прежде всего, эти трудности связаны с необходимостью конструировать, контролировать и манипулировать небольшими молекулярными структурами с высокой степенью надёжности и воспроизводимости.

1. Введение

Одномолекулярные устройства (single molecules device – SMD) представляют собой особый тип устройств, которые состоят из одной молекулы, а не из традиционных полупроводниковых материалов. Теоретически эти сверхкомпактные устройства могут работать с беспрецедентной скоростью и эффективностью.

Первые разработки «одномолекулярных полупроводниковых устройств» относятся к началу 1970-х. Отправной

точкой этих исследований был поиск ответов на вопросы, как именно электрон в молекуле переходит с орбиты на орбиту и нельзя ли попытаться управлять этим процессом.

Американские химики из Университета Нью-Йорка Арье Авирам и Марк Ратнер в статье «Молекулярные выпрямители», опубликованной в журнале «Chemical Physics Letters» в 1974 году, впервые предложили концепцию выпрямителя, состоящего из органической молекулы с двумя выводами для подключения внешних устройств. Таким образом, впервые было показано, что органическая молекула в такой конструкции может работать как выпрямительный диод [1].

Кроме того, в этой статье, которая считается базовой в новом направлении «molecular electronics», были рассмотрены также проблемы, связанные с синтезом молекул с заданными электронными свойствами.

Концепция молекулярных устройств, представленная в этой статье, привела к разработке множества различных типов электронных молекулярных соединений и устройств, таких, например, как переключатели, выпрямители и активные сенсоры. В настоящее время

разработка молекулярных полупроводниковых устройств является одним из наиболее перспективных направлений исследований в современной микроэлектронике.

Молекулярная электроника зародилась на стыке физики и химии, объединив физическое понимание переноса заряда с инновационными химическими процессами и технологиями, позволяющими получать молекулы с самыми разнообразными свойствами.

По существу, молекулы в настоящее время являются единственными наименьшими элементами, которые могут быть синтезированы с предварительно заданными физико-химическими параметрами. Кроме того, молекулы являются идеальным вариантом стандарта определённого вещества, гарантированного самой природой. Все молекулы одной и той же формулы имеют абсолютно одинаковые характеристики. По крайней мере, так считает современная наука. С этой точки зрения молекулы могут служить идеальным базовым материалом для создания высокоточных нанополупроводниковых устройств, предназначенных для массового производства (рис. 1).

Производительность одномолекулярного устройства зависит от его способности управлять потоком электронов через молекулу, чего можно достичь, манипулируя химической структурой молекулы.

На электронные свойства молекулы, в том числе на её способность проводить электричество, прежде всего, оказывают влияние функциональные группы, представляющие собой определённые атомы или группы атомов, присоединённые к молекуле и отвечающие за её химические свойства. Поэтому разработка одномолекулярных устройств подразумевает изменение химической структуры молекулы путём добавления или удаления функциональных групп, необходимых для управления её электронными свойствами.

Одной из основных проблем SMD является их стабильность. Молекулы

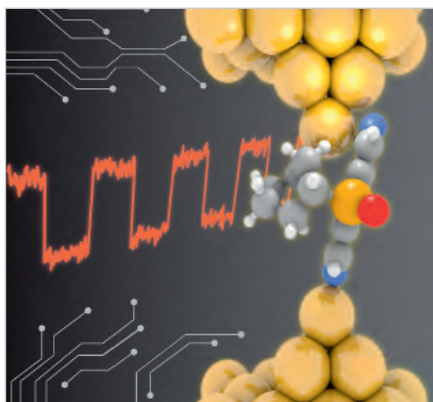


Рис. 1. Молекулы могут служить идеальным базовым материалом для создания высокоточных нанополупроводниковых устройств [2]

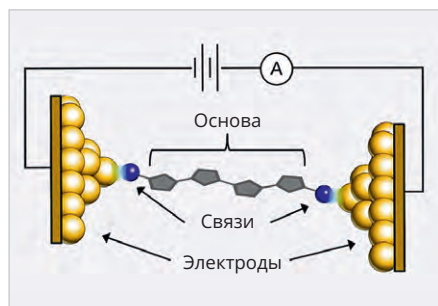


Рис. 2. Структурная схема простейшего электронного устройства на базе органической молекулы с золотыми электродами и выделенными связующими группами [3]

по своей природе динамичны и могут претерпевать изменения, влияющие на их электронные свойства. Существует несколько стратегий, разработанных для решения этой проблемы, такие, например, как использование жёстких каркасов для стабилизации молекул и использование самособирающихся монослоёв для контроля их ориентации.

Ещё одной проблемой SMD является подключение к внешним электродам.

Эти вопросы решаются с помощью использования молекулярных проводов для соединения молекул с электродами, а также использование плазмонных структур, усиливающих взаимодействие между молекулами и электродами.

Интенсивные исследования, проведённые за последние десятилетия, позволили разработать ряд ценных физико-химических методов контроля транспорта зарядов через органические молекулы, благодаря которым впервые был открыт ряд их уникальных свойств.

Среди наиболее значимых достижений молекулярной электроники можно выделить, например, такие как кулоновская и спиновая блокады; запрет транспорта зарядов Франка-Кондона; эффекты Кондо, квантовую интерференцию и декогеренцию электронов; отрицательное дифференциальное сопротивление; эффект молекулярной полупроводниковой проводимости; вибронные эффекты; молекулярный локальный нагрев при прохождении электронов через выводы; молекулярное переключение тока и гистерезис.

Более подробно новые методы разработки одномолекулярных полупроводниковых устройств рассмотрены в следующих разделах статьи.

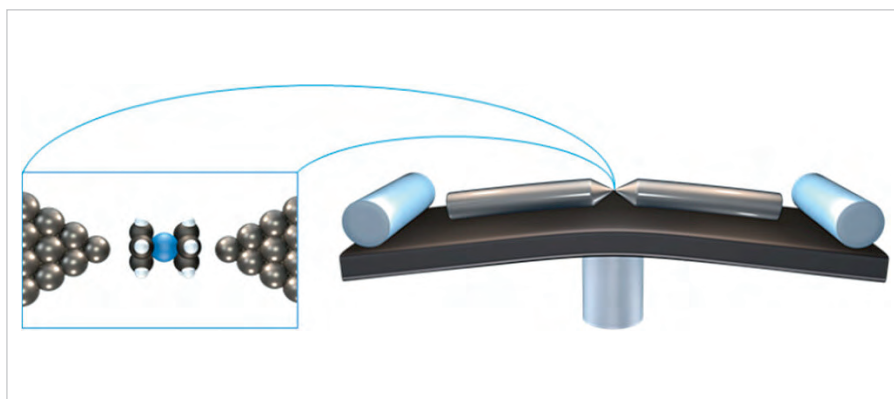


Рис. 3. Схема процесса изготовления разрыва для одномолекулярного устройства с помощью метода MCBJ [4]

2. Основные экспериментальные методы исследования одномолекулярных переходов

Структурная схема простейшего электронного устройства на базе органической молекулы показана на рис. 2. В общем случае одномолекулярное полупроводниковое устройство (single molecular device – SMD) состоит из донорной и акцепторной систем, разделённых туннельным мостом (sigma-bonded-methylene). Если к донорной и акцепторной частям молекулы подключить металлические электроды с низкой и высокой работой выхода соответственно (low/high work function), то под действием приложенного к ним внешнего напряжения электроны будут перетекать от электрода с низкой работой выхода к электроноакцепторной химической группе молекулы. При этом в обратном направлении тока не будет. Молекулярная основа SMD синтезируется в соответствии с заранее заданным набором определённых функциональных характеристик. Электроды обычно изготавливаются из какого-либо благородного металла, например, из золота. Соединение молекулярной основы SMD с электродами реализуется с помощью донорно-акцепторных взаимодействий, ковалентных связей или ван-дер-ваальсовых взаимодействий.

Первые попытки создания действующих моделей SMD с использованием приведённой на рис. 2 схемы столкнулись с крайне сложной технологической проблемой внедрения электрических контактов в рабочую молекулу.

Для изготовления лабораторных образцов молекулярных устройств SMD в основном используется несколько базовых вариантов, реализованных

в различных модификациях, включая такие, например, как: механически управляемые разрывные соединения (mechanically controllable break junctions-MCBJ), электромиграционные разрывные соединения (electromigration break junctions – EBJ) или с помощью сканирующих туннельных микроскопов (scanning tunneling microscopes – STM).

На рис. 3 показана схема метода, получившего название «Mechanically controllable break junctions – MCBJ» (контролируемый механический разрыв).

Этот метод, впервые предложенный в 1992 году, в дальнейшем использовался многими авторами.

Например, в работе [5] для образования каркаса молекулярного соединения использовалась проволока Ag (99,997%, 0,1 мм, Alfa Aesar) с насечкой посередине, которая закреплялась поверх гибкой подложки, изготовленной из фосфористой бронзы (phosphorous bronze) толщиной 1 мм, покрытой каптоновой фольгой – Kapton 0.10 mm). Эта конструкция помещалась в вакуумную камеру, охлаждаемую жидким гелием до 4,2K. С помощью высокоточной установки трёхточечного изгиба, работающей под управлением компьютера, подложка вместе с проволокой деформируется, и в месте надреза образуется мостик толщиной несколько нанометров. При дальнейшем увеличении изгиба мостик разрывается. Эти заострённые кусочки проволоки диаметром атомарного масштаба используются в качестве электродов устройства. На следующем этапе в точке разрыва синтезировалась рабочая молекула ферроцена (99,5%, Альфа Aesar). К электродам прикладывалось постоянное напряжение, и измерялся ток через молекулу. С помощью регули-

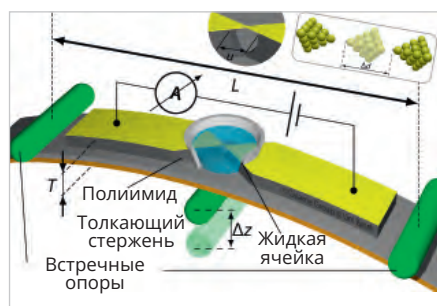


Рис. 4. Схема комбинированного метода контролируемого механического разрыва литографического металлического шаблона – LF MCBJ [6]

ровки расстояния между электродами можно добиться наибольшего тока через молекулу. Полученная в условиях глубокого вакуума конструкция практически не содержала посторонних примесей.

Наряду с методом MCBJ широкое распространение получил модифицированный метод контролируемого механического разрыва, в котором вместо проволоки с надрезом в качестве основы выводных контактов была применена полоска металла, нанесённая литографическим способом на фосфорно-бронзовую подложку. Данный вариант изготовления контактов одноэлектронного транзистора с использованием электронно-лучевой литографии получил название LF MCBJ (Lithographically Fabricated MCBJ).

Металлический проводник электрически изолировался от гибкой подложки с помощью тонкого полиимидного слоя. Схема метода MCBJ – LF MCBJ показана на рис. 4.

Одним из преимуществ метода LF MCBJ является то, что на одной заготовке может быть нанесено множество рисунков отдельных SMD. Так, например, в работе [7] на пластине с размерами $50 \times 50 \times 0,3$ мм было размещено десять устройств с четырьмя разрывными переходами в каждом. Предварительно очищенные и отполированные с помощью ультразвуковой обработки в ацетоне и изопропанолу (IPA), пластины из фосфористой бронзы были покрыты полиимидной плёнкой толщиной 3 мкм. Затем на них был нанесён двойной слой резиста из сополимера метилметакрилата толщиной 320 нм и полиметилметакрилата (ПММА) толщиной 110 нм. Оба слоя полимеризовались в течение 15 мин при 175°C .

Металлические проводники (1 нм Cr и 80 нм Au) осаждались на подложке с помощью электронно-лучевого испа-

рителя при базовом давлении 10 мбар. После процесса отслаивания в горячем ацетоне и этапа промывки в изопропиловом спирте на готовую плату наносился слой защитного лака (ПММА 350 k) толщиной 500 нм. На последнем технологическом шаге процесса изготовления каркаса SMD пластина разрезалась лазерным лучом на отдельные детали.

Разрыв проводника реализовывался методом механического изгиба на специальном оборудовании. При этом сечение моста уменьшается примерно на два порядка по сравнению с проводочным вариантом MCBJ-метода.

Ещё одно преимущество использования метода «Lithographically Fabricated MCBJ» заключается в том, что благодаря небольшим коэффициентам смещения электрические выводы SMT становятся малочувствительными к внешним смещениям.

Метод электромиграционных разрывных соединений (electromigration break junctions – EBJ) основан на известном эффекте диффузии атомов, возникающем в проводниках под действием больших плотностей токов («electron wind»). Например, при токах порядка десятков килоампер на квадратный сантиметр серебряный проводник разогревается до $700\text{--}800^\circ\text{C}$, и в нём образуются каверны размера несколько микрон [8].

Этот эффект можно использовать для создания разрывов в проводнике, настолько малых, что его можно заполнить только одной органической молекулой. В работе [9] описан способ создания металлических электродов одномолекулярных устройств SMD с помощью технологии electromigration break junctions – EBJ.

Из нанесённой на кремниевую подложку тонкой золотой плёнки с помощью сфокусированного ионного луча вырезалась тонкая полоска шириной несколько микрон, на которой был тонкий мостик. К концам проводника прикладывалось напряжение, вызывающее ток большой плотности и разогрев провода. При этом атомы золота мигрировали в самую узкую область нанопроволоки, в которой наблюдалась максимальная плотность тока. Под действием «electron wind» нанопроволока становится тоньше в самом узком месте. Дальнейшее увеличение тока вызывало её разрыв и образование двух стабильных металлических электродов, разделённых зазором в

1–2 нм. После завершения процесса формирования электродов в образовавшемся зазоре с помощью технологии «самособирания из раствора» (self-assemble from solution) была синтезирована рабочая молекула устройства SMD [10].

Характерной особенностью данного метода является жёсткое крепление электродов к подложке. С одной стороны, такая геометрия позволяет достаточно точно контролировать процесс с помощью, например, просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения с использованием прозрачных мембран. Кроме того, жёсткая конструкция допускает циклические режимы работы [11].

Однако электроды, образованные с помощью технологии электромиграции, имеют постоянный нерегулируемый зазор. Поэтому сложно заранее определить наиболее оптимальные режимы синтеза таким образом, чтобы в результате в зазоре оказалась только одна «чистая рабочая молекула» без посторонних примесей металла [11].

Оригинальный способ изготовления заготовок электродов с нанометровым зазором для одноэлектронных устройств предложила объединённая группа разработчиков из Технического университета Делфт (TU Delft) и Шведского технологического института (Royal Institute of Technology) [12]. Процесс изготовления схематически показан на рис. 5. Сначала на кремниевую пластину напыляется тонкий слой нитрида титана (TiN). После этого на титановую пленку особым способом наносятся отрезки золотой проволоки, которые создают на поверхности TiN-зоны остаточной деформации. На заключительном этапе с помощью процесса, называемого «release etching», плёнка нитрида титана удаляется. При этом напряжение в нитриде титана снимается с образованием разрывов золотой проволоки шириной в одну молекулу. Основное преимущество этой методики авторы видят в том, что её можно в принципе использовать для изготовления мелкосерийных партий одномолекулярных устройств.

В этих разработках одномолекулярных транзисторов широко используются методы, основанные на сканирующей зондовой микроскопии, такие, например, как сканирующая туннельная микроскопия (scanning tunneling

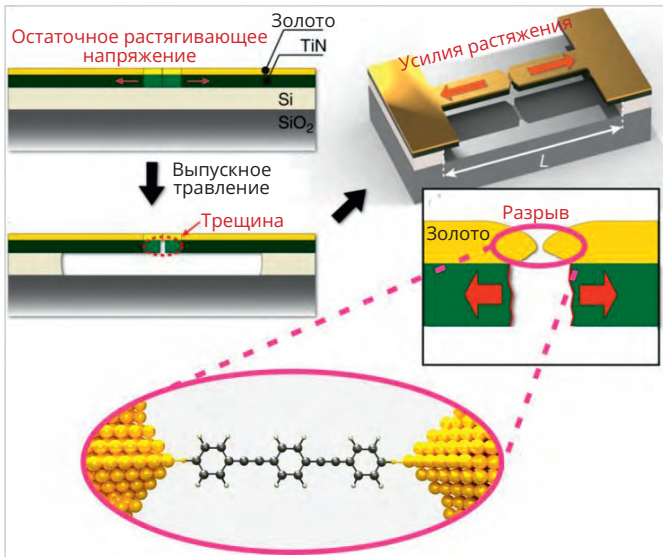


Рис. 5. Схема технологии изготовления металлических электродов для одномолекулярных устройств с помощью технологии [12]

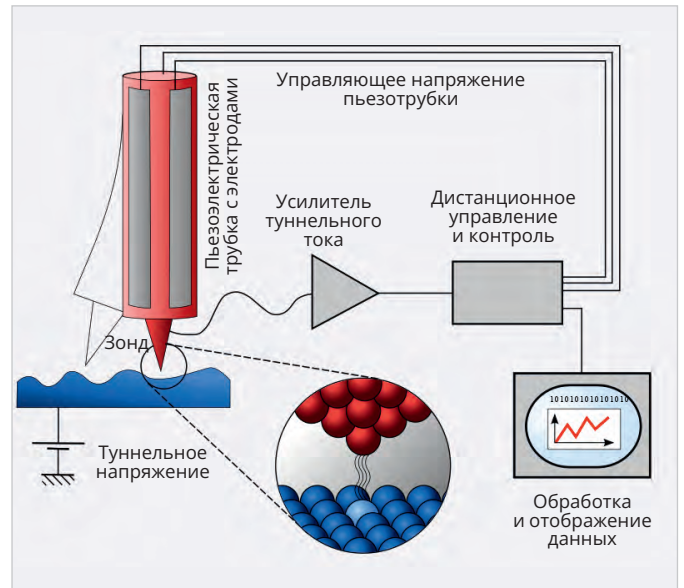


Рис. 6. Схема работы сканирующего туннельного микроскопа [13]

microscopy – STM) и атомно-силовая микроскопия (atomic force microscopy – AFM).

Упрощённая структурная схема сканирующего туннельного микроскопа показана на рис. 6 [13].

Принцип работы STM основан на туннельном эффекте, возникающем в воздушном диэлектрическом зазоре между ультратонким наконечником металлического зонда и металлическим образцом, к которым приложена разность потенциалов.

Величина этой разности потенциалов много меньше по сравнению с той, которая необходима для возникновения электрического разряда при пробое воздушного диэлектрического зазора между двумя проводниками.

В процессе сканирования игла зонда движется вдоль поверхности исследуемого образца. При этом туннельный ток меняется в зависимости от топографии поверхности. На основании измерений туннельного тока вычисляется рельеф поверхности образца. Для различных приложений используются напряжения от нескольких десятков милливольт до нескольких вольт, обеспечивающие туннельный ток в диапазоне от нескольких наноампер до десятых долей пикоампера. Разрешение в плоскости образца зависит от радиуса кривизны кончика острия и его атомарной структуры. Например, один из выступающих атомов может находиться на кончике острия. В этом случае туннельный ток течет, в основном, между поверхностью образца и выступающим на кончике зонда атомом.

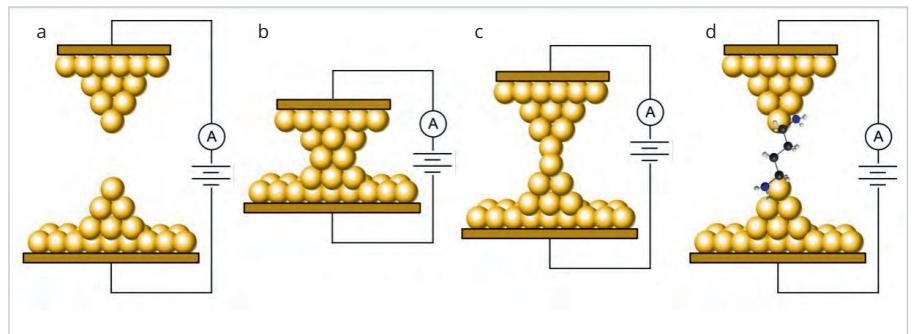


Рис. 7. Принцип действия метода STM-BJ. В качестве золотых электродов используется игла и подложка сканирующего туннельного микроскопа [15]

Современные установки STM позволяют фиксировать как небольшие молекулы, так и одиночные атомы.

Охлаждение рабочей камеры STM до криогенных температур порядка единиц милликельвинов позволяет проводить сканирующую туннельную спектроскопию на атомарно чистой поверхности в режиме сверхпроводимости [14].

Одним из приложений STM, получивших широкое применение в молекулярной электронике, является так называемый метод разрыва проводящего моста с использованием сканирующего туннельного микроскопа (Scanning tunneling microscope-based break-junction – STM-BJ).

Метод STM-BJ считается наиболее оптимальным при исследованиях одиночных соединений металл – молекула – металл. Принцип действия метода STM-BJ показан на рис. 7 [15]. В этом методе непрерывно регистрируется проводимость молекулы по мере разрыва металлического точеч-

ного контакта, находящегося в растворе, содержащем целевые молекулы. В настоящее время существует множество модификаций STM-BJ.

В схеме, представленной на рис. 7, в качестве золотых электродов используются игла и подложка сканирующего туннельного микроскопа (STM). Наконечник (Au) сканирующего туннельного микроскопа, схема которого приведена на рис. 6, многократно перемещается вверх (рис. 7а) и вниз (рис. 7б), контактируя с золотой подложкой на расстояниях меньше нанометра, при которых начинает наблюдаться туннельная проводимость. Каждый такой контакт изменял как форму самого острия, так и подложку в точке касания. При подъёме иглы наконечника вытягивала застрявшие на её конце атомы золота.

Таким образом, на подложке образовывался выступ в форме гантели из атомов золота (рис. 7с). Эта «гантелька» становилась всё тоньше с каждым актом обратного хода иглы STM.

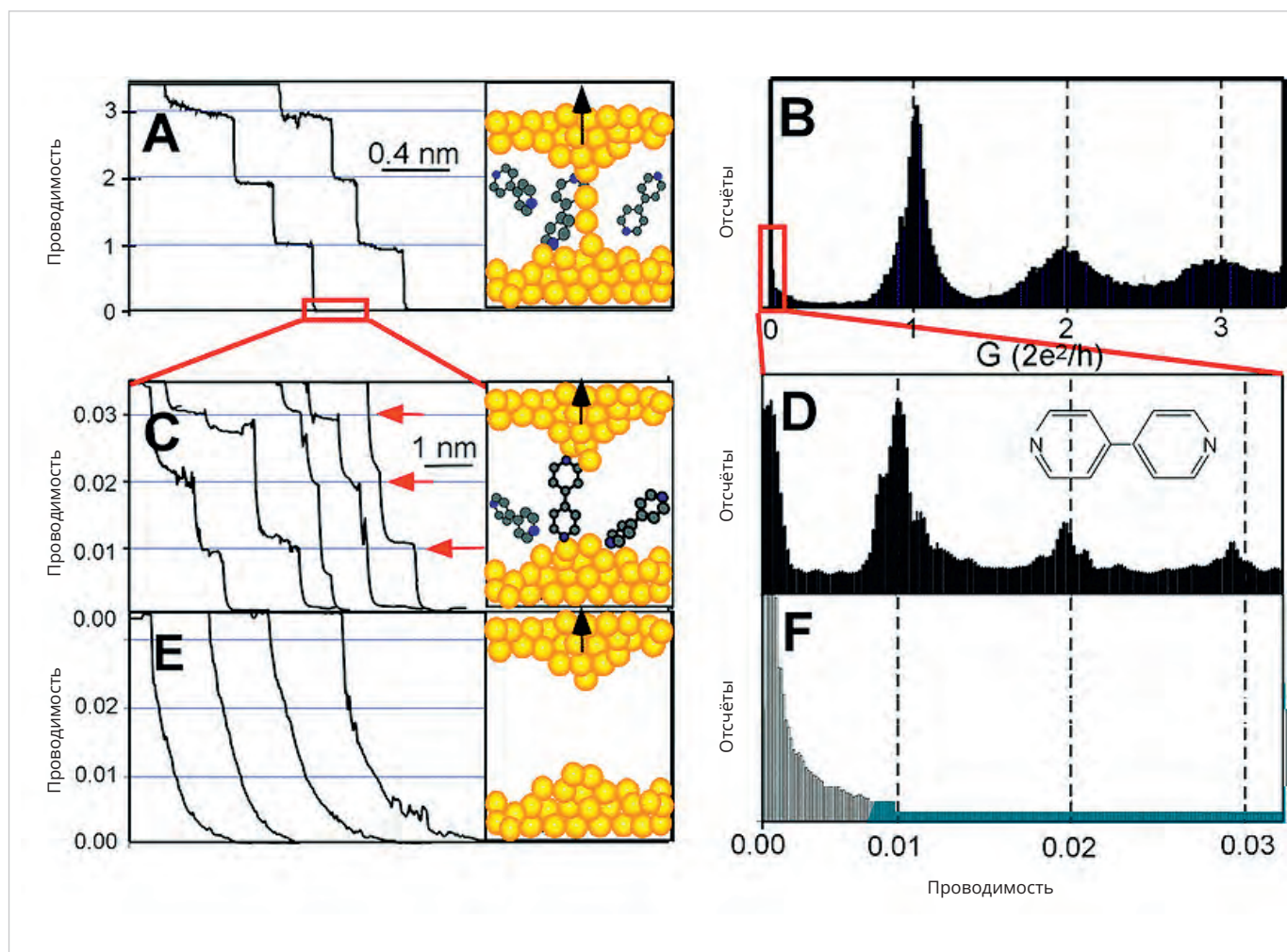


Рис. 8. Структурная схема эксперимента СТМ-ВЛ, проведённого в университете «Arizona State University» в 2003 году [16]: А – проводимость через тонкий мостик золотой подложки уменьшается кратно квантам проводимости G_0 с увеличением расстояния между остриём СТМ и подложкой; В – статистика событий, показанных на рис. 7а, явно указывает на пики, кратные G_0 ; С – золотая перемычка разрушилась, а место атомов золота заняли молекулы раствора 4.4-бипиридина; D – статистические пики, соответствующие проводящим туннелям из одной, двух и трёх молекул 4.4-бипиридина; E – золотая перемычка разорвана, но контакты находятся на открытом воздухе, и между ними нет целевых органических молекул

На каком-то из этапов перемычка разрушалась, и образовавшийся зазор перекрывался целевой молекулой из раствора (рис. 7d). Подобные циклы повторялись многократно, и полученные результаты измерений объединялись в виде гистограмм проводимости.

Результаты, полученные в одном из первых известных экспериментов подобного типа, проведённого в университете «Arizona State University», были опубликованы двадцать лет назад в журнале SCIENCE v 301, 2003 [16].

В этом эксперименте, структура которого проиллюстрирована на рис. 8, подложка находилась в растворе, содержащем молекулы 4.4-бипиридина. При каждом описанном выше цикле измерялась проводимость зазора между подложкой и наконечником.

Здесь уместно отметить, что электрические контакты, расстояние меж-

ду которыми сравнимо с длиной волны электрона (единицы нанометров), получили название «квантовые точечные контакты (quantum point contact – QPC)». Проводимость между QPC измеряется в единицах «Conductance quantum», обозначаемых символом G_0 . Численно эта величина определяется через постоянную Планка (h) и заряд электрона (e), как: $G_0 = 2e^2/h$.

На рис. 8А показана проводимость для случая, когда ток идёт через тонкий мостик в золотой подложке, который фактически представляет собой нанопроволоку толщиной в единицы атомов (рис. 7b). Здесь туннельный ток обусловлен только атомами золота (жёлтые шарики), что подтверждается видом зависимости проводимости от расстояния между «квантовыми точечными контактами (QPC). Эта ступенчатая кривая пол-

ностью соответствует теоретической «лестнице» с квантованными порциями G_0 .

Рисунок 8В иллюстрирует статистику событий, показанных на рис. 8А. Эти гистограммы проводимости, построенные на результатах тысяч измерений, показывают на чётко выраженные пики, кратные «квантам проводимости»: $1G_0$, $2G_0$ и $3G_0$.

На рис. 8С показан случай, когда в результате тысяч колебаний наконечника СТМ золотой мостик разрушился, а место атомов золота заняли молекулы исследуемых растворов органики – 4.4-бипиридин (рис. 7d). Поскольку 4.4-бипиридин – это гетероциклическая молекула, которая имеет два атома азота на обоих концах, то сама молекула может прочно связываться с золотыми электродами с образованием молекулярного соединения.

Средняя ширина ступеней на рис. 8С, обусловленных молекулами 4,4-бипиридина, находилась в диапазоне 0,2–0,9 нм. Эти значения в три-четыре раза больше, чем ступени для атомов золота (рис. 7а).

Рисунок 8D указывает на статистические пики, соответствующие проводящим туннелям из одной, двух и трёх молекул 4,4-бипиридина. На этом рисунке видны ярко выраженные пики вблизи $0,01G_0$, $0,02G_0$ и $0,03G_0$, которые на два порядка ниже тех, которые возникли при квантовании проводимостей, соответствующих атомам золота (рис. 8А).

Рисунок 8Е отражает случай, когда золотая перемычка разорвана, но контакты находятся на открытом воздухе, и между ними нет целевых органических молекул (рис. 7а).

Эти первые эксперименты были взяты за основу метода STM-BJ, который в значительной мере стимулировал дальнейшие разработки одномолекулярных устройств, связанных в основном с теоретическими вопросами, объясняющими механизмы прохождения зарядов через различные молекулы, а также с технологическими проблемами производства SMT. В начале 2000-х годов большинство исследований было направлено на изучение проводимости малых сопряжённых или насыщенных молекулярных мостиков из таких органических соединений, как, например, бензол-1,4-дитиолат, 4,4-бипиридин или другие алкандитиолы [17].

Кроме проводимости одиночных молекул в этот период большое внимание уделялось технологиям соединения металлических проводников с органическими молекулами, необходимым для связи SMT с другими квантовыми электронными устройствами. Так, например, в статье [18] было показано, что π -стэкированная область перехода (π -stacked junctions) может быть получена для олигофениленэтиниленилмонотиолов (oligophenyleneethynylenes – OPE) с двумя тиоловыми контактами (thiol contacts). Кроме того, в этом исследовании была подтверждена возможность существования контактов металл – молекула – металл с участием OPE, в которых второй контакт должен образовываться за счёт взаимодействия π -электронов концевой фенильного кольца с поверхностью металла.

Достаточно подробные обзоры работ этих годов можно найти, например, в статье [19].

Хороший обзор работ по STM, выполненных до 2015 года, опубликован в докторской диссертации, защищённой в Колумбийском университете [20].

Эта работа посвящена изучению переноса заряда через одномолекулярное соединение, возникающее в методе STM.

В частности, в работе приведены результаты измерений зависимости проводимости различных молекул от таких ключевых параметров, как, например: температура, давление, свойства растворителя, напряжение между электродами. Из ключевых результатов можно отметить открытие новых механизмов молекулярной ректификации, при которых ток течёт преимущественно в одном направлении.

Другая проблема устройств SMD связана со структурой самой рабочей молекулы. Эксперименты с молекулярными производными тиафена (thiophene derivatives), имеющими различные пространственные формы молекулы, обусловленные изменениями ориентации её частей вокруг простых связей (conformations), показали, что, в зависимости от ориентации групп-заместителей, присоединённых к основной цепи, изменялась и проводимость между контактами. Эти изменения объяснялись тем, что на проводимость сильно влияет выравнивание энергетических уровней между молекулой и электродами, которое определяется особенностями конкретных структур, обусловленных конформацией [21].

В настоящее время STM является одним из самых распространённых исследовательских методов физики твёрдого тела и молекулярной физики. Новые методики с использованием STM разрабатываются во многих лабораториях мира, в том числе и в российском научном центре СПбГУ.

В то время как STM позволяет работать только с проводниками, атомно-силовая микроскопия (atomic force microscopy AFM) даёт возможность определять микрорельефы на атомарном уровне поверхностей изоляторов.

В основе работы атомно-силового микроскопа (АСМ) используется эффект взаимодействия чувствительного зонда, представляющего миниатюрную балку с тонким остриём на конце (кантилевера), с поверхностью исследуемого образца. В зависимости от назначения и конструкции в атомно-силовом микроскопе (АСМ) с помощью чувствительного зонда измеряются силы Ван-дер-Ваальса, электро-

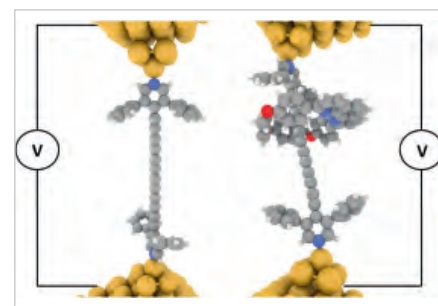


Рис. 9. Схема исследования проводимости олигоиновой молекулярной проволоки с использованием метода STM-BJ. Слева – «гексаиновая гантель». Справа – гексаин-ротаксановый комплекс [23]

статические и магнитные силы, капиллярные силы. Подробное описание работы АСМ можно найти в [22].

Методы AFM и STM позволяют контролировать процесс внедрения рабочих молекул в зазор между электродами устройств SMD намного эффективнее, чем другие доступные методы. Наряду с оценками параметров самой рабочей молекулы эти методы позволяют исследовать характеристики разрыва проводников при изготовлении электродов.

Следует обратить внимание на то, что в последние годы разработчики переключились на изучение молекул со сложной химической разветвлённой структурой, включая бимолекулярные и мультимолекулярные сборки, такие, например, как: карбоновые кислоты, фуллерены, порфирины, α -циклодекстрин, кукурбит, а также лиганды и тектоны, необходимые для построения органических и координационных супрамолекулярных ансамблей [23, 24].

Особое внимание привлекают направления, связанные с изучением процессов самосборки и самоорганизации в промежутках между квантовыми контактами в растворах, жидких кристаллах и гелях.

С этой точки зрения интерес представляют результаты одной из работ, в которой описываются результаты исследований проводимости надмолекулярной сборки ротаксан-гексаин (rotaxane-hexaune supramolecular assembly), инкорпорированной в форме олигоиновой конструкции (oligoynes constaction). Схема этого эксперимента приведена на рис. 9 [25].

Олигоины можно рассматривать, как некий прототип системы молекуляр-

ных мостиков, состоящих из чередующихся связей типа «CuC» и множества сопряжённых углерод-углеродных «C–C» связей в одномерных молекулярных цепях. Олигоины могут рассматриваться как некие молекулярные проводники, способные передавать заряд на большие расстояния с использованием эффекта когерентного туннелирования.

Для стабилизации состояния «олигоинового провода» в этой работе используется ротаксан-гексаин и экранирующие концевые группы.

Такая надмолекулярная сборка образовывалась в процессе подборки различных параметров STM-VI. Концевые стопоры на основе 3.5-дифенилпиридина выполняли роль хемосорбционных контактов, соединяющих молекулярную проволоку с внешними золотыми электродами.

Использование ротаксинирования (rotaxinating) нестабильного архетипического изолирующего гексина позволило получить «host-guest» комплекс, в котором 3.5-дифенилпиридин, размещённый по обеим сторонам гексаиновой (hexaune) молекулярной проволоки, служит якорем для электродов из золота. Результаты многочисленных измерений показали, что «гексаин-ротаксановый комплекс» не оказывает существенного влияния на профиль проводимости молекулы гексина.

Предложенный метод синтеза молекулярных сборок на основе ротаксана позволяет изолировать олигоиновую молекулярную проволоку от электрических воздействий соседних молекул.

Дальнейшие разработки одномолекулярных устройств и молекулярных проводников были связаны с такими, например, направлениями, как зависимость проводимости от длины молекулярного проводника.

Классической в этом плане считается работа [26], в которой авторы проанализировали данные многочисленных измерений проводимости одиночных алкановых молекул (alkane backbone). В результате был сделан вывод о том, что опубликованные результаты по молекулярной проводимости алканов можно разделить на три группы с различными значениями сопротивления в зависимости от площади устройства молекулярного соединения и характера контактов.

Аналогичные выводы были получены для других классов молекул, например, Si (силаны) и Ge (германы) [27].

В частности, полученные результаты свидетельствуют о том, что проводимость обычно уменьшается экспоненциально в зависимости от длины молекулярной цепи. В то же время вклад сопротивления якорей, с помощью которых молекула крепится к выводным контактам, носит линейный характер.

3. Перенос заряда через молекулярные туннельные переходы

Перенос электронов в различных средах, представляющий собой фундаментальный физико-химический процесс, лежащий в основе всех окислительно-восстановительных реакций, изучается экспериментально и теоретически в течение многих десятков лет. Теоретические исследования таких процессов направлены на то, чтобы понять, как их скорость зависит от свойств донора и акцептора, от растворителя и от электронной связи между участвующими состояниями. Процессы, которые преобладают в электронных переходах в молекулярных системах, значительно отличаются от электронного транспорта в металлах и полупроводниках. Электрохимические реакции, в которых участвуют как молекулярные, так и твердотельные донорно-акцепторные системы, представляют собой ещё один класс явлений переноса электронов.

В молекулярных мостках между металлическими проводниками происходит перенос электрона между квазисвободными электронными состояниями, с одной стороны, и связанными молекулярными электронными состояниями, с другой.

Основная проблема, связанная с попытками объяснения проводимости молекулярных проводников, заключается в отсутствии однозначной стройной теоретической базы.

Современная физика имеет два основных раздела – физика микромира (квантовая механика), описывающая объекты атомарного уровня, и физика макромира, знакомая нам из школьного курса.

Объекты квантовой механики имеют размеры, сравнимые с размерами одного атома или с длиной одной химической связи, то есть с боровским радиусом. Основу классической квантовой механики составляют несколько постулатов,

в числе которых: принципы неопределённости, суперпозиции, а также когерентность и запутанность. Эти вопросы мы рассматривали в журнале «Современная электроника» № 7 за 2022 г. [28].

С точки зрения молекулярной электроники нас больше всего интересует волновая когерентность, которая определяется как согласованность волновых свойств электронов во времени. Волновые колебания когерентны, если разность их фаз постоянна во времени и при сложении колебаний получается колебание той же частоты. Характерным проявлением когерентности являются классические опыты по интерференции света и электронов.

Под макроскопическими понимают масштабы явлений и объектов, при которых перестаёт действовать квантовая когерентность и становится невозможной интерференция волновых функций электронов. Такие эффекты происходят из-за неупругих столкновений электронов, например, при их рассеянии на фотонах. В этом случае сбивается фаза электронной волновой функции.

Именно поэтому нельзя описать ни с помощью простых законов классической физики макромира, ни с помощью сложной математики классической квантовой механики микромира, например, проводимость последовательного соединения двух кусочков квантовой проволоки или механизм прохождения тока через молекулу.

Для описания явлений в пограничных областях между микро- и макромирами в начале 1980-х появилась гибридная физика, получившая название «мезоскопическая физика» (mesoscopics).

Одна из задач мезоскопической физики заключается в учёте квантовых поправок в уравнениях классической электродинамики и электротехники [29].

Для учёта интерференции волновой функции электронов учитываются такие эффекты, как слабая локализация, универсальные флуктуации проводимости, эффект Ааронова–Бома и другие.

С другой стороны, мезоскопическая физика учитывает свойства, обусловленные также и макроскопической составляющей системы.

Например, в случае описания явлений в сверхпроводниках принимается во внимание макроскопическая когерентность. В гибридных макроскопи-

ческих системах, включающих в себя вкрапления микрочастиц, рассматриваются также эффекты сильной и слабой локализации, туннелирования и прыжковой проводимости.

Более подробную информацию о мезоскопических системах можно найти на сайте [30].

Для моделирования проводимости отдельных молекул в тех или иных вариациях используются стандартные мезоскопические транспортные технологии. В подобного рода моделях прохождение заряда через молекулу рассматривается как квантовый перенос через мезоскопическое устройство, при котором преобладающим является квантовая когерентность.

Даже одиночные молекулярные соединения, используемые в SMD, состоят обычно из нескольких сотен атомов.

Несмотря на то что их расположение внутри молекулы хорошо известно, точные модельные расчёты с учётом всех орбиталей и параметров представляют настолько сложную задачу, что на современном уровне они просто невозможны из-за отсутствия соответствующих компьютеров и алгоритмов. Поэтому применяются упрощённые *ab-initio* модели, в

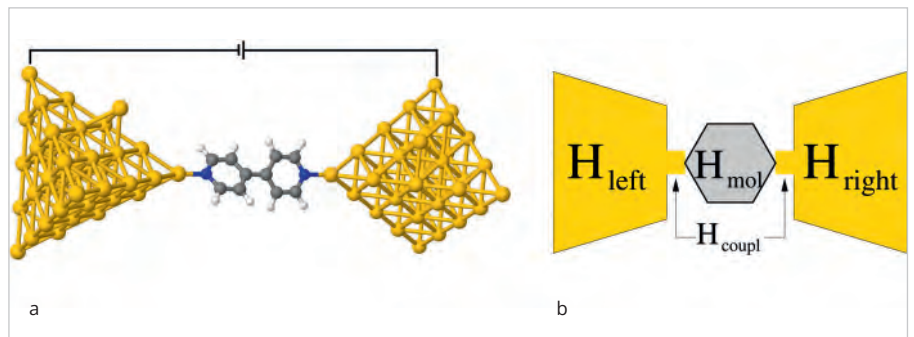


Рис. 10. а. Реальная структурная схема молекулярного мостика между металлическими проводниками и крепящими органическими якорями. б. Упрощённая схема модели молекулярного мостика между металлическими проводниками

которых сложные молекулярные структуры заменены на объединённые функциональные блоки (рис. 10) [31].

Примерами таких отдельных блоков являются фотоэмиссия через молекулярные оверслои, обратный процесс передачи электронов низкой энергии в металлы через адсорбированные молекулярные слои и перенос электронов между металлическими или полупроводниковыми контактами через молекулярные прокладки.

Как правило, донорные и акцепторные участки заменяются виртуальными блоками, которые характеризуются

континуумами задействованных электронных состояний.

Кроме того, молекулярный мостик может быть заменён молекулярным слоем. Каждый блок соответствует определённому уровню, связанному с конкретными молекулярными орбиталями. Каждый уровень описывается своим собственным гамильтонианом, а их векторная сумма определяет гамильтониан всей системы (рис. 10b).

$$\hat{H} = \hat{H}_{mol} + \hat{H}_{res} + \hat{H}_{coupl}$$

Таким образом, в «стандартной упрощённой модели переноса электрона»

Инфракрасные паяльные станции для корпусов BGA

- Общая мощность до 12200 Вт
- Хранение до 50000 групп термопрофилей
- Оптическая система позиционирования
- Автоматическая установка и снятие чипа
- Гарантия до 3 лет



От производителей:

ACHI
WISDOMSHOW
Dinghua
Seamark



supereyes.ru 8 800 550-13-57 sales@supereyes.ru



Реклама

молекулярный туннель заменён на мостик, который соединяет донорные и акцепторные частицы, представленные потенциальными поверхностями, связанными с соответствующими молекулярными и ядерными структурами.

Один из дополнительных адаптационных способов заключается в том, что рассматриваются разнонаправленные потоки электронов. В одном случае блок включает электроны с положительной энергией относительно нулевой кинетической энергии в вакууме. Этот тип связан с нормальными процессами рассеяния. В другом случае, как, например, при передаче между двумя проводниками через молекулярный слой, будут задействованы электроны с отрицательной энергией [32].

В основном для транспортных вычислений используются три базовых упрощённых метода. Наиболее распространённым является «Формализм неравновесной функции Грина» (non-equilibrium Green's function formalism – NEGF) [33].

Формализм Ландауэра-Буттикера (Landauer-Buttiker formalism) является расширением метода NEGF для случаев, когда эффекты взаимодействия могут рассматриваться на среднем уровне в нелинейных режимах,

Этот метод применяется для построения квазистационарных моделей в тех ситуациях, когда упрощения вводятся в оценке того, насколько они удобны в использовании по сравнению с конкурирующими методами [34].

Для построения линеаризованных моделей используется формула Кубо (Kubo-formula). Эта методика отличается тем, что оперирует только с опережающими и запаздывающими функциями Грина. Поэтому в качестве входных данных можно использовать существующую информацию об электронной структуре в основном состоянии [35].

В одной из последних работ на эту тему представлено программное обеспечение VOTCA-ХТР с открытым исходным кодом, предназначенное для расчёта электронной структуры молекул в возбуждённом состоянии с использованием теории функций Грина. Данное ПО обеспечивает точное описание квазичастичных и связанных электронно-дырочных возбуждённых состояний различного типа.

Модель на основе гауссовых орбиталей включает методы разрешения идентичности и различные подходы к

интегрированию частоты собственной энергии. Для этого применён метод разгрузки матричных операций с использованием графических процессоров в гибридной схеме OpenMP/Cuda. Отличительной особенностью VOTCA-ХТР является возможность связать расчёт электронных возбуждений с классической поляризуемой средой на атомистическом уровне в схеме связанной квантовой и молекулярной механики (QM/MM). Предложенная программная платформа позволяет обрабатывать системы, содержащие до 2500 базисных функций, на обычных рабочих станциях с общей памятью [36].

Независимо от того, какой из перечисленных подходов используется, необходима дополнительная информация об электронной структуре устройства. В действительности молекулярные соединения представляют собой одну из самых сложных проблем в теории электронных структур.

Методика расчёта потенциалов ионизации (IP) и электронной энергии (EA) молекул приведены в работе [37].

Сами по себе сложнейшие вычисления IP (EAs) содержат погрешности, которые затем вызывают ошибки в положении транспортных резонансов, связанных с самым высоким занятым (HOMO) и самым низким незанятым (LUMO) молекулярными уровнями. В целом оценки IP для малых молекул, основанные на различных методиках (KS, DFT и др.), могут отклоняться от оценок более высокого уровня более чем на 1 эВ [38].

Наиболее интересные молекулярные соединения связаны со слабыми подсистемами, такими, например, как «молекулярные квантовые точки», для которых ошибки в рассчитанных уровнях остаются большими, даже если ошибка в общей работе выхода может быть относительно небольшой.

Представляет интерес электронно-индуцированный перенос протона (Electron-induced proton transfer – EIPT), который описывает движение протона в сочетании с присоединением к молекуле низкоэнергетического электрона. Этот процесс можно наблюдать во многих различных системах, например, в кислотно-основных химических реакциях.

Присоединение электрона стимулирует эти реакции благодаря образованию переходного дипольно-связанного анионного состояния или нестабильного валентно-связанного анионного

состояния. Процесс EIPT, например, рассматривается в качестве одной из причин повреждения ДНК при лучевой терапии рака. Приведённые примеры демонстрируют случаи EIPT между двумя молекулами. Аналогичный, по своей сути, процесс может иметь место и внутри одной молекулы.

В статье [39] описаны результаты экспериментов с молекулами 10-гидроксибензохинолина (10-hydroxybenzo[h]-quinoline) и 8-гидроксихинолина (8-hydroxyquinolin). Экспериментальные результаты, полученные с помощью анионной фотоэлектронной спектроскопии и масс-спектрометрии, подтверждают расчёты, проведённые методами теории функционала плотности (DFT).

В данной работе было показано, что молекулы гидроксибензохинолина и гидроксихинолина могут переносить внутри себя протоны, индуцированные электронами. Этот процесс был назван авторами внутримолекулярным – iEIPT.

На основании проведённых экспериментальных исследований и модельных расчётов авторы полагают, что для возникновения внутримолекулярного процесса iEIPT необходимо, чтобы молекула удовлетворяла следующим трём критериям:

- молекула должна иметь одну функциональную группу в качестве донора протона (например, -ОН или -СООН) и одну функциональную группу в качестве рецептора протона (нуклеофилы), например, одинокая пара;
- эти функциональные группы должны находиться в непосредственной близости и иметь предсуществующую водородную связь;
- сама молекула должна иметь возможность электронного размещения одного лишнего электрона на подобие разрыхляющей π^* -орбитали.

В качестве хорошо известного примера iEIPT можно привести анион ацетоксусной кислоты, чей нейтральный аналог соответствует трём вышеуказанным критериям.

Детальное рассмотрение даже основных теоретических проблем молекулярной электроники выходит за рамки данной статьи. Подробно вопросы моделирования квантового транспорта в молекулярных соединениях, а также методы описания электронной структуры и динамики молекул в неравновесных средах рассмотрены в обзоре [40].

Краткий обзор приведённых выше результатов экспериментов по исследованию проводимости органических

молекул, а также перечень базовых аспектов моделирования этих процессов позволяют оценить ту огромную работу, которую проделали учёные всего мира для понимания закономерностей электронных и механических взаимодействий на границах раздела металл-молекула. Использование этой теоретической базы и созданных на их основе технологий позволили разработать и изготовить лабораторные образцы целого ряда одноэлектронных молекулярных компонентов. Эти устройства будут рассмотрены в следующей части статьи.

Литература

1. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0009261474850311>.
2. URL: bit.ly/45rxPjr.
3. URL: https://www.venkataramangroup.org/uploads/4/9/0/3/49031895/capozzi_columbia_0054d_12995.pdf.
4. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10176572/>.
5. URL: https://pubs.acs.org/doi/suppl/10.1021/acs.nanolett.3c00043/suppl_file/nl3c00043_si_001.pdf.
6. URL: <https://calame.unibas.ch/research/mcbj/>.
7. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/10/6/065008/pdf>.
8. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022369766900163>.
9. URL: <https://mceuengroup.lassp.cornell.edu/sites/mceuen/files/publications/EMPaper.pdf>.
10. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41061-017-0149-0>.
11. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2014/cs/c4cs00143e>.
12. URL: <https://phys.org/news/2018-08-problem-mass-molecular-junctions.html>.
13. URL: bit.ly/42AQEyR.
14. URL: <https://www.nature.com/articles/s42005-023-01201-4>.
15. URL: http://schroeder.scs.illinois.edu/?attachment_id=1300.
16. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1087481>.
17. URL: bit.ly/3IEVoeS.
18. URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ja103327f>.
19. URL: <https://journals.aps.org/rmp/abstract/10.1103/RevModPhys.92.035001>.
20. URL: https://www.venkataramangroup.org/uploads/4/9/0/3/49031895/capozzi_columbia_0054d_12995.pdf.
21. URL: bit.ly/3IF5sVc.
22. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4282300>.
23. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ja103327f>.
24. URL: bit.ly/3OCTAXs.
25. URL: bit.ly/3IK5hb9.
26. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-8984/20/01/013001>.
27. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29875407/>.
28. URL: bit.ly/3oo6LBb.
29. URL: <http://lomonosov-fund.ru/enc/ru/encyclopedia:01273:article>.
30. URL: bit.ly/3BPt4md.
31. URL: <https://pubs.aip.org/aip/jcp/article/148/3/030901/195974/Perspective-Theory-of-quantum-transport-in>.
32. URL: <https://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0102/0102300.pdf>.
33. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18643440/>.
34. URL: bit.ly/43qDnc5.
35. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Kubo_formula.
36. URL: bit.ly/3qekNFK.
37. URL: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jpcc.8b12213>.
38. URL: bit.ly/43nhf2l.
39. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-019-09154-5#Fig4>.
40. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29352777/>.



Ip67

ПЫЛЕВЛАГОЗАЩИТА

РЕЗЬБА / ПАЙКА





- Быстрый и простой монтаж
- Прямой или угловой кабельный ввод
- Эргономичная конструкция для безопасного использования
- Предустановленный контакт заземления
- Защитная крышка

WA22

SERIES

3+PE / 6+PE 



АО «Компонента» — официальный дистрибутор Weipu в России

На правах рекламы

 8 495 150 2 150
 www.komponenta.ru
 info@komponenta.ru

Объединение человека и машины для совершенствования полупроводниковых технологий

Керен Канарик, Войцех Осовецкий, Ю Лу и другие
Перевод: Александр Малыгин

Одним из узких мест в создании полупроводниковых чипов является растущая стоимость, необходимая для разработки химических плазменных процессов, которые формируют транзисторы и ячейки памяти [1, 2]. Эти процессы до сих пор разрабатываются вручную с участием высококвалифицированных инженеров, которые ищут комбинацию параметров инструмента, дающую приемлемый результат на кремниевой пластине [3]. Проблемой для компьютерных алгоритмов является доступность экспериментальных данных, крайне ограниченных из-за высоких затрат на их получение, что затрудняет формирование прогностической модели с точностью до атомного масштаба. Мы изучаем байесовские алгоритмы оптимизации, чтобы выяснить, как искусственный интеллект (ИИ) может снизить стоимость разработки сложных технологических процессов полупроводниковых микросхем. В частности, мы создали контролируруемую виртуальную игру для систематического сравнения производительности людей и компьютеров при проектировании процесса производства полупроводников. Мы обнаружили, что инженеры-люди преуспевают на ранних стадиях разработки, в то время как эффективность алгоритмов возрастает по мере приближения к цели. Кроме того, мы показываем, что стратегия, использующая как проектировщиков-людей с большим опытом, так и алгоритмы в стратегии «сначала человек – компьютер в последнюю очередь», может снизить стоимость достижения цели вдвое по сравнению с разработкой силами одних только людей. Наконец, мы выделяем культурные и этические проблемы в вопросах кооперации людей с компьютерами, которые необходимо решить при внедрении искусственного интеллекта в разработку полупроводниковых технологий.

Введение

Полупроводниковые чипы лежат в основе каждой системы искусственного интеллекта (ИИ) в мире, работая с цифровыми состояниями «0» и «1», определяемыми нанометровыми транзисторами и ячейками памяти. Изготовление этих миниатюрных устройств на кремниевых пластинах представляет собой сложный производственный процесс, включающий сотни специализированных технологических операций, почти половина которых требует сложных химических плазменных процессов, таких как травление и осаждение [3]. По иронии судьбы, разработка этих критически важных процессов, обеспечивающих работу ИИ, по-прежнему осуществляется инженерами-технологами, которые используют свою интуицию и опыт, часто при-

бегая к методу проб и ошибок. Вопрос допуска ИИ к разработке процессов для создания новых чипов представляет общий интерес, поскольку автоматизация этой деятельности может вызвать сценарии так называемой «сингулярности», при которой ИИ эффективно учится самовоспроизводству [4, 5].

Есть множество примеров компьютерных алгоритмов, превосходящих людей в сложных задачах, таких как демонстрация мастерства в настольных играх, например в шахматах и го [6, 7]. Однако в этих случаях компьютер принимает решения только после обучения на большом количестве не столь дорогих данных. Напротив, сбор данных о процессах на кремниевых пластинах обходится недешево: более тысячи долларов США за эксперимент для пластины, работы плаз-

менного оборудования и электронной микроскопии. Следовательно, инженеры обычно разрабатывают полупроводниковые процессы, тестируя только порядка сотни из потенциально многих триллионов различных комбинаций параметров плазмы, таких как давление, мощность, потоки реактивного газа и температура пластины. В отличие от настольных игр, которые имеют четкие правила, системы пластина-реактор управляются бесчисленным количеством микроскопических физических и химических взаимодействий между материалом пластины, частицами плазмы и частями реактора [8, 9]. Отсутствие достаточного количества данных в конкретной интересующей области затрудняет формирование компьютерных моделей с точностью до атомного масштаба, что известно как проблема «малых данных» [10]. Таким образом, задача, которую мы ставим перед ИИ, состоит в том, чтобы снизить целевую стоимость (то есть свести к минимуму количество данных, которые необходимо собрать) разработки полупроводникового процесса по сравнению с разработкой опытным инженером-технологом.

В этой работе мы сравнили производительность компьютерных алгоритмов с опытными инженерами-технологами, сосредоточив внимание на сценарии, в котором неподготовленный компьютер имеет доступ только к собранному данным. Вдохновленные подходами ИИ к шахматам, в которых программные агенты соревнуются с людьми, мы создали игру по разработке процессов, в которой цель игрока – человека или компьютерного алгоритма – состоит в том, чтобы разработать сложный процесс с наименьшими затратами на достижение цели. Проведение такого соревнования с использованием настоящих пластин было бы дорогим и непрактичным из-за неконтролируемой изменчивости поступающих пластин, метрологического и технологического оборудования, что

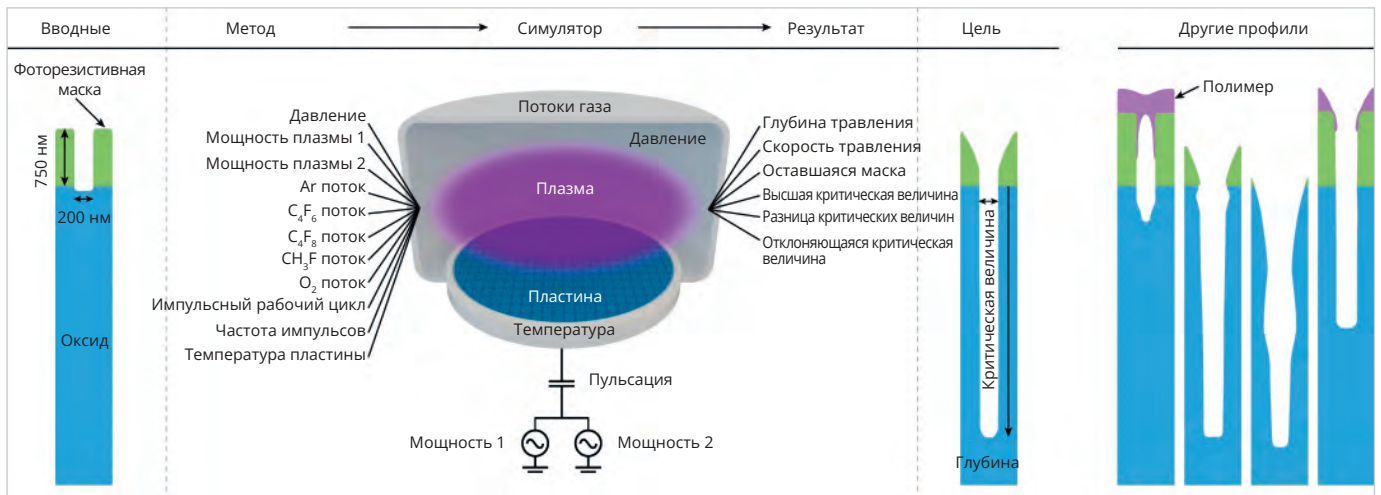


Рис. 1. Схема виртуального процесса, используемого в игре

затруднило бы интерпретацию результатов. Чтобы преодолеть эти практические трудности, мы провели соревнование на сложной виртуальной платформе, которая позволяет сравнивать действия участников в рамках одного и того же процесса.

Игра-соревнование между человеком и ИИ

Конкурс проводился в виртуальной среде, напоминающей лабораторию, как схематично показано на рис. 1. Процесс нашего исследования представляет собой плазменное травление отверстия с высоким коэффициентом сжатия в плёнке диоксида кремния, которое наряду с многими другими этапами используется для изготовления полупроводниковых чипов [11]. Моделирование этого процесса было параметризовано и откалибровано на основе существующих данных в запатентованном симуляторе профиля характеристик с использованием основанных на физике эмпирических соотношений, чтобы связать метод комбинации входных параметров инструмента с выходным результатом травления на виртуальной пластине. Для участника этот симулятор служит эффективным чёрным ящиком [9] преобразования метода (например, значений давления, мощности и температуры) в требования технологического этапа, необходимого для производства полупроводникового чипа.

Как и в лаборатории, цель игры состоит в том, чтобы свести к минимуму целевые затраты на поиск метода, обеспечивающего выходные показатели, соответствующие цели. Участник отправляет партию (один или несколько методов) и получает выход-

ные метрики и изображения профиля поперечного сечения. Участник продолжает отправлять партии до тех пор, пока цель не будет достигнута (рис. 1). Мы определяем «траекторию» как серию партий, выполненных для достижения цели. Исходя из фактических затрат, мы определяем стоимость метода в размере 1000 долларов США для затрат на пластины и накладные расходы в размере 1000 долларов США на партию для работы с инструментом. Существует множество потенциальных выигрышных методов из-за высокого уровня погрешности во входных параметрах. Тем не менее мы с самого начала установили низкие шансы случайного достижения цели: 0,003% на метод на основе 35 000 случайных образцов.

Эталонное оценивание специалистов-людей

Ориентир для целевой стоимости был определён игроками-людьми. Среди добровольцев нашлось шесть профессиональных инженеров-технологов со степенью кандидата физических наук: три старших инженера с опытом работы более семи лет и три младших инженера с опытом работы менее одного года. Инженеры разработали свои эксперименты, используя механистические гипотезы, основанные на их предыдущих знаниях о тенденциях процесса и зависимостях параметров плазмы. Они выбрали средний размер партии из четырёх методов, используя одномерные или двумерные изменения параметров в 95% всех вариантов. Для справки, также участвовали три человека без соответствующего опыта работы с процессами.

Траектории технологов показаны на рис. 2. Они показывают качественно сходные пути с постепенным продвижением к цели, которые мы характеризуем как два этапа: грубая настройка и тонкая настройка. Грубая настройка относится к начальному быстрому прогрессу по направлению к цели, тогда как точная настройка относится к медленному прогрессу в конце траектории, на котором инженеры изо всех сил пытались одновременно улучшить все выходные показатели. Старшим инженерам требуется примерно половина стоимости младших инженеров для того же прогресса. Победивший участник-человек – старший инженер № 1 с целевой стоимостью 105 000 долларов США, как показано на рис. 2. Это наш «экспертный» человеческий ориентир.

Эталонное оценивание компьютерных алгоритмов

Компьютерные алгоритмы, участвующие в этом конкурсе, представляют собой байесовские оптимизации – широко используемый метод машинного обучения для дорогостоящих функций чёрного ящика [12, 13, 14]. Этот класс алгоритмов изучался на других приложениях в полупроводниковой промышленности [15, 16, 17]. Были выбраны три различные разновидности байесовских оптимизаций:
 1) Algo1 с использованием выборки Монте-Карло с цепью Маркова [18], многомерной линейной суррогатной модели для компенсации высокой вычислительной стоимости выборки и функции ожидаемого улучшения (EI);
 2) Algo2 из программного обеспечения с открытым исходным кодом,

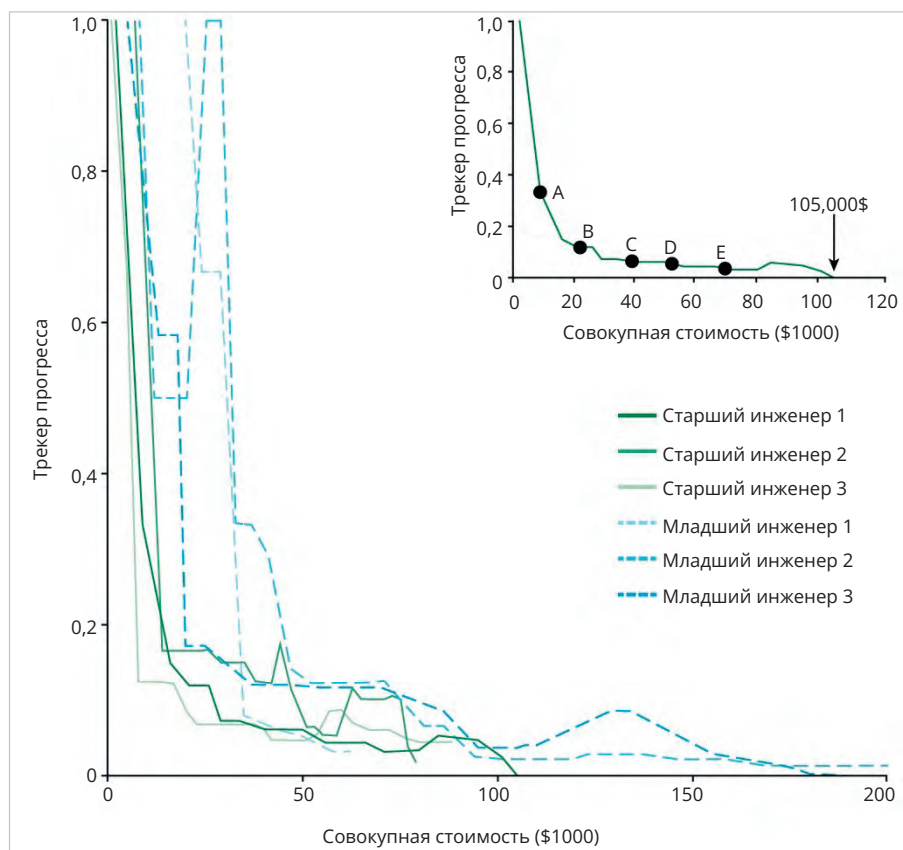


Рис. 2. Игровые траектории для инженеров-людей несколькими способами

использующего древовидную структуру Parzen Estimator с функцией получения EI [19, 20];

3) Algo3 с использованием модели процесса Гаусса [21] и функции сбора данных с более низкой доверительной границей.

Все алгоритмы используют масштабированное евклидово расстояние в качестве целевой функции и запускались без какого-либо обучения и с использованием неинформативных априорных значений [22].

Алгоритмы были запрограммированы на использование выходных показателей, но не выходных изображений профилей, поэтому они фактически игнорировались. Для каждой партии использовался только один метод, что является значением по умолчанию для байесовской оптимизации [23]. Траектории были повторены 100 раз для статистической релевантности, чтобы учесть присущую случайность в стоимости достижения цели из-за вероятностного характера байесовской оптимизации. Чтобы экономить вычислительное время, траектории усекались, если они не соответствовали целевому показателю до экспертного ориентира в 105 000 долларов США. Мы определяем «показатель успеха» как процент траекторий с более низ-

кой стоимостью достижения цели, чем у эксперта. Для справки, вероятность успеха только от чистой случайности оценивается менее чем в 0,2% (на основе вероятности 0,003% на метод, упомянутой ранее).

Алгоритмы запускали каждую траекторию со случайно сгенерированного начального числа из латинского гиперкуба, а затем генерировали один метод для каждой партии. На панелях рис. 3 результаты отмечены как «без человека». Показатели успеха низкие: менее 1% для Algo1, 2% для Algo2 и 11% для Algo3. В общей сложности только 13 из 300 (менее 5%) попыток обыграли эксперта. Для справки, мы позволили одной траектории Algo2 выйти за предел усечения, в итоге достигнув цели в 739 000 долларов США, что на много порядков дороже, чем результаты экспертов. В целом, одни только алгоритмы не смогли выиграть состязание с человеком-экспертом.

Стратегия «сначала человек – компьютер в последнюю очередь»

Мы предположили, что алгоритмы потерпели неудачу, потому что они тратят впустую свои попытки для экспериментов, перебирая огромное количество конфигураций процес-

сов без каких-либо предварительных знаний. Напротив, мы предположили, что инженеры-технологи опирались на свой опыт и интуицию, чтобы принимать более правильные решения на начальном этапе навигации. Поэтому мы решили протестировать гибридную стратегию, в которой эксперт управляет алгоритмами в сценарии «сначала человек – компьютер в последнюю очередь» (HF-CL). В этой реализации вместо случайной выборки эксперт предоставляет экспериментальные данные, собранные до точки перехода, обозначенной от А до Е на рис. 2, вместе с диапазоном поиска, ограниченным экспертом. Для справки, вероятность успеха для нахождения цели в этом «ограниченном» диапазоне поиска оценивается в 13%, исходя из 0,27% вероятности достижения цели на каждый метод из 2700 случайных выборок. В стратегии HF-CL, как только компьютер берёт на себя принятие решений, эксперт фактически отказывается от контроля и больше не играет никакой роли в планировании эксперимента. Как и прежде, для статистической достоверности каждое условие повторялось 100 раз.

В стратегии HF-CL точка передачи А обеспечивает наименьшее количество данных от эксперта к компьютерному алгоритму. На данный момент медианная целевая стоимость для HF-CL всё ещё постоянно выше, чем у одного эксперта, с коэффициентом успеха всего 20% для Algo1, 43% для Algo2 и 42% для Algo3. Хотя эти значения значительно выше, чем результаты только для компьютеров, вероятность успеха менее 50% указывает на то, что затраты, скорее всего, увеличатся, а не уменьшатся. Таким образом, хотя некоторые начальные рекомендации улучшили производительность компьютерного алгоритма, HF-CL статистически даёт сбой в точке А.

На рис. 3 показаны результаты HF-CL с увеличением количества данных, предоставляемых компьютерному алгоритму. Мы наблюдаем V-образную зависимость целевых затрат от количества экспертных данных. От точек А до С доступ к большему количеству экспертных данных снижает общую стоимость достижения цели по мере повышения производительности алгоритма. Однако после точки С тенденция меняется на противоположную, когда доступ к большему количеству экспертных данных увеличивает стои-

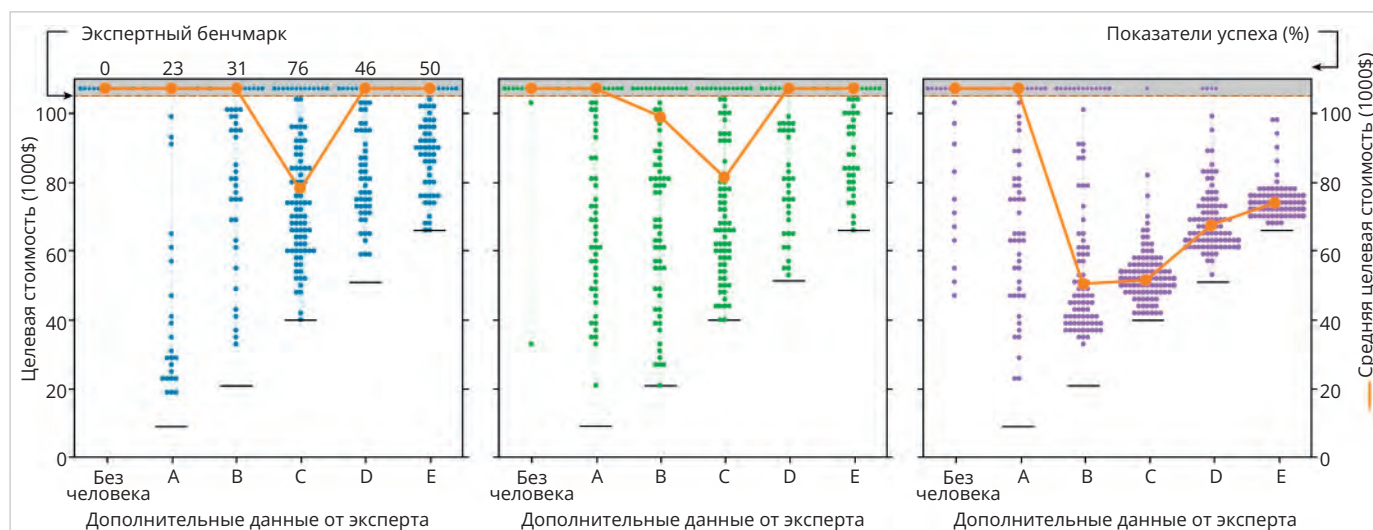


Рис. 3. Целевая стоимость с использованием стратегии HF-CL

мость без явных преимуществ алгоритма. Оптимальная производительность HF-CL для всех алгоритмов находится в точке С. Algo3 значительно превосходит другие алгоритмы, что связано либо с гибкостью моделей гауссовых процессов, либо с его иной функцией сбора данных, поскольку было показано, что алгоритм с более низкой доверительной границей превосходит функцию EI [23]. HF-CL с Algo3 устанавливает новый эталон со средней целевой стоимостью 52 000 долларов США, что составляет чуть менее половины затрат, требуемых только экспертом.

Таким образом, стратегия HF-CL с использованием эксперта в партнёрстве с Algo3 выиграла соревнование, надёжно снизив целевые затраты на разработку процесса плазменного травления по сравнению с экспертным эталоном.

Объяснение результатов

Виртуальная среда процессов предоставляет средства для тестирования различных подходов к разработке технологий в полупроводниковой промышленности, деятельность, которая в реальной лаборатории была бы чрезмерно дорогостоящей. Производительность людей с разным уровнем квалификации – от экспертов до новичков – обеспечивает качественные точки сравнения одного и того же процесса. Результаты показывают, что старшие инженеры-технологи разрабатывают процессы примерно вдвое дешевле, чем младшие инженеры-технологи, что указывает на важность знания предметной области в нашей отрасли. Компьютерные алгоритмы без какой-

либо предварительной подготовки показали низкую производительность по сравнению с экспертом: менее 5% всех их траекторий достигают цели при более низкой стоимости достижения цели. Это подтверждает наши первоначальные ожидания, что компьютерные алгоритмы, запускаемые с нуля, не выдерживают конкуренции – они могут достичь поставленной цели, но со слишком высокими издержками. Это проявление проблемы «малых данных». Мы просто не можем позволить себе достаточный объём данных, необходимый компьютеру для точного предсказания метода процесса.

Ключевым результатом этого исследования является успех стратегии HF-CL. Эта стратегия основана на том, что эксперт имеет преимущество на ранней стадии разработки процесса, а компьютерный алгоритм превосходит человека на более поздней стадии. Было показано, что благодаря сочетанию этих преимуществ HF-CL снижает затраты на достижение цели вдвое по сравнению с одним только экспертом. Преимущество человека-эксперта объясняется важностью знания предметной области, которого не хватало этим алгоритмам для качественной навигации по, казалось бы, безграничным возможностям выбора методов. Может показаться интуитивным, что человеческое руководство помогает компьютерам, но если алгоритмы лучше справляются с огромными сложными задачами, предположительно, они могли бы доминировать в начале разработки [24]. Вместо этого компьютерные алгоритмы становятся компетентными только после предоставления соответствующих данных и, желатель-

но, также с ограниченным диапазоном. Принцип HF-CL напоминает ранние попытки решения проблем ИИ с предположением, что его можно применять и в других ситуациях с небольшим объёмом данных. Например, на заре компьютерных шахмат (до эпохи больших данных) первая программа в 1951 году была развёрнута только для двух последних ходов, тогда как начальные ходы остаются в основном такими же, как те, что определяются людьми [6]. В фолдинге белков метод направленной эволюции, получивший Нобелевскую премию, также требует «подходящей отправной точки», обозначенной людьми [25].

Хотя эффективность HF-CL может показаться очевидной в ретроспективе, результаты показывают, что стратегия работает только при определённых обстоятельствах. Даже при наличии партнёрства с опытным инженером успех HF-CL сильно зависит от того, в какой момент человек передаст эстафету компьютеру: если слишком рано, алгоритмам будет не хватать достаточного руководства; если слишком поздно, человек становится фактором повышенных затрат. Этот принцип воплощён в выпуклой V-образной зависимости от дополнительных экспертных данных на рис. 3. Наша интерпретация формы V заключается в том, что глубина представляет максимальную экономию средств по сравнению с экспертом, тогда как вершина представляет собой оптимальную точку перехода от человека к компьютеру. Левая часть V соответствует улучшенной производительности алгоритмов с большим количеством данных. Эта часть V согласуется с ранее опубли-

кованными наблюдениями и общим представлением о том, что чем больше данных, тем лучше [10].

Более необычная и заметная часть фигуры V – правая сторона. Именно здесь стоимость достижения цели возрастает даже по мере того, как алгоритмы получают доступ к большему количеству экспертных данных. Здесь высокая стоимость данных привела к общему повышению затрат за неоптимальный выбор метода человеком, что иллюстрирует важность качества данных. Ценность интуиции даже для нашего опытного старшего инженера заметно уменьшилась, что позволило компьютерным алгоритмам стать статистически более успешными в выборе рецептов. Перекрытие инвертированного режима с этапом тонкой настройки предполагает, что этот этап может быть лучше пройден компьютерными алгоритмами. Наблюдение за V-образным феноменом для различных комбинаций человека и компьютера укрепляет нашу уверенность в том, что наши выводы применимы к этой проблеме с недостаточностью данных, несмотря на относительно небольшое число проведённых тестов. Кроме того, мы считаем, что явление V-образной кривой является естественным следствием попыток минимизировать затраты в условиях ограниченности дорогостоящих данных и жёстких допусков, как это имеет место во многих производственных процессах, когда потребность в большем количестве данных напрямую конкурирует со стоимостью получения этих данных.

Для того чтобы промышленность могла применить уроки стратегии HF-CL к реальному производству полупроводников, будет важно понять, как эти идеи применимы к другим процессам и когда люди должны отказаться от контроля, а именно, как определить идеальный момент передачи контроля алгоритмам. Мы показали, что экономия затрат зависит от конкретной комбинации человек-алгоритм (рис. 3). Кроме того, мы ожидаем, что правая часть V может не проявиться, если требования по целям были снижены, или, наоборот, может доминировать в процессах, которые нуждаются только в перенастройке, такой как согласование камер (или перенос процесса на другой инструмент). Человеческие знания могут быть особенно важны в многомерном исследовательском пространстве, задержи-

вая передачу их компьютеру. Другими факторами, которые могут повлиять на момент передачи, являются технологический шум, дрейф технологического процесса, целевой допуск, размер партии, ограниченный диапазон и структура затрат. Нам предстоит ещё многое проверить и многому научиться. Эти темы являются хорошими кандидатами для дальнейшего систематического изучения на платформе виртуальных процессов.

Помимо технических проблем, вероятно, возникнут и культурные проблемы в партнёрстве людей с компьютерами [26, 27]. В нашем исследовании мы наблюдали, как поведение компьютера расходится с тем, как инженеры-технологи обычно разрабатывают процессы.

Инженеры почти исключительно использовали одномерные и двумерные изменения параметров для рационализации своего экспериментального плана, тогда как компьютеры использовали многомерные изменения параметров без каких-либо объяснений. Людям может быть трудно принять методы, которые они не понимают.

Инженеры запрашивали в среднем четыре эксперимента на партию, в то время как компьютеры ограничивались только одним экспериментом на партию, что, вероятно, считалось неэффективным в лаборатории.

Инженеры неуклонно продвигались к цели (рис. 2), в то время как компьютеры использовали исследовательские стратегии выбора метода, которые кажутся проигрышными. Противоречивые ходы ИИ хорошо задокументированы в поединках между компьютером и человеком в настольных играх [28]. В лаборатории инженеры-технологи наверняка будут сопротивляться вмешательству и непреднамеренному повышению затрат без каких-либо гарантий успеха. В конечном счёте, доверие к компьютерным алгоритмам будет означать изменение десятилетий культурных ожиданий в области разработки процессов. Мы надеемся, что виртуальная среда поможет инженерам-технологам лучше понять, как сотрудничать с компьютерами в разработке технологических процессов.

Выводы

Применение ИИ в технологических процессах всё ещё находится в зачаточном состоянии. Человеческий опыт останется важным в обозримом буду-

щем, поскольку знание предметной области является незаменимым для навигации на более ранних этапах разработки процесса. Тем не менее успех стратегии HF-CL показывает нам, что люди, как и в предыдущих приложениях автоматизации, скоро будут освобождены от утомительных аспектов разработки процессов. В будущем возможности компьютерных алгоритмов могут быть расширены за счёт кодирования знаний предметной области в алгоритмы (явно или косвенно), чтобы обеспечить более ранние точки передачи контроля над разработкой. Существует богатая литература по обучению с переносом домена, в которой данные из похожих, но не идентичных доменов могут быть использованы для ускорения обучения в новых доменах [29]. Ещё одним перспективным направлением в области ИИ является запечатление знаний о предметной области в форме предшествующего убеждения. [23, 30]. В самом деле, создание или изучение подходящего antecedenta можно рассматривать как конкуренцию изучаемой здесь стратегии HF-CL. Другие потенциальные подходы в литературе включают модели механистической физики [10]. В любом случае крайне нелинейные и сложные отношения между входными и выходными параметрами означают, что потребуется больше данных для обновления любой предыдущей модели вблизи цели, в которой становятся заметными взаимодействия более высокого порядка. Постоянная потребность в большем количестве данных в конкретных режимах, представляющих интерес, практически гарантирует, что разработка процессов будет по-прежнему восприимчива к проблеме нехватки данных даже при условии использования компьютерных алгоритмов.

Таким образом, хотя компьютерные алгоритмы сами по себе смогли разработать процесс независимо, используя большие объёмы данных, они не смогли сделать это с меньшими затратами на достижение цели, чем человек. Только в партнёрстве с экспертом, который руководит гибридным режимом, алгоритмы могут продемонстрировать заметный успех в выполнении задач. Результаты этого исследования указывают на способ существенного снижения затрат на достижение цели за счёт объединения преимуществ человека и компьютера. Этот нетрадиционный подход к проектирова-

нию процессов потребует изменений в человеческом поведении, чтобы реализовать его преимущества. Результаты этого исследования укрепляют нашу уверенность в том, что мы находимся на пути к заметному изменению способов разработки процессов для полупроводниковых микросхем. При этом мы ускорим критическое звено в полупроводниковой экосистеме, используя ту самую вычислительную мощность, которую обеспечивают эти полупроводниковые процессы. По сути, ИИ будет помогать создавать себя, подобно знаменитому рисунку М.К. Эшера, на котором две руки рисуют друг друга.

Литература

1. IEEE. International Roadmap for Devices and Systems, 2020 Edition (IEEE, 2020).
2. Graves, D. B. Plasma processing. IEEE Trans. Plasma Sci. 22, 31–42 (1994).
3. Kanarik, K. J. Inside the mysterious world of plasma: a process engineer's perspective. J. Vac. Sci. Technol. A 38, 031004 (2020).
4. Kurzweil, R. The Singularity is Near: When Humans Transcend Biology (Viking, 2005).
1. Tegmark, M. Life 3.0: Being Human in the Age of Artificial Intelligence (Penguin, 2018).
2. Hsu, F.-H. Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion (Princeton Univ. Press, 2002).
3. Silver, D. et al. Mastering the game of Go without human knowledge. Nature 550, 354–359 (2017).
4. Samukawa, S. et al. The 2012 plasma roadmap. J. Phys. D 45, 253001 (2012).
5. Winters, H. F., Coburn, J. W. & Kay, E. Plasma etching a “pseudo-black-box” approach. J. Appl. Phys. 48, 4973–4983 (1977).
6. Zhang, Y. & Ling, C. A strategy to apply machine learning to small datasets in materials science. NPJ Comput. Mater. 4, 28–33 (2018).
7. Kim, K. et al. Extending the DRAM and FLASH memory technologies to 10nm and beyond. Proc. SPIE 8326, 832605 (2012).
8. Greenhill, S., Rana, S., Gupta, S., Vellanki, P. & Venkatesh, S. Bayesian optimization for adaptive experimental design: a review. IEEE Access 8, 13937–13948 (2020).
9. Shao, K., Pei, X., Grave, D. B. & Mesbah, A. Active learning-guided exploration of parameter space of air plasmas to enhance the energy efficiency of NOx production. Plasma Sources Sci. Technol. 31, 055018 (2022).
10. Shahriari, B., Swersky, K., Wang, Z., Adams, R. P. & De Freitas, N. Taking the human out of the loop: a review of Bayesian optimization. Proc. IEEE 104, 148–175 (2016).
11. Lang, C. I., Jansen, A., Didari, S., Kothnur, P. & Boning, D. S. Modeling and optimizing the impact of process and equipment parameters in sputtering deposition systems using a Gaussian process machine learning framework. IEEE Trans. Semicond. Manuf. 35, 229–240 (2021).
12. Chen, Z., Mak, S. & Wu, C. F. J. A hierarchical expected improvement method for Bayesian optimization.
13. Guler, S., Schoukens, M., Perez, T. D. & Husakowski, J. Bayesian optimization for tuning lithography processes. IFAC-PapersOnLine 54, 827–832 (2021).
14. Foreman-Mackey, D., Hogg, D. W., Lang, D. & Goodman, J. emcee: the MCMC hammer. Publ. Astron. Soc. Pac. 125, 306 (2013).
15. Akiba, T., Sano, S., Yanase, T., Ohta, T. & Koyama, M. in Proc. 25th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining 2623–2631 (ACM, 2019).
16. Bergstra, J., Bardenet, R., Bengio, Y. & Kégl, B. in Proc. 24th International Conference on Neural Information Processing Systems (Curran Associates, 2011).
17. Rasmussen, C. E. & Williams, C. K. I. Gaussian Processes for Machine Learning (MIT Press, 2006).
18. Fortuin, V. Priors in Bayesian deep learning: a review. Int. Stat. Rev. 90, 563–591 (2022).
19. Liang, Q. et al. Benchmarking the performance of Bayesian optimization across multiple experimental materials science domains. NPJ Comput. Mater. 7, 188 (2021).
20. Silver, N. The Signal and the Noise: Why so Many Predictions Fail-But Some Don't (Penguin, 2012).
21. Miller, J. L. Chemistry Nobel winners harnessed evolution to teach old proteins new tricks. Phys. Today 71, 22–25 (2018).
22. Dietvorst, B. J., Simmons, J. P. & Massey, C. Algorithm aversion: people erroneously avoid algorithms after seeing them err. J. Exp. Psychol. Gen. 144, 114–126 (2015).
23. Dafoe, A. et al. Cooperative AI: machines must learn to find common ground. Nature 593, 33–36 (2021).
24. AlphaGo versus Lee Sedol. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/AlphaGo_versus_Lee_Sedol (2021).
25. Pan, S. J. & Yang, Q. A survey on transfer learning. IEEE Trans. Knowl. Data Eng. 22, 1345–1359 (2010).
26. Ziatdinov, M. A., Ghosh, A. & Kalinin, S. V. Physics makes the difference: Bayesian optimization and active learning via augmented Gaussian process. Mach. Learn. Sci. Technol. 3, 015003 (2022).



НОВОСТИ МИРА

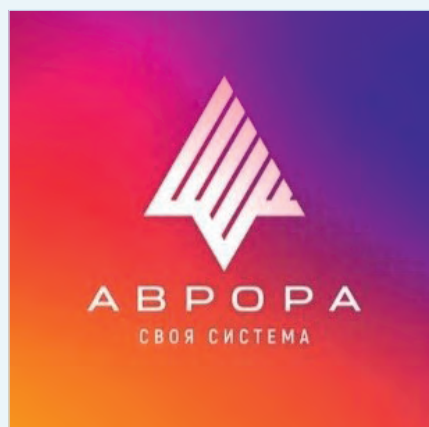
Доработку отечественной ОС «Аврора» оценили в 300 млрд рублей

Роскомнадзор провёл консультации с отечественными производителями смартфонов и специалистами по модификации операционной системы «Аврора» для адаптации к мобильным устройствам, информирует «Коммерсантъ».

На встрече были представители таких компаний, как Yadro, «Аквариус», «Лаборатория Касперского» и другие. Предложено было создать ассоциацию, способную противостоять доминированию зарубежных ОС.

Эксперты, опрошенные изданием, утверждают, что в текущих условиях создание российских ОС возможно лишь при государ-

ственной поддержке. Ожидается, что инвестиции в создание «Авроры» до 2027 года, когда система планируется к запуску на рынке, достигнут 300 млрд рублей.



Ростелеком отметил растущий интерес пользователей к устройствам на базе «Авроры». Кроме того, стало известно, что российские чиновники и законодатели начали использовать смартфоны с ОС «Аврора».

Представитель рынка рассказал, что сумма в 300 млрд рублей нужна не только для доработки «Авроры», но и для адаптации софта и драйверов ОС под отдельные устройства. Другой источник издания отметил, что в ОС внедрены новые программы и стало больше совместимых устройств, «но экосистема по-прежнему не закрывает основных потребностей заказчика», а потому для её внедрения нельзя обойтись без госфинансирования.

[industry-hunter.com](https://www.industry-hunter.com)

Электронные системы фиксации сейсмической активности, сейсмометры, геофоны и датчики в системах контроля и безопасности

Антти Суомалайнен

Электронные сейсмические устройства и оборудование для геофизических исследований, сейсморазведки, автоматизированного мониторинга несущих конструктивных элементов зданий и сооружений, нефтегазовых трубопроводов, искусственных хранилищ запасов, необходимых для жизнедеятельности человека, подземных баз критической инфраструктуры для жизнеобеспечения в случае техногенных, природных и иных катаклизмов на основе современных исследований сейсмических явлений особенно востребованы разработчиками РЭА. В статье рассматриваются методы усиления безопасности объектов критической инфраструктуры с помощью электронных устройств с сейсмодатчиками и перспективы их совершенствования с помощью отечественной инженерной мысли.

Актуальная необходимость контроля

Сейсмический мониторинг способен за несколько километров определять движение и классифицировать объект – по массе, динамике движения (последовательности), направлению, скорости и даже форм-фактору. Согласно пресс-релизу от апреля 2023 года, цифровое электронное устройство сейсмического мониторинга разработано специалистами концерна «Созвездие» («Росэлектроника»). Датчики засекают движение, на основе особенностей сцепления объекта с почвой классифицируют его как технику или человека, передают данные оператору, принимающему решение о реагировании. Уникальность устройства для сейсмического мониторинга достигается за счёт работы коэффициента выравнивания – особого алгоритма, измеряющего распределение шумовой энергии полос радиочастот. Это позволяет использовать его в любых, даже самых агрессивных погодных условиях, в том числе при повышенной влажности, в болотистой местности или под водой. Благодаря небольшому размеру устройства и отсутствию ретрансляторов изделие легко маскируется на местности. Разработка была отмечена золотой медалью Московского международного салона изобретений и инновационных тех-

нологий «Архимед». Есть перспективы применения систем безопасности на основе датчиков сейсмической активности для охраны обширных территорий промышленных объектов и раннего предупреждения о несанкционированном проникновении. Сейсмический мониторинг может эффективно дополнять или даже заменять видеонаблюдение на дальних расстояниях. Радиус действия (связи) некоторых устройств, способных контролировать от 50 до 70 датчиков, пока заявлен в пределах 10 км, при этом зона результативной и корректной работы составляет до 400 метров [3].

Контроль за движением участков поверхности земли, деформацией при землетрясениях, взрывах – результатах естественных или техногенных факторов – в 2023 году значительно усилен в связи с рисками террористической опасности вокруг нефте- и газопроводов федерального и международного значения, а также на территории добывающих и транспортирующих районов нефтегазовой промышленности. Проблематика обеспечения сейсмобезопасности жителей и объектов экономики России обоснована новыми вызовами времени, угрозами безопасности со стороны внешних сил и особенно тем, что значительная часть территории России в южных и восточных рай-

онах находится в зоне тектонических движений. Применительно к опасным природным и техногенным процессам понятия «опасность» и «риск» относятся соответственно к возможным воздействиям на объект и его реакции на воздействия («уязвимости») [9]. Вероятность возникновения колебаний грунта определённой интенсивности (сотрясения, поверхностные разрывы, взрывы, оползни, обвалы, цунами, иные сильные повреждения механическим и даже кумулятивным воздействием и др.) является элементом оценки сейсмического риска, фактором, влияющим на нормальную жизнедеятельность. Это то, что касается статичных неподвижных объектов. Представим себе новые методы защиты подземных хранилищ на примере резервуаров питьевой воды, расположенных в черте мегаполисов и в городах-спутниках. Хранилища критичных запасов нужны для повышения выживаемости граждан и органов управления в критичной ситуации современных угроз. Основные попытки вывести из строя критическую инфраструктуру будут направлены именно на такие объекты длительного хранения запасов обеспечения жизнедеятельности. К этому надо готовиться. На рис. 1 представлен вид на неприметный подземный резервуар запасов питьевой воды в Ленинградской области (для примера).

По той же аналогии читатель понимает, что мощные (объёмные) резервуары нефтепродуктов, ГСМ, продуктов питания и воды – как основной потребности для жизни человека – расположены в разных местах и в разных объёмах, а самые важные из них должны быть обеспечены круглосуточной охраной. В данном случае обеспечение сейсмоконтроля удалённых объектов, там, где нельзя или невозможно в силу ряда причин обеспечить их круглосуточную физическую охрану или нет возможности контро-



Рис. 1. Вид подземного резервуара запасов питьевой воды в Ленинградской области



Рис. 2. Датчик детонации для автомобиля

ля видеонаблюдения, позволит повысить уровень их защиты даже в регионах с нетипичной сейсмоактивностью. Особенно актуальной становится безопасность трубопроводов – наземных и подземных. Мониторинг трубопроводных систем, по которым осуществляется транспортировка продуктов добычи и переработки нефтегазовой промышленности, может осуществляться на основе измерения напряжённо-деформированного состояния (НДС). Сейсмодатчики, зафиксировав внешнее воздействие и передав в режиме реального времени аварийный сигнал на пульт контроля, позволят более точно относительно промежуточных пунктов контроля трубопроводов по уровню давления определить место воздействия и, таким образом, способствуют сокращению времени на локализацию аварии. На взрывные воздействия электронные датчики сейсмической активности реагируют так же, как при деформации почв и пород природного (естественного) свойства. Разведка с применением вероятностного анализа сейсмической опасности (ВАСО) – метод, сочетающий в себе альтернативные модели определения повторяемости сейсмических явлений, зависимости затухания сейсмического эффекта с расстоянием, а также явные и случайные неопределённости в вероятностной модели сейсмической опасности, также может быть полезен. Диагностика и мониторинг состояния строительных конструкций до и после взрывных воздействий – ещё одна сфера применения сейсмоконтроля с помощью электронных датчиков.

Мониторинг сейсмической и вулканической активности с решением задачи предупреждения в реальном времени о катаклизмах с помощью соответствующего ПО позволяет

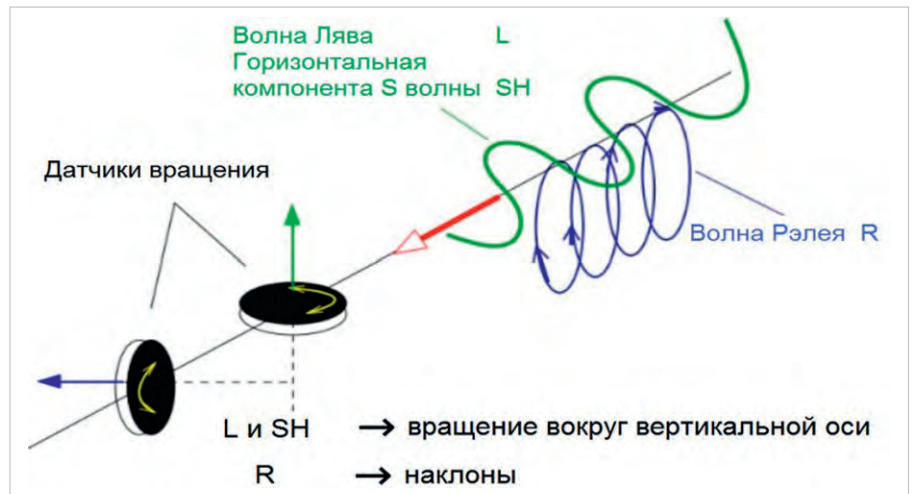


Рис. 3. Принцип работы датчика сейсмической активности, реализованного по принципу фиксации вращения и угла отклонения

определять эпицентр, рассчитывать силу и опасность – амплитуду виброускорения, виброскорости и виброперемещения. На территории России действует Федеральная специализированная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (ФССН) с функциями сбора (регистрации), хранения, передачи и обработки сейсмической и геофизической информации. В соответствии с директивой и требованиями ЕС 2011/65/EU (ROHS, ROHS II) об ограничении использования опасных веществ в электронном оборудовании сейсмодатчики и диагностическое оборудование изготавливаются в России по бессвинцовой технологии. Для условно точного расчёта эпицентра и определения магнитуды необходимо иметь минимум две сеймостанции (лучше 5–8), расположенные на расстоянии до 10 км друг от друга. Для более обширного мониторинга подключают несколько локальных сейсмометрических станций, объединяя их в сеть, и осуществляют мониторинг сейсмических событий в регионе.

Современные сейсмографы и сейсмодатчики

Перспективные разработки актуальны по следующим направлениям: совершенствование линейно-спектрального метода, применимого для интегрального и дифференцированного сейсмического движения (и сопутствующей проблематики) и моделирование пространственно-временных волновых полей движения грунта в виде ротаций от волн Рэлея и Лява, соответствующих заданным акселерограммам и грунтовым условиям конкретной местности [7]. Условно простейший датчик детонации элементов ДВС (двигателя) для автомобиля ВАЗ-21214 (и др.) представлен на рис. 2.

Принцип работы датчика сейсмической активности, реализованного по принципу фиксации вращения и угла отклонения, представлен на рис. 3.

Регистраторы сейсмических сигналов применяются автономно или в составе автоматизированных систем мониторинга для проведения сейсмических и сейсмологических исследований методами преломлённых,



Рис. 4. Внешний вид широкополосного трёхкомпонентного автономного сейсмографа ZET 7152-N версии 3



Рис. 5. Сейсмометр модели 7156 с диапазоном рабочей частоты 0,2...40 Гц



Рис. 6. Дополнительный модуль к сейсмометру 7156



Рис. 7. Внешний вид дополнительного модуля 7177

отражённых волн и широкополосного сейсмозондирования (МОВ, МПВ, ГСЗ) от искусственных и от естественных источников, методами обменных волн землетрясений (МОВЗ), а также при инженерно-геологических изысканиях. На рис. 4 представлен внешний вид широкополосного трёхкомпонентного автономного сейсмографа ZET 7152-N версии 3.

В устройстве не предусмотрена программная и аппаратная блокировка портов TCP 7176, 7177, UDP 7176 (MULTICAST). Представленный на рис. 5 цифровой короткопериодный сейсмометр модели 7156 с диапазоном рабочей частоты 0,2...40 Гц позиционируется как цифровой трёхосевой геофон. Частотный диапазон 0,3...100 Гц, интерфейс CAN 2.0.

Широкополосный трёхкомпонентный автономный сейсмограф ZET 7152-N версии 3 с условно большим динамическим диапазоном предназначен для мониторинга движений грунта эквивалентной шкале Рихтера в диапазоне 1...10, а также используется при контроле локальных сетей, временных

установок, мониторинга строительных конструкций и инженерной сейсмологии. Устройство оснащено трёхкомпонентным цифровым короткопериодным сейсмодатчиком ZET 7156 в едином герметичном корпусе. В базовый комплект ZET 7152-N входит GPS-антенна, ЗУ с номинальным напряжением 19 В, соединительные кабели с разъёмами формата USB 3.0 и Ethernet, ПО, выполненное отечественными разработчиками.

На рис. 6 представлен дополнительный модуль-сейсмограф к датчику 7156.

Запись оперативной информации осуществляется дополнительно на внутренний сменный носитель SD-карту объёмом 64 Гбайт. Благодаря встроенному и дополнительному оборудованию сейсмографы могут работать и по локальной сети Ethernet, и по сети GSM с передачей данных на интернет-сервер по сети 4G в реальном времени, за счёт дополнительного внешнего модуля ZET 7177 (рис. 7).

Преобразователь интерфейса CAN 2.0 модели 7177 обеспечивает переда-

чу данных по основному и резервному каналам на ПК по сети GSM (2G-4G). Синхронизация нескольких сейсмографов в составе измерительной сети осуществляется приоритетно и автоматически сразу по определению спутников GPS/ГЛОНАСС. Так, с помощью модуля синхронизации 7175 с GPS-антенной обеспечивается синхронизация сигналов времени, а взаимная синхронизация сейсмографов в локальной сети осуществляется по протоколу RTP (IEEE1588), настраиваемому в ручном режиме через ПК оператора с помощью «мастера синхронизации» в сети.

Принцип действия и разработки

Сейсмодатчики могут фиксировать не только детонацию, но и информацию о вращательных движениях. Так, совместный контроль поступательной и вращательной составляющей помогает в интерпретации сейсмического сигнала:

- может быть достигнуто улучшение отношения сигнал/шум для сейсмических наблюдений;

- повышается качество сейсмических записей линейных перемещений за счёт коррекции чувствительности приборов к вращательным движениям;
- возможна уверенная идентификация фаз землетрясения и определение направления на источник, отчето существенно повышается чёткость вступления поперечных волн.

При исследовании свойств очага и строения среды совместное рассмотрение поступательной и роторной составляющих помогает определять положение плоскости разрыва в очаге и повышает возможности томографии. Изучение распределения и величины вращательных движений в сейсмоопасных зонах необходимо для оценки ситуации при внешних (в том числе взрывных) воздействиях, при землетрясениях и при изучении влияния свойств грунта непосредственно под источником сигнала, а также нелинейных эффектов в сейсмоопасных зонах.

Принцип работы

На графике (рис. 8) приведены обобщённые характеристики собственных шумов измерительных частей сейсмографа ZET 7152-N, сейсмического регистратора ZET 048-C со встроенным сейсмоприёмником BC 1313 и сейсмического регистратора ZET 048-C со встроенным сейсмометром CME 4211 в сравнении со стандартными усреднёнными характеристиками естественных микросейсм (по Петерсону).

Как видно из рис. 6, на низких частотах уровень шумов ZET 7152 значительно превышает по мощности минимальный природный уровень. На средних и высоких частотах уровень шумов примерно равен среднему природному уровню.

Минимум природных микросейсм наблюдается только в некоторых районах Земли и в исключительных случаях (при отсутствии естественных и техногенных помех). Поэтому сейсмограф ZET 7152 по уровню собственных шумов и динамическому диапазону пригоден для регистрации даже слабых и удалённых землетрясений, микросейсм малого и среднего уровня, а также вибрации производственного и промышленного уровней. Всё это делает его востребованным и незаменимым в электронных устройствах-контроллерах сейсмоактивности и анализаторах механических и взрывных воздействий на наземных и подземных

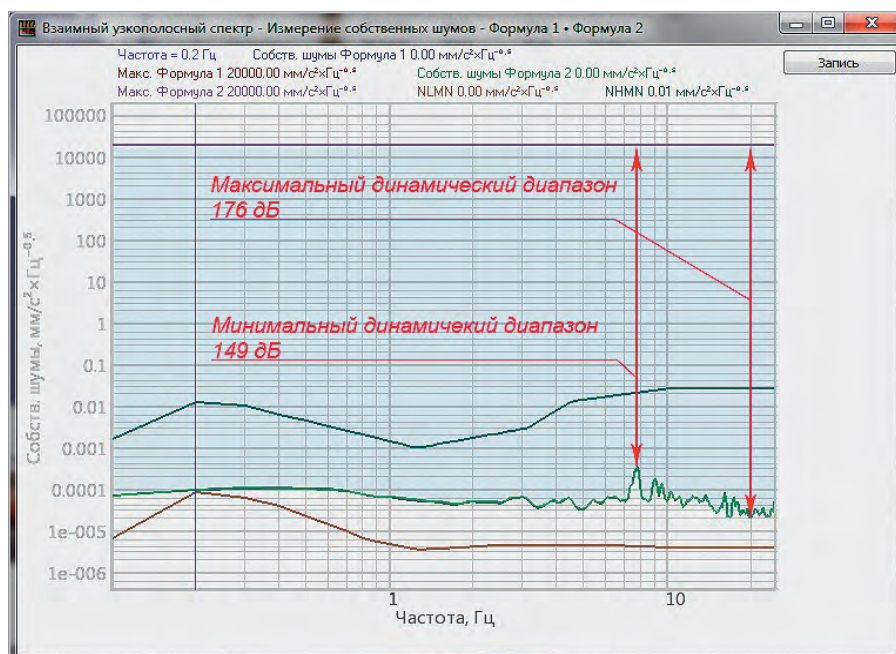


Рис. 8. Характеристики собственных шумов сейсмографов и регистраторов моделей ZET 7152-N, ZET 048-C со встроенным сейсмоприёмником BC 1313 и со встроенным сейсмометром CME 4211

объектах. Сейсмографы устанавливаются на жёсткую поверхность и крепятся при помощи пластин, идущих в комплекте. При креплении на горизонтальную плоскость требуется регулировка – поворот устройства по азимуту (в пределах 360°) и углу места (в пределах ±3°). Комплект эксплуатационной документации и визуализация работы сейсмографа в режиме реального времени доступны на портале сейсмологических наблюдений в [11].

Международная федерация сетей цифровых сейсмографов (FDSN) объединяет членов разного формата и форм собственности в профессиональные группы (в разных странах), обслуживание сейсмографов отлажено как в пределах конкретных географических границ, так и по всему миру. Это способствует продолжающимся исследованиям глобальной сейсмической активности Земли, в частности, в местах, где требуется обеспечить повышенную безопасность ввиду нахождения там критической инфраструктуры или её элементов: тоннелей, мостов, путепроводов, высотных зданий, аэродромов, атомных станций, шахт базирования военной техники, газо- и нефтепроводов. Сигналы с локальных сейсмологических станций транслируются на монитор оператора в режиме реального времени. Для просмотра сигналов доступны сейсмостанции, расположенные в разных точках страны: в арктическом поле, Аркти, Кисловод-

ске, Ловозере, Обнинске, Билибино, Магадане, Петропавловске-Камчатском, Тикси, Якутске, Южно-Сахалинске и др. Данные обновляются с периодичностью 1 раз в 4 секунды [10]. Для прочностного расчёта на пространственные нагрузки по интегральной и дифференцированной моделям воздействия необходимо совершенствовать методы расчётов. Линейно-спектральный метод (ЛСМ) обобщён на случай волнового сейсмического движения как для интегральной дилатационно-ротационной, так и для дифференцированной модели движения грунта [7]. Разработан метод моделирования пространственно-временного поля поверхностных волн Лява и Рэлея, включая ротационные компоненты, по акселерограмме, заданной в точке упругого грунтового основания. Этой проблемой в России занимаются многие учёные, достигшие прорывных успехов в совершенствовании защиты конструкций мостов, в числе которых к.т.н. А.А. Белый из ПГУПС Императора Александра I, описавший анализ технического состояния эксплуатируемых железобетонных мостовых сооружений [1].

Системы сейсмологического мониторинга на базе сейсмографов ZET 048-C и ZET 7152-N точно анализируют сигналы локальных сейсмометрических станций, что позволяет рассчитать эпицентр и магнитуду подземных толчков, а ПО позволяет отображать и использо-

Таблица 1. Технические характеристики сейсмографов отечественных разработчиков моделей ZET 7152-N и ZET 7156

| Параметр | Значение |
|--|--|
| Тип сейсмоприёмника | ZET 7152-N ZET 7156 |
| Количество осей | 3 для ZET 7152-N 3 для ZET 7156 |
| Частотный диапазон | 0,2...400 Гц |
| Максимальный регистрируемый уровень сигнала | ± 8 г (ZET 7152-N) до 5 мм/с (ZET 7156) |
| Уровень шума | 0,2 мг (ZET 7152-N) 0,0001 мм/с (ZET 7156) |
| Количество измерительных каналов | 6 |
| Частота дискретизации по каналам | 50, 100, 200, 2500 Гц (ZET 7152-N) 50, 100, 200, 500, 1000 Гц (ZET 7156) |
| Динамический диапазон | 80 дБ (ZET 7152-N) 106 дБ (ZET 7156) |
| Скорость обмена по шине Ethernet | 100 Мбит/с |
| Встроенная система электрического возбуждения чувствительных элементов с помощью актюатора | Для всех измерительных каналов согласно ISO 16063-32 |
| Источники синхронизация регистрируемых сигналов | GPS/ГЛОНАСС (возможность переключения на Galileo или BeiDou) |
| Синхронизация устройств внутри локальной сети | PTP (IEEE1588) |
| Точность синхронизации по GPS | 3 мкс |
| Точность синхронизации по PTP | 10 мкс |
| Время выхода приёмника GPS в режим | 2...15 мин |
| Время работы в автономном режиме, не менее | 12 ч |
| Объем встроенной энергонезависимой памяти | До 64 Гбайт |
| Время записи SD-карту объемом 64 Гбайт по 4 каналам при частоте дискретизации 500 Гц | Более 1000 ч |
| Скорость чтения с SD-карты (по USB) | > 10 Мбайт/с |
| Напряжение питания: во время работы во время зарядки | 12...27 В 16...27 В |
| Потребляемая мощность | 4 Вт |
| Формат записанных данных | MiniSEED; ANA/ANP доступно конвертирование в форматы CSV и SEG-Y через ПО |
| Степень защиты от попадания пыли и влаги | IP68 |
| Заявленный срок службы | 10 лет |
| Масса, не более | 5 кг |
| Габаритные размеры, не более | 260×160 мм |
| Варианты исполнения | Стандартное исполнение с расширенным диапазоном температур и специальное исполнение (см. ниже) |
| Рабочий температурный диапазон | -10...+50°C (стандартное исполнение) -40...+60°C (расширенный диапазон температур) |

вать в расчётах сейсмические данные не только со станций, расположенных на территории РФ, но и данные с других сейсмостанций, расположенных на неограниченном удалении (по всему миру). Техническое оснащение станций уже позволяет записывать данные с разрешением 25...50 бит в длительных временных интервалах с частотой выборки более 20...50 Гц (опросов в секунду). Это достигается благодаря разработанному универсальному стандарту SEED (Standard for Exchange of Earthquake Data) обмена сейсмическими широкополосными данными и сопутствующей параметрической информацией.

Практическое применение сейсмографов ZET 7152-N

Устройство с контролем питания встроенного сейсмоприёмника и индикацией синхронизации по GPS сочетает функции акселерометра и велосиметра. ZET 7152-N представляет собой сейсмограф с встроенным цифровым акселерометром с широким динамическим диапазоном и сейсмометром ZET 7156 с диапазоном рабочих частот 0,05...400 Гц, имеющий до 512 измерительных каналов и регистратор сейсмических сигналов с датчиком СМЕ-6111; диапазон частот 0,0167...50 Гц. «Младшая» модель – цифровой сейсмограф ZET 7152-N VER.2 – предназна-

чен для осуществления работ в шахтах; обладает диапазоном рабочих частот 3...200 Гц, в том числе для проведения сейсмического микрорайонирования достаточно плотно застроенных территорий – измерение и регистрация микросейсм природного и антропогенного происхождения проводятся трёхкомпонентным сейсмографом по методу Накамуры (Nakamura, 1989). Сейсмограф перемещается в контрольные точки наблюдений по исследуемой территории с длительностью одной записи 1–2 часа. Так за условно короткий период первично фиксируют характеристики грунта для дальнейших инженерно-геологических исследований. Метод Накамуры – один из вариантов метода спектральных отношений горизонтальной компоненты записанных микросейсм к вертикальной (HVSRRM). Спектральное отношение горизонтальной и вертикальной компонент понимается как аналог амплитудно-частотной характеристики, передаточной функции разреза грунтов в проекции на определённую толщу слоя земли.

Отличительные признаки и основные преимущества сейсмометров:

- широкий динамический диапазон – 176 дБ за счёт использования двух датчиков, работающих в разных частотных и амплитудных диапазонах для точного одновременного измерения как слабых (определение дальних землетрясений), так и сильных сигналов (расчёт баллов сейсмоактивности по шкале MSK-64, а также по шкале сейсмической интенсивности ШСИ-17, согласно ГОСТ Р 57546-2017);
- бездемонтируемая калибровка с использованием резонансного тестирования (ISO 16063-32: 2016) и калибровка с использованием ускорения свободного падения (ISO 16063-42:2014);
- возможность подключения дополнительных внешних датчиков;
- удобная в использовании панель управления;
- различные варианты интерфейса: автономная запись до 18 часов (стандартно), интерфейс LAN (стандартно), интерфейс GSM (опционально, с установкой дополнительного внешнего модуля);
- относительно высокая скорость передачи данных.

В табл. 1 представлены технические характеристики сейсмографов отечественных разработчиков моделей ZET 7152-N и ZET 7156.



Рис. 9. Внешний вид сейсмостанции Z-048E с датчиком SME-6111



Рис. 10. Сейсмометр модели 7054 и 7154



Рис. 11. Цифровой датчик деформации фирмы «Спектрон»



Рис. 12. Модель цифрового датчика деформации 7110 DS

Похожий форм-фактор имеют и сейсмограф Z-048C, и сейсмостанция Z-048E, и (вариант) ZET 048-I регистратора сейсмических сигналов с датчиком SME-6111 (рис. 9).

Регистраторы сейсмических сигналов с датчиком SME-6111 применяются автономно или в составе автоматизированных систем мониторинга для проведения сейсмических и сейсмологических исследований методами преломлённых, отражённых волн и глубоководного сейсмозондирования (МОВ, МПВ, ГСЗ) от искусственных и от естественных источников, методами обменных волн землетрясений (МОВЗ), а также при инженерно-геологических изысканиях [8]. В базовый комплект поставки регистратора сейсмических сигналов с датчиком SME-6111 (кроме цифрового регистратора) входят:

- сейсмоприёмник SME-6111 с кабелем для подключения (2 м);
- кабель USB;
- кабель Ethernet;
- блок питания для регистратора А04-19;
- GPS-антенна;
- встроенная карта памяти для записи сигналов в автономном режиме;

- программное обеспечение сейсмоконтроля и ПО для записи и воспроизведения данных;
- SD-карта на 64 Мбайт (установлена внутри регистратора);
- комплект эксплуатационной документации.

ZET 048-C регистратор сейсмический цифровой имеет встроенный сейсмоприёмник SME-4211 с диапазоном рабочих частот 0,033...50 Гц. Анализ изменения динамических характеристик грунтов, фундаментов, зданий и сооружений в процессе эксплуатации на базе мобильного комплекса сейсмостанции ZET 048-C обеспечивает ситуационный контроль в месте техногенной катастрофы, аномалии и военных действий, в частности после пожара, взрыва, в аварийно-опасных сооружениях или зданиях, где срок эксплуатации требует частых проверок.

Сейсмостанции выпускаются с разным количеством измерительных каналов: 4, 8 и 16. Сейсмометры моделей 7054 и 7154 представляют собой цифровой инклинометр с встроенным первичным преобразователем и интерфейсом CAN2.0 с элементом СМИК и измеряемым углом наклона. Внешний вид устройства представлен на рис. 10.

К сейсмометрам моделей 7054, 7154 и 7110 DS применяют цифровой датчик деформации, представленный на рис. 11.

Датчик рассчитан на четырёхпроводной шлейф подключения со следующей распиновкой разъёма:

- питание +9...+24 В постоянного тока – красный провод;
- выход А – зелёный провод;
- выход В – синий провод;
- GND – жёлтый провод.

При подключении провода можно не экранировать.

Модель цифрового датчика 7110 DS деформации с интерфейсом передачи данных CAN 2.0 и режимом самодиагностики (рис. 12) разработана для испытаний конструкций на растяжение.

Иллюстрации возможных креплений датчиков детонации и сейсмометров представлены на рис. 13 и рис. 14.

Мобильный (переносной) комплект для производства сейсморазведочных работ состоит из регистратора, цифровых геофонов, соединяемых магистральным кабелем в линию приёма и специализированного пакета программного обеспечения для регистрации и анализа данных. Комплект дат-



Рис. 13. Иллюстрации возможного крепления датчиков детонации и деформации



Рис. 14. Иллюстрации возможного крепления датчиков детонации и деформации



Рис. 15. Вид на датчики-геофоны

чиков выглядит так, как представлено на рис. 15.

Комплект для сейсморазведочных работ предназначен для работ в полевых условиях в различных климатических зонах. Подключение геофонов осуществляется через брызгозащитные разъёмы GSC-4H (Herma-4). Применение телеметрического 4-жильного кабеля диаметром 6,5 мм обеспечивает минимальный вес сейсмокосы 3,14 кг на 100 м кабеля. Шаг между кабельными отводами (соответственно, между подключаемыми геофонами) может варьироваться [9].

Из зарубежных аналогов уместно отметить датчик сейсмической активности фирмы SISMALOCK модели SDT21, разработанный для использования в бытовых/жилых газораспределительных сетях; они чувствительны, способны обнаруживать сотрясения (сейсмические волны) и сигнализировать о них. Могут применяться в обособленном виде. Когда сигнал с датчика достигает определённого порогового значения, с помощью усилителя – токового ключа активируется релейный выход, коммутирующий электрическую цепь исполнительного устройства (электромагнитные газовые клапаны, сирены, смс-оповещение и т.д.). Опреде-

ление порогового значения регулируется так, что «сигнал тревоги» формируется только в том случае, если ожидаемое «землетрясение» (воздействие) может иметь разрушительные последствия для людей и окружающей среды. Ещё один вариант – EVO SDT22 специально разработан для промышленного и гражданского использования. Отличительная особенность в том, что сейсмодатчик имеет двойную MEMS, а также обладает двумя адресными выходами по протоколу ModBus: выход управления с макс. выходным током 4...20 мА и коммутация релейного выхода с током до 5 А, в том числе для электрической сети 230–240 В. Первое устройство реализуется по цене 350 USD, а второе почти в 5 раз дороже. Тем не менее универсальные возможности для бытового назначения делают этот датчик удобно согласуемым с другими системами АСУ ТП на производстве и в системах безопасности для предотвращения возникновения нежелательных последствий (таких как случайное отключение электроэнергии, остановка промышленных процессов и др.).

В непрофессиональной электронике нашли активное применение молекулярно-электронные датчики. Один из них – многокомпонентный сейсмодатчик СМЕ-206С. Его особенности (кратко) таковы:

- нечувствителен к линейным движениям;
- нечувствителен к поперечным вращениям;
- разрешение 3×10^{-7} рад / с² / Гц^{1/2};
- динамический диапазон > 120 дБ;
- частотный диапазон 0,05–20 Гц;
- чувствителен к поперечным вращениям – 2%;
- разрешение 6×10^{-5} рад/с²;
- динамический диапазон 80 дБ при $f > 1$ Гц.

Инновационные аккумуляторы для сейсмодатчиков

Одна из важнейших составляющих стабильности работы электронного устройства в автономном или бесперебойном режиме – надёжная АКБ. Особенно это важно в устройствах сейсмических станций, расположенных удалённо от «линий» электроснабжения или на труднодоступных участках, посещение которых организовано в соответствии с определённым графиком, регламентом (трубопроводы критической инфраструктуры).

В 2018 году впервые изобретён структурный аккумулятор с участием композитного углеродного материала, выдерживающего значительные механические нагрузки и температурное воздействие в широком диапазоне. Модуль продольной упругости – физическая постоянная материала, характеризующая его жёсткость. Чем жёстче материал, тем меньше он деформируется при данном напряжении. Модуль упругости 1-го рода – модуль Юнга имеет ту же размерность, что и напряжение деформации, выражается в значениях Па. Три последовательно соединённых АКБ с эквивалентным напряжением 8,4 В и модулем продольной упругости обеспечивали плотность материала, соответствующую продольной упругости (некритичной деформации) до 28 ГПа. По механической прочности структурный аккумулятор вместо положения «от среднего» между условно плавким свинцом и оловом достиг условной плотности и жёсткости дюралюминия. Перспективная для разработчиков мысль в том, что из новой батарейки можно делать прочный корпус даже для самолёта, и корпус сам будет «аккумулятором». При этом облегчение веса любой конструк-

ции, особенно изначально массивной и «тяжёлой», можно трансформировать и в скорость, и в дальность передвижения, что, несомненно, актуально для подвижных и летающих транспортных средств и средств доставки (БПЛА). В «безмассовом» аккумуляторе из углепластика структурную основу конструкции обеспечивают электроды и электролит: электролитом пропитана стеклоткань, разделяющая электроды, и также она дополнительно укрепляет батарею. При этом катод аккумулятора изготовлен из углерода, а анод – из фольги, из соединения лития и фосфата железа. При создании анода (полюса) из углерода, что дополнительно повысит прочность аккумулятора, и уменьшении плотности разделительного стекловолокна с пропиткой электролитом рабочий ток АКБ и скорость заряда возрастут. Это перспективное направление развития современной электроники, материаловедения и химической промышленности в теме НТ-прогресса [5].

На рис. 16 представлены последовательно соединённые структурные батареи общим напряжением 8,4 В с модулем продольной упругости 28 ГПа.

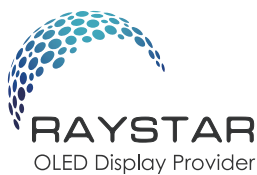


Рис. 16. Последовательно соединённые структурные батареи общим напряжением 8,4 В с модулем продольной упругости 28 ГПа.

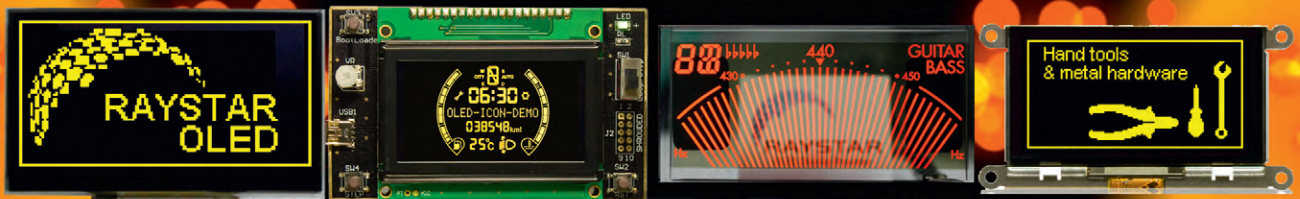
Источник изображения: Yen Strandqvist/Chalmers University of Technology

Проблема и одновременно направление усовершенствования (инновационной мысли) определена в условно низкой плотности запасаемой энергии. Динамика инноваций такова: в 2018 году достигнута плотность материала в значении не критичной деформации 28 Вт·ч/кг. В 2020 году тот же параметр увеличен до 75 Вт·ч/кг, а в

конце 2022 года – до 121 Вт·ч/кг. Пока и этот показатель более чем в 3 раза уступает возможностям современных массовых литиевых аккумуляторов, но... Инновационный элемент почти нисколько не весит – в сравнении с литиевыми и гибридными (на основе лития) АКБ. Поэтому с учётом динамики достижения (увеличения)



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 ±175°
- 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



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

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



Рис. 16

плотности зарядной энергии, которая, как мы показали, налицо, через несколько лет «безмассовым» аккумуляторам не будет альтернативы в электронных системах и устройствах, к которым предъявляются требования повышенной надёжности и пожарной безопасности, работающим в критической инфраструктуре обеспечения безопасности государства и людей, военной промышленности, космической отрасли и даже в гражданском самолётостроении и... электромобилестроении. Что до пожарной безопасности, то «суперконденсаторы», созданные по технологии усовершенствованных ионисторов, инновационные титанаты и лиферы вполне безопасны относительно условно «древних» литиевых и литий-кобальтитных батарей, подверженных возгоранию, особенно при механическом воздействии. Следом в перспективе идут разработки по натрий-ионным аккумуляторам в устройствах с сейсмическими датчиками и не только.

Перспективы и нюансы разных сейсмодатчиков

Ротационные сейсмометры TABS с регулировкой угла поворота маятника – ещё одно направление развития электронных сейсмодатчиков, к примеру, в вулканологии и анализе собственных колебаний Земли. Исследование строительных конструкций с помощью сейсмометров, несомненно, выявляет их критичность к вращательным движениям – так определяются моды вращательных движений и резонансные частоты. Сейсморазведка позволяет разделять P- и S-волны и детектировать с большой точностью прибытие поверхностной волны, корректировать показания прецизионных приборов, чувствительных к вращательным движениям, в том числе направленных на поиск гравитационных волн [2]. Так, «крутильный датчик» выгодно отличается способностью разделять сигналы от мощного удалённого источника от сигналов ближнего слабого источника, в то время как датчики вращения (в вертикальной составляющей) обеспечивают дополнительные наблюдения свободных тороидальных колебаний, которые затруднены в фиксации стандартными сейсмодатчиками. Поэтому датчики вращения имеют большой потенциал для дистанционного мониторинга подземного бурового оборудования.

Несколько выводов

Система контроля сейсмических воздействий (СКСВ) для фиксации и изучения движения участков земли или конструкций при воздействии на них землетрясений, взрывов и других естественных или техногенных факторов очень перспективна и для мониторинга состояния технологических объектов (в частности, трубопроводных систем, по которым осуществляется транспортировка продуктов добычи и переработки нефтегазовой промышленности). Имеет возможность интеграции в сторонние системы через протоколы OPC, ModBus, а также через БД.

Перспективная сейсмотехника с электронным «наполнением», анализом и управлением, как ни странно, тесно связана с лазерной. И сейсмодатчики с элементами лазерной техники – это, несомненно, проблематика завтрашнего дня. Притом что первый кольцевой лазер (с функцией регистрации сейсмической активности) был испытан в 1963 году, направление приложений креативных идей весьма перспективно. Мобильный сейсморазведочный комплекс позволяет производить не только геофизические исследования в полевых условиях методами преломлённых и отражённых волн для изучения верхних слоёв земли (грунта) и подземных аномалий, поисков и разведки полезных ископаемых и инженерно-геологические изыскания для своевременного обследования строительных площадок зданий и сооружений, но, в примерах с сейсмодатчиками моделей 7054, 7154, 7156 и аналогичных с высокой чувствительностью, их можно использовать для обнаружения несанкционированных механических воздействий и взрывов. Поскольку ПО обеспечивает полнофункциональный анализ сигналов с применением различных алгоритмов и визуализацией результатов в 3-мерном виде, а датчики подключаются по высокоскоростной линии, их применение востребовано в инновационных разработках, связанных не только с сейсмоактивностью отдельных участков, но и для контроля объектов критической инфраструктуры и определения мест несанкционированного воздействий на них, сокращения срока восстановления объектов после «аварии». При помощи высокоэффективной среды графического программирования SCADA можно формировать удобные интерфейсы для автоматизированных рабочих мест по мониторингу

сейсмических событий. Это что касается сейсмодатчиков промышленных и серийных. Что касается ротационных сейсмодатчиков, то фиксируемые ими вращательные движения можно разделить на две группы: наблюдаемые на телесеismicких расстояниях и регистрируемые в ближней зоне. Несмотря на недавние достижения, ротационная сейсмология хоть и перспективна, но мало изучена в связи с малым количеством работ и наблюдений. Поэтому мобильные датчики будут совершенствоваться ещё очень долго.

Литература

1. Бельый А.А., Андрушко С.В. Пути повышения надёжности эксплуатации железобетонных мостов для пропуска сверхнормативной нагрузки // Известия ПУПС. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-povysheniya-nadezhnosti-ekspluatatsii-zhelezobetonnyh-mostov-dlya-propuska-sverhnormativnoy-nagruzki>.
2. Вращательная сейсмология // URL: <https://www.itpz-ran.ru/wp-content/seminars/Kislov.pdf>.
3. В «Ростехе» создали сейсмодатчики, засекающие движение за 10 км // URL: https://aif.ru/society/science/v_rostehe_sozdali_seysmodatchiki_zasekayushchie_dvizhenie_za_10_km.
4. Зеленоградская электротехническая лаборатория // URL: <https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/seysmostantsii/zet-7152-n-ver-3/>.
5. Кашкаров А.П. Ионистор в автономной электрической цепи // Современная электроника. № 1. 2014. С. 2–4.
6. Оборудование для сейсмических исследований // URL: <https://zetlab.com/wp-content/uploads/2018/11/Seysmicheskie-registratoryi-ZETLAB-listovka.pdf>.
7. Позняк Е.В. Развитие методов волновой теории сейсмостойкости строительных конструкций: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М.: НИУ МЭИ, 2017.
8. Сейсмика. Каталог продукции // URL: <https://zetlab.com/wp-content/uploads/2017/09/Seysmostantsii.pdf>.
9. Сейсмическая безопасность // URL: https://bstudy.net/720499/tehnika/seysmicheskaya_bezopasnost.
10. Сейсмическое оборудование // URL: <https://zetlab.com/shop/izmeritelnoe-oborudovanie/seysmostantsii-zetlab/>.
11. Система сейсмологических наблюдений. Трансляция через программное обеспечение ZETLAB // URL: <https://zetlab.com/podderzhka/seysmika/sistema-seysmologicheskikh-nablyudeniya/>.



НОВОСТИ МИРА

IQ Technology выявила рост количества контрафактной техники на маркетплейсах

Доля поддельных наушников и колонок на российских маркетплейсах за год выросла с 27 до 69%, а смарт-часов – с 35 до 63%, выяснили аналитики. Эксперт указала, что нечестные продавцы стали менее осторожны, подделок будет больше.



На российских маркетплейсах с прошлого июля почти вдвое выросло число подделок электроники компаний, покинувших российский рынок, следует из данных юридического агентства IQ Technology, пишет «Коммерсантъ».

Исследование затронуло 15 тыс. карточек продукции на Ozon, «Яндекс.Маркете», Wildberries, «СберМегаМаркете» и AliExpress. Доля контрафактных смартфонов в прошлом году составляла 12%, в этом – 31%, среди ноутбуков рост составил с 22 до 31%, наушников и колонок – с 27 до 69%, мелкой бытовой техники – с 15 до 34%, смарт-часов — с 35 до 63%, следует из данных агентства.

Чаще всего подделывают аппараты Apple, Samsung, Xiaomi и других известных брендов; их выполняют в стиле оригинала, но с другими размерами и операционными системами – похожие на продукцию Apple устройства получают вместо iOS операционную систему Android. При этом поддельный ноутбук распознать труднее, поскольку он отличается от оригинала прежде всего внутренними деталями – жёсткий диск, процессор, оперативную память заменяют более дешёвыми вариантами. В основном контрафактную технику производят в Китае, Пакистане и Индии.

Как считают в «F+ tech | Марвел», доля подделок аудиоэлектроники на российском рынке в первые пять месяцев этого года увеличилась

с 10 до 25% по сравнению с тем же периодом прошлого года, причём чаще всего это копии наушников и музыкальных колонок известных брендов – Apple, Marshall, JBL и других.

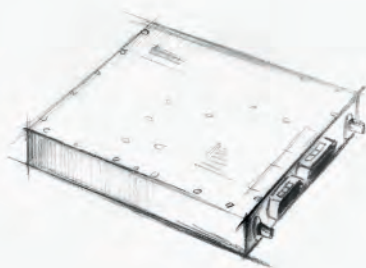
Источник газеты в одном из маркетплейсов заявил, что из-за поправок к закону о правах потребителей в 2018 году, куда добавили определение понятия товарных агрегаторов в Интернете, площадки лишились возможности вмешиваться в описание товаров от пользователей. Таким образом, если маркетплейс поменяет или уберет в описании товара слово «оригинал», отвечать за продукцию будет уже самостоятельно, чего делать никому не хочется.

Прежде сами правообладатели мониторили ситуацию и защищали свои бренды, борясь с контрафактом, напомнила гендиректор компании «Онлайн Патент» Алина Акиншина. Но после начала Россией военной операции и введения международных санкций продавцы подделок стали вести себя менее осторожно: «раньше им следовало опасаться претензий от правообладателей – сейчас бояться нечего». По её мнению, «с учетом тенденций» доля подделок будет только расти.

rbc.ru

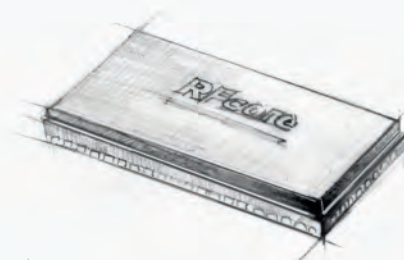


НОВЫЕ МОЩНОСТИ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ



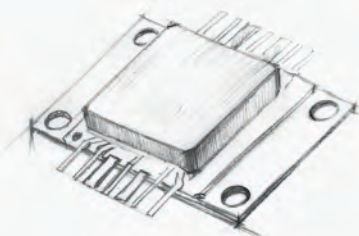
СВЧ-усилители мощности

- Диапазон частот: от HF до Ku
- Выходная мощность: 2...1000 Вт
- Типовое усиление: 25...65 дБ
- Рабочее напряжение: 28, 40 В



Многофункциональные CMOS MMIC

- Диапазон частот: S, C, X, Ku
- Выходная мощность: до 15 Вт
- Исполнение: QFN-корпус



GaN и GaAs MMIC

- Диапазон частот: 2...18 ГГц
- Выходная мощность: до 12 Вт
- Типовое усиление: 10...23 дБ
- Исполнение: QFN-корпус/кристалл



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

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

Реклама

Электронный самоликвидирующийся стимулятор восстановления повреждённых тканей на основе PLGA. Опыт США и России

Андрей Кашкаров

Исследователи из Северо-Западного университета в Иллинойсе (США) при содействии нейрохирургов Медицинской школы Вашингтонского университета в Сент-Луисе разработали инновационное биорезорбируемое имплантируемое электронное устройство с беспроводной связью, ускоряющее регенерацию повреждённых тканей и нервных магистралей. Так удалось достичь заживления повреждённого участка нерва. В сфере разработки биоразлагаемых имплантатов, обеспечивающих стимуляцию роста тканей организма малыми импульсами электрического тока, что влияет на сроки восстановления здоровья и качественной жизнедеятельности человека, есть достижения в Томском государственном университете. Полученные с помощью современной электроники результаты имеют большую перспективу для восстановления пациентов не только в отделениях кардиологии и ортопедии, но и терапии, а также в восстановительной медицине в травматологии нервов, разрывов тканей и сухожилий. В спортивной медицине это направление также перспективно, ибо позволит восстанавливаться спортсменам после травм быстрее и качественнее.

Предпосылки и инновационные разработки из США

Речь идёт о полностью имплантируемом и биорезорбируемом стимуляторе без электродов и источника питания на основе PLGA – биоразлагаемых полимерных материалов на основе сополимера лактида и гликолида. Устройство, внешний вид которого проиллюстрирован рисунком 1, обеспечивает подачу регулярных слабых электрических импульсов – единицы мкА к повреждённому периферическому нерву. Причём биостимулятор-имплантат управляется дистанционным беспроводным способом от расположенного в том же помещении ПК; об этих особенностях поговорим далее.



Рис. 1. Внешний вид гибкого растворяемого имплантата с электронными элементами

«Временные» (саморастворяемые) элементы инженерной технологии, как в рассматриваемом примере, дополняют и в перспективе призваны заменить традиционные фармацевтические методы лечения различных заболеваний у людей. Исследователи называют технологию «биорезорбируемой электронной медициной». Она обеспечивает терапию и лечение в течение клинически значимого периода времени непосредственно в том месте, где необходимо, тем самым снижая побочные эффекты и риски, связанные с типичными постоянными имплантатами или иной амбулаторной терапией. Исследователи из Вашингтонского университета Джон Роджерс, Р. Макьюэн и их коллеги продемонстрировали первое в мире биорезорбируемое электронное устройство — биоразлагаемый имплантат, ускоряющий регенерацию нервов, сведения об этом опубликованы в [2]. Эксперимент проводился на декоративных крысах.

Нейробиологи изучили воздействие биорезорбируемого электронного устройства на крысах с повреждённым седалищным нервом. Установлено, что

нерв посылает сигналы вверх и вниз по конечностям, контролирует подколенные сухожилия и мышцы «голеней» и «ступней» лап. В процессе эксперимента воздействовали на испытуемых электростимуляцией в течение 1 часа в день в разных группах: в течение 1, 3 или 6 дней, наблюдая и сравнивая результаты воздействия с группой крыс, в которой вообще не использовали электрическую стимуляцию; а затем наблюдали за восстановлением грызунов в течение следующих 10 недель. В результате экспериментов обнаружено, что любая (по времени воздействия) электрическая стимуляция лучше, чем никакая, и помогает крысам восстановить мышечную массу, мышечную силу и в целом – активность. Чем больше по времени (при прочих равных условиях) крысы получали электростимуляцию, тем быстрее и качественнее восстанавливались нервные реакции и мышечная сила. При этом неблагоприятных биологических эффектов от электронных устройств и реабсорбции имплантатов не обнаружено. «Мы знаем, что стимуляция организма человека слабыми электрическими токами во время хирургической операции помогает, но как только операция закончена, возможностей для хирургического вмешательства и корректировки уже нет, – сказал соавтор работы доктор PhD Уилсон Рэй, доцент кафедры нейрохирургии, биомедицинской инженерии и ортопедии в Вашингтонском университете, – с помощью электронной системы мы показали, что электрическая стимуляция, проводимая по расписанию, может ускорить восстановление нервов». Действительно, после хирургического вмешательства и в процессе восстановления в стационаре очень важным является восстановление сил и энергии пациента, что прямо связано с наращиванием мышечной и нервной ткани, когда причиной или следствием болезни стало их повреждение, разрыв или атрофия (отмирание).



Рис. 2. Иллюстрация вживляемого имплантата перед хирургической операцией

Беспроводное устройство размером с монету и толщиной с лист бумаги работает автономно около 2 недель, прежде чем естественным образом растворится – впитается в тело. Причём время «разложения» можно «программировать» на этапе создания электронного имплантата путём корректировки толщины материала. Иллюстрация того, как PLGA растворяется в живом организме под воздействием температуры человека, представлена в [2]. О том, как работают электронные кардиостимуляторы на основе имплантатов, рассказано в [3]. А на рис. 2 представлен вид вживляемого имплантата перед хирургической операцией.

Отличительная особенность разработки в том, что инженерная биосистема обеспечивает активную терапевтическую функцию в программируемом дозированном формате, а затем естественным образом бесследно исчезает в организме. Ведение электрической стимуляции в процессе и после операции для облегчения восстановления организма пациента в случаях, требующих хирургического вмешательства, пока является нестандартной практикой. Однако ранее врачам не хватало безопасных технических средств (разработок) для непрерывного обеспечения полного цикла восстановления и заживления. Иллюстрация накладываемого на поражённый участок ткани имплантата представлена на рис. 3.

На рис. 3 помечены приёмная антенна имплантата с дистанционным

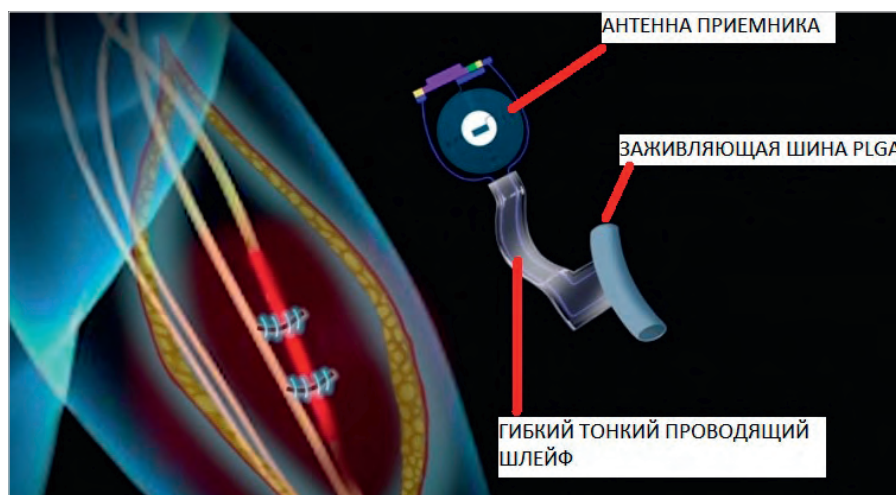


Рис. 3. Иллюстрация накладываемого на поражённый участок ткани имплантата – электронного стимулятора

управлением, гибкая соединительная проводящая шина на плёнке и адаптированная к живым тканям человека трубка-шлейф, созданная по специальной технологии PLGA.

Костные ткани не только обеспечивают «механическую» основу, но и служат хранилищем кальция. Регенерация критических костных дефектов, вызванных травмами, переломами и опухолями, довольно сильно ограничена из-за проблем, связанных с типичными методами аутогенной и аллогенной костной пластики. Поэтому в ортопедии растёт спрос на альтернативные материалы: керамику, полимеры, металлы, органические заменители костей. Каркасы должны обеспечивать временную поддержку клеток, стимулировать их разделение и пролиферацию для образования новых тканей. Идеальный каркас должен безопасно разрушаться в организме, когда поддержка больше не нужна – быть биосовместимым, механически прочным и безвредным для тканей, иметь требуемую пористую структуру [5]. Науке и ранее были известны разные типы биоразлагаемых устройств с широким спектром возможностей. Импульсом для создания описанной перспективной разработки послужили, как это нередко бывает, новые достижения в смежных дисциплинах. Установление пользы терапии на основе электро-стимуляции для ускорения заживления ран явилось этим толчком. Таким образом, спроектировано тонкое гибкое устройство, которое оборачивается вокруг повреждённого нерва и подаёт электрические импульсы в выбранные моменты времени в течение нескольких дней, прежде чем безвредно разло-

жится в живом организме. Устройство питается и управляется по беспроводной сети с помощью передатчика вне тела, действующего по тому же принципу, как и «коврик для зарядки» сотового телефона. Дистанция уверенной связи между компьютерным устройством управления и имплантатом пока ограничивается 10 метрами.

Причём если благодаря способности к биологическому разложению и биосовместимости технология производства сополимеров используется в медицинской практике, то воздействие импульсами малого тока в сочетании с сополимерами является своеобразным ноу-хау. Биоразлагаемые материалы находят широкое применение в терапии: производство вакцин, новых лекарственных препаратов и способов доставки субстанций, в тканевой инженерии, ортопедии, урологии, гинекологии, стоматологии. Подобные системы разрабатываются и для кардиостимуляторов. Базовые полимеры, используемые в биомедицине, в ограниченном количестве производятся и в России:

- полигидроксиалканоаты (PHA);
- полимолочная кислота (PLA), полигликолевая кислота (PGA) и их сочетание – PLGA (полилактидгликолид);
- полисахариды (крахмал, целлюлоза, гуаровая камедь).

Российские реалии

В Томском государственном университете (НИ ТГУ) продолжают результативные исследования в области синтеза и очистки мономеров, участвующих в получении ценных биodeградируемых полимеров. С 2021 года проводились клинические испытания,

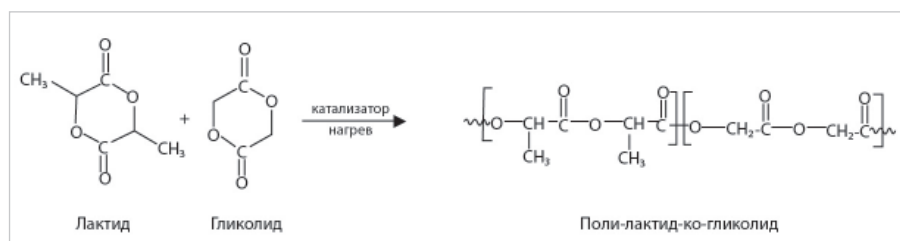


Рис. 4. Иллюстрация (схема) химического распада PLGA на основе сополимера лактида и гликолида

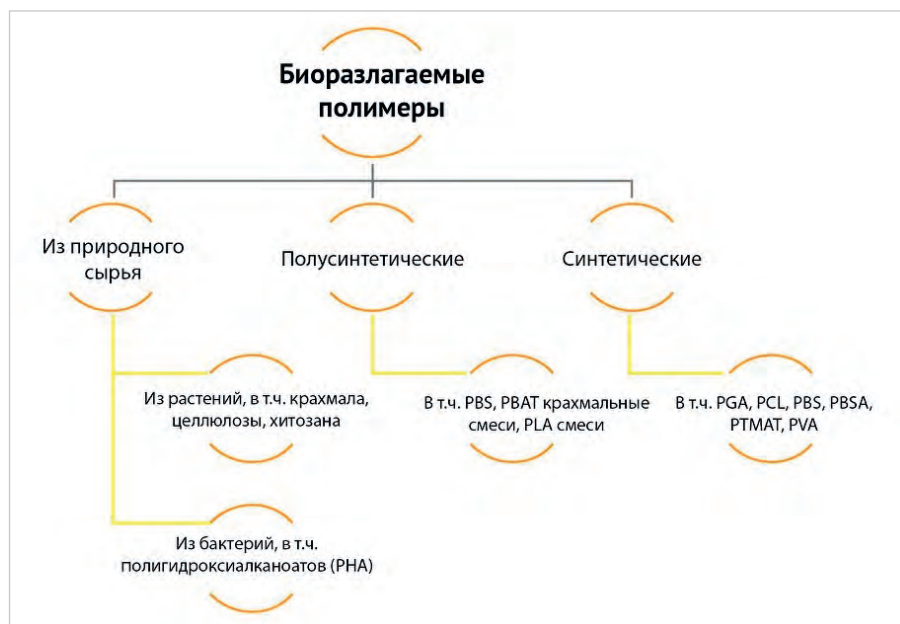


Рис. 5. Классификация биополимеров

основная фаза которых теперь завершена. Одним из возможных вариантов применения биоразлагаемых полимерных материалов на основе PLGA является производство на базе российского сырья и по отечественной технологии хирургических рассасывающихся шовных нитей. Практическое применение PLGA можно условно разделить на три сегмента: системы доставки лекарств с контролируемым высвобождением, биоразлагаемые ортопедические импланты и шовные материалы. Так, полилактидгликолид синтезируется путём сополимеризации двух различных мономеров, циклических димеров гликолевой кислоты и молочной кислоты. Полимеры могут быть синтезированы с помощью катализаторов, в составе которых II-этилгексаноат олова, алкоксиды олова или изопропоксид алюминия. Как биосовместимый и биоразлагаемый полимер, PLGA подходит для производства имплантатов: пластин, протекторов и пинов, медленно рассасывающихся в организме в течение 2-4 лет [5], [6]. Инновация в том, что теперь созданы PLGA, которые рассасываются в течение 10 дней

и менее. Иллюстрация распада плёнок PLGA на основе сополимера лактида и гликолида представлена на рис. 4.

PLGA обладают вариативностью условий разложения в зависимости от жёсткости среды (pH), температуры, ферментативного или неферментативного действия микроорганизмов, окисления, восстановления. Это важный компонент в перспективных разработках систем контролируемой доставки биологических пептидов и малых интерферирующих РНК, с которыми связывают изменение парадигмы в лечении сложных заболеваний. PLGA можно разделить на 3 основные группы [5]. Классификация биополимеров представлена на рис. 5.

В целом технология получила название PULSED (Particles Uniformly Liquified and Sealed to Encapsulate Drugs – инкапсуляция лекарственных средств в равномерно рассасывающихся частицах). Частицы действующего вещества достаточно малы для введения в организм пациента стандартными иглами для подкожных инъекций. Поэтому разработчики использовали высокоточную 3D-печать для создания массива из

более чем 300 нетоксичных биоразлагаемых наноцилиндров, изготовленных из PLGA — биосовместимого полимера, широко используемого в клинической медицине. Идея, что посредством регулировки состава вещества можно влиять на активность высвобождения инкапсулированного препарата в течение определённого временного интервала — от 10 дней до 5 недель, была успешно апробирована. С другой стороны, важно избежать слишком быстрого высвобождения лекарственного препарата. Исследователи совершенствуют технологию в направлении дополнительной модификации наночастиц таким образом, чтобы довести время выведения лекарства до 6 месяцев. Это позволит увеличить эффективность продолжительной терапии, требующей строгого соблюдения назначенного врачом курса. Технологию используют и для адресной доставки препарата, к примеру, точно в зону злокачественного образования. В данном случае частицы остаются там, где они введены, до тех пор, пока не растворятся и не высвободят лекарство [1].

Экономические выкладки и перспективы

Глобальный рынок хирургических шовных устройств (нить с иглой) по прогнозам составит 4,86 млрд USD к 2024 г. с динамикой роста в среднем на 5% в год в ближайшие 2 года. Пока отечественный рынок представлен лишь импортными продуктами ввиду отсутствия производства полимеров на территории страны, импорт шовных нитей и ортопедических имплантатов в Россию только на основе PLGA в 2022 году составил 722,57 кг на сумму более 45 млн рублей. На этом фоне мировой рынок PLGA показывает рост со среднегодовым увеличением примерно на 13% до 2028 года и прогнозируемо достигнет 91 млн USD в 2024 году по сравнению с 44 млн USD в 2020 году. Из этой тенденции видно, насколько медицинская электроника в сочетании с инновационными биоматериалами развивается и востребована в условно сравниваемых странах.

Перспективы применения растворяемых в организме устройств

Ранее не было чёткого и валидного понимания, что длительная стимуляция имплантатом безопасна для живого организма. С появлением новой тех-

нологии можно выбрать оптимальные временные рамки до момента безопасного разложения в организме имплантата, что будет способствовать индивидуальному медицинскому подходу к пациенту, обоснованному задачей быстрого и качественного выздоровления. Зависимость времени воздействия электростимуляцией (с помощью имплантата) на живой организм и фактического терапевтического эффекта при этом – решаемая проблематика будущих исследований. Изменяя состав и толщину материалов в устройстве, можно контролировать точное количество дней, в течение которых имплантат остаётся функциональным, прежде чем будет поглощён организмом. Разработанные имплантаты могут подавать электрические импульсы в течение нескольких недель, прежде чем безопасно самоликвидируются [6]. Весьма важно, что способность устройства разлагаться в организме заменяет операцию по удалению небioresорбляемого устройства, тем самым устраняя дополнительный медицинский риск угрозы жизни для пациента при хирургическом вмешательстве. Исследование показало, что устройство может работать как временный кардиостимулятор и как полез-

ный имплантат даже для спинного мозга и других органов человеческого тела, там, где это признано медицински обоснованным. В перспективе предполагаются улучшения качества восстановления здоровья и работоспособности, выходящие за рамки только периферической нервной системы. Идея «переходных» электронных устройств была предметом глубокого исследования учёных в течение декады лет. В некотором смысле результативный опыт – грандиозный прорыв в материаловедении. С новыми разработками биомедицинской электронной инженерии и нейрохирургии материалы, устройства, подходы к изготовлению, инженерные концепции системного уровня для использования в области здравоохранения приобрели новый импульс и смысл продления человеческой жизни, повышения её качества с помощью современных электронных устройств, что является важнейшей актуальной проблемой для всех живущих в мире людей.

Литература

1. Choi Y.S., Koo J., Rogers J.A. Inorganic materials for transient electronics in biomedical applications. MRS Bull. 45, 103–112 (2020).

2. Choi Y.C., In P.T., Pheniger A. Fully implantable and bioresorbable cardiac pacemakers without leads or batteries // Nature Biotechnology. 06/2022 // URL: <https://www.nature.com/articles/s41587-021-00948-x>, <https://doi.org/10.1038/s41587-021-00948-x>.

3. First-ever transient pacemaker harmlessly dissolves in body. Northwestern University // URL: <https://news.northwestern.edu/stories/2021/06/first-ever-transient-pacemaker-harmlessly-dissolves-in-body/>.

4. Биоразлагаемые полимеры в медицине // URL: https://ect-center.com/blog/biopolymers_for_medical_materials.

5. Будущее за имплантатами на основе биорезорбируемых композиционных материалов // URL: https://research.spbstu.ru/news/budushee_za_implantatami_na_osnove_biorozorbuemyh_kompozicionnyh_materialov.

6. В России создали материал для 3D-печати биоразлагаемых имплантатов // URL: <https://www.ixbt.com/news/2022/10/07/v-rossii-sozdali-material-dlja-3dpechati-biorazlagaemyh-implantatov.html>.





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

Тензодатчики деформации и акселерометры FBG-технологии с волоконно-оптической СВЯЗЬЮ

Надежда Морозоватая

Динамический и многофакторный мониторинг целостности конструкций на земле, под водой и в воздухе – особая задача и перспективное направление в производственном секторе РЭА и оборудования. На примере тензодатчиков деформации поверхности, угла деформации, перемещения, наклона, экстензометров и акселерометров, адаптированных для волоконно-оптических линий и программируемых электронных контроллеров, в статье рассматриваются их технические характеристики с вариантами применения в промышленности, строительстве и в быту.

Преимущества и возможности применения оптоволоконных измерительных систем

В начале XXI века компания Scaime продемонстрировала успешный вывод технологии Fiber Optic Bragg Grating (FBG) на рынок структурного мониторинга строительных объектов и инженерных сооружений. В строительной сфере, судостроении, транспортной инфраструктуре и промышленных инновациях в разных сферах, включая мосто- и тоннелестроение, железнодорожную отрасль, морские и речные шлюзы, а также мощные прессы, электроэнергетику, волоконно-оптическим датчикам практически нет замены. Оптоволоконные датчики деформации и устройства на их основе

применяются для контроля деформации шельфовых нефтяных платформ, проверки целостности буровой вышки после сильных внешних воздействий, таких как обледенение, волны, шторм и воздействие атмосферных молниевых разрядов. Кроме того, в составе оптоволоконных линий датчики контроля деформации и акселерометры обеспечивают сбор и корректную передачу динамически изменяющихся данных к устройствам контроллеров, анализаторов и хранения.

Все, что касается контроля и измерения деформации, угла отклонения, ускорения перемещений и даже, в отдельных случаях, температуры обеспечивается оптоволоконными датчиками – FBG-сенсорами. Преимущества волоконно-оптических датчиков

(ВОД), волоконно-оптических акселерометров (ВОА) и систем на их основе по-разному определяются сферой применения. Наиболее наглядно зависимость контролируемых параметров от сферы применения представлена в табл. 1.

Эти особенности и перспективы подробно рассмотрены в [1] и [6]. И даже этот представленный перечень возможностей далеко не полон. К примеру, ВОД типа OBSG и др., кроме прочего, используются в локальных и передвижных конструкциях, в том числе в условиях повышенной вибрации и детонации. На рис. 1 представлен вид мощного ветрогенератора в пригороде Лаппенранты, вблизи российской границы [4].

Ветрогенераторы, установленные в Финляндии, уже много лет обеспечивают условно «бесплатную» электроэнергию в некоторых коммунах. Примерно такая же ситуация в Германии и Испании. Оптоволоконные датчики в лопастях ветрогенератора применяются как важный элемент системы контроля лопастей турбины. Несколько волоконно-оптических датчиков смонтированы внутри лопастей на этапе монтажа конструкции ветрогенератора. Оптические датчики способствуют

Таблица 1. Преимущества датчиков для различных сфер применения

| Особенности оптоволоконных систем | Преимущества для сфер применения |
|--|---|
| Нечувствительность к электромагнитным помехам | Железная дорога, вблизи радиопередающих станций и радаров, высоковольтных линий и др. |
| Нет проблемы коррозии | Морские и речные суда, подводные конструкции, уличные применения и др. |
| Искробезопасность, взрывобезопасность | Опасные зоны (нефтехимия и др.) |
| Высокая надёжность и большой срок службы (более 20 лет) | Необслуживаемые объекты и труднодоступные зоны |
| Хорошая сопротивляемость циклическим нагрузкам | Конструкции, подверженные значительным деформациям (до 10 000 мкм/м) |
| Возможность монтажа до 16 датчиков на одну линию, слабое затухание сигнала в оптоволокне | Протяжённые объекты (до нескольких километров), объекты сложной конфигурации и др. |



Рис. 1. Система возобновляемых источников энергии с мощными ветрогенераторами, обеспечивающая альтернативный и аварийный «канал» энергопитания для финских моногородов Иматра и Лаппенранта

измерению физической нагрузки на лопасть ветрогенератора в определенных местах – в непрерывном режиме. Электрические сигналы (изменение электрического тока) с ВОД поступают на программируемый логический контроллер типа MXD, преобразовываются в цифровой сигнал и анализируются в системе контроля наряду с полученными данными о скорости и направлении ветра, угле тангажа основной конструкции и т.д. Этот пример иллюстрирует рис. 2.

Контроль означенных параметров необходим для предупреждения аварийных ситуаций, выработки рекомендаций по эксплуатации и техническому обслуживанию оборудования. В том числе «необслуживаемого» и такого, доступ к которому на высоте, под водой и в иных сложных условиях ограничен.

Датчики деформации для волоконно-оптических линий

Тензометрический датчик с оптической решеткой Брэгга, с волоконной решеткой Брэгга или волоконно-оптический датчик (ВОА), датчик деформации для оптических волоконных линий – всё это тождественные понятия и один модельный ряд датчиков, отличаются они только параметрами – техническими характеристиками и форм-фактором. Тем не менее эти отличия в диапазонах измерения, точности, комбинированной погрешности, протяженности оптоволоконных линий, в которых применяются датчики, в рабочих и критичных температурах и соединительных разъемах, адаптерах (и др. параметрах) существенно влияют на их возможное применение разработчиками современной электроники. При этом параметры надёжности, устойчивости к раздавливанию – всё то, что связано с особенностью неразборного корпуса датчика: устойчивость к циклической усталости, отсутствие чувствительности к электромагнитным помехам и коррозии, безопасность от взрывов корпуса – являются общими для всего модельного ряда. К тому же типу датчиков относятся волоконно-оптические акселерометры (ВОА).

Принцип действия решётки Брэгга напоминает фильтрующее зеркало, отражающее излучение только строго определённой длины волны. Для всей остальной части оптического спектра решётка «прозрачна». Этот принцип



Рис. 2. Тензодатчики, встроенные в лопасти ветрогенератора

подробно описан и иллюстрирован в материале [2]. Упрощённо принцип работы можно объяснить так: перестраиваемый лазер излучает различные длины волн (цвета) в оптическое волокно. Когда испускаемый свет встречает «брэгговскую решетку» с той же длиной волны, световой поток отражается на чувствительное фотореле, сигнализирующее при его присутствии, – так определяется длина волны. Механические напряжения в волокне или изменения температуры пропорционально изменяют отражающийся от решетки сигнал. Отсюда оправдано подключение по одному волокну сразу нескольких датчиков, чувствительных к разным диапазонам длины волны.

Производители изготавливают датчики деформации для волоконно-оптических линий из эпоксидно-стекловолоконного композиционного материала и армированного стекловолокном пластика, что делает их удобными в монтаже и эксплуатации, а параметр надёжности определяется сроком службы свыше 20 лет. В неразборной и неремонтпригодной конструкции датчика буквально «нечему ломаться». Поскольку обновление линейки электронного оборудования в современных реалиях происходит значительно скорее – по срокам условного апгрейда, компонент РЭА с

означенными характеристиками соответствует требованиям разработчиков с условным названием «смонтировал и забыл», ибо регламента и обслуживания в типичном смысле не предусмотрено.

Датчики деформации монтируются жёстким способом к конструкции с помощью клея, что обеспечивает не только надёжность работы компонента и модулей, с ним связанных, в различных, в том числе агрессивных средах, но и качественную, «идеальную» – как её позиционируют разработчики – передачу нагрузки между обрабатываемым элементом и решёткой Брэгга, применяемой к волокну при его включении в композитную матрицу.

После монтажа-склеивания датчики соединяются последовательно с помощью адаптера, обеспечивающего непрерывность оптического волокна. Поскольку потери сигнала с таким инженерным решением минимальны, а собственное затухание оптического волокна незначительно, датчики деформации для волоконно-оптических линий могут быть распределены на очень большие расстояния (несколько километров). Поскольку оптические системы – это проектные решения под конкретного заказчика, номенклатура электронных компонентов компании Scaimе весьма консерватив-

Таблица 2. Технические характеристики оптического фиксированного датчика напряжения SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117

| Параметр | Уточнение | Значение |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Диапазон измерения (ЕМ) | Номинальный диапазон (ЕМ) | -5000 ... +5000 мкм/м |
| Чувствительность | Sensitivity | ± 0,8 мкм/м |
| Разрешение | Resolution | ± 1* мкм/м |
| Комбинированная погрешность | Ошибка | 1% ЕМ тепловая* |
| Компенсация тепловая | | 0,1°С |
| Длина волны | Диапазон эффективной работы | 1530...1565 Нм |
| Рабочая температура | Диапазон температур | -30...+80°С |
| Критичная температура внедрения | Температура установки | -30...+200°С |
| Соединители | Разъёмы | ST/PC, FC/PC и др. опционально |

* Значение зависит от особенностей сбора данных.

Таблица 3. Технические характеристики оптического фиксированного датчика напряжения SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117

| Параметр | Уточнение | Значение |
|---|---------------------------------|----------------------------------|
| Диапазон измерения (ЕМ) | Номинальный диапазон (ЕМ) | -5000...+ 5000 мкм/м |
| Повторяемость сигнала | | ±5 мкм/м |
| Разрешение | Resolution | < 1* мкм/м |
| Точность | Accuracy | ±10 мкм/м |
| Максимальное расстояние | Между двумя датчиками, максимум | 1,3 км |
| Максимальная длина оптоволоконной линии | | 40 км |
| Рабочая температура | Диапазон температур | -30...+60°С |
| Соединители | Разъёмы | ST/PC, FC/PC, FC/APC опционально |

* Значение зависит от особенностей сбора данных.

на и представлена модельным рядом оптоволоконных датчиков и акселерометров типа OBEG, OMSG, OMSGW, OBLG, OBDI, OBTI, OBAS, OBTS, OMSG, OMSGW, OBEG, OBLG. Среди них:

- OMSG для монтажа на клей;
- OMSGW для монтажа болтами/сваркой;
- OBEG – тензодатчики для среды бетона или гудрона;
- OBLG – экстензометры с длинным основанием 0,5/1/1,5 м;
- OBAS – акселерометр – контроллер ускорения (BOA);
- OBTS – температурный сенсор;
- OBDI – датчик перемещения;
- OBTI – измеритель наклона – датчик угла деформации.

Рассмотрим некоторые типы датчиков и акселерометров, часть которых разработана десять лет назад, однако они не потеряли актуальности; сегодня их можно встретить в качестве элементов современной электроники и оборудования практически во всех сферах, где применяются электронные конструкции, но более всего в системах оптоволоконных линий связи. Европейская номенклатура обозначается ATEX 2014/34/EU, IECEx [5].

Оптический фиксированный датчик напряжения OBEG-120-HT

Датчик стабильно работает в условиях температурного диапазона -30...+180°С. Это обеспечено нанесением на его корпус защитного покрытия горячим способом при температуре около 200°С. Надёжное решение с выводом разъёмов с кольцевыми трубками из нержавеющей стали делает датчик устойчивым к собственным деформациям корпуса, раздавливанию под воздействием значительных внешних сил, а «заливка» корпуса позволяет применять его даже в горячей смоле (гудроне). Оптоволоконный датчик комплектуется кабелем для адаптации к сети и коммуникации.

На рис. 3 представлен внешний вид датчика SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117.

Датчик соединяется с многожильным оптическим кабелем Ø2,8 мм в защитной трубке (оплётке) с коммутацией к линии и электронному контроллеру в распределительной коробке (шкафу оборудования).

Технические характеристики датчика OBEG-120 представлены в табл. 2.



Рис. 3. Внешний вид датчика SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117



Рис. 4. Внешний вид оптоволоконного датчика FT-OBEG-120-FE-1117

Датчик детонации FT-OBEG-120-FE-1117 для оптоволоконных линий

Отличительные свойства оптоволоконных датчиков FT-OBEG-120-FE-1117:

- высокая устойчивость к циклической усталости;
- отсутствие чувствительности к электромагнитным помехам;
- отсутствие коррозии;
- большая резистентность к разрушению (невзрывоопасны).

Оптоволоконный датчик FT-OBEG-120-FE-1117 представлен на рис. 4.

Его параметры сопоставимы с указанными в табл. 1. Дополнительные технические характеристики оптоволоконного датчика FT-OBEG-120-FE-1117 представлены в табл. 3.

Аксессуары к оптическому фиксированному датчику напряжения SCAIME – FT-OBEG-120-HT-FE-1117 те же, что и в рассмотренном варианте выше (для FT-OBEG-120-HT-FE-1117). То же касается и форм-фактора, представленного на рис. 5. Размеры FT-OBEG-120-HT-FE-1117 незначительно отличаются от FT-OBEG-120-HT-FE-1117.

Волоконно-оптический акселерометр OBAS-002

Волоконно-оптические акселерометры (BOA) по определению обеспечивают иные относительно ВОД функции и контроль параметров, хотя оба рассматриваемых типа основаны на одном

принципе тензорезистивного контроля характеристик, деформации. Именно поэтому при монтаже ВОА применяют жёсткое крепление к контролируемой конструкции. Контролируемые параметры также отличаются ввиду принципа действия. Если ВОД (при сопоставимом диапазоне измерения ЕМ) в основном характеризуются чувствительностью и разрешением в значении мкм/м – см. табл. 3 и табл. 4, то ВОА по принципу своей работы характеризуются изменением в деформации конструкции и соответствующими параметрами контроля (площади, веса и т.д. в значении г/ч): актуальные сведения об этом представлены в табл. 4.

Так, волоконно-оптический акселерометр SCAIME – FT-ОВАС-002-FE-0420 обеспечивает точное и надёжное измерение вибрации, измерение непрерывных ускорений, динамику ускорений. При этом ВОА отличается крайне низкой поперечной чувствительностью, точное и надёжное измерение вибрации [3].

Монтажные планки на корпусе позволяют удобно монтировать акселерометр. Они могут быть привинчены или приварены к жёсткой конструкции (оборудованию). Форм-фактор ВОА ОВАС-002 в двух видах представлен на рис. 6.

Монтажная пластина типа А (слева) или В (справа) в сочетании с многожильным оптическим кабелем расширяют возможности крепления устройства в разных конфигурациях.

На рис. 7 представлен внешний вид волоконно-оптического акселерометра ОВАС-002 с видом на точки крепления для монтажа. Технические характеристики представлены в табл. 4.

Тензодатчики деформации OBDI

Оптический датчик перемещения OBDI обеспечивает точный контроль параметров и надёжное измерение

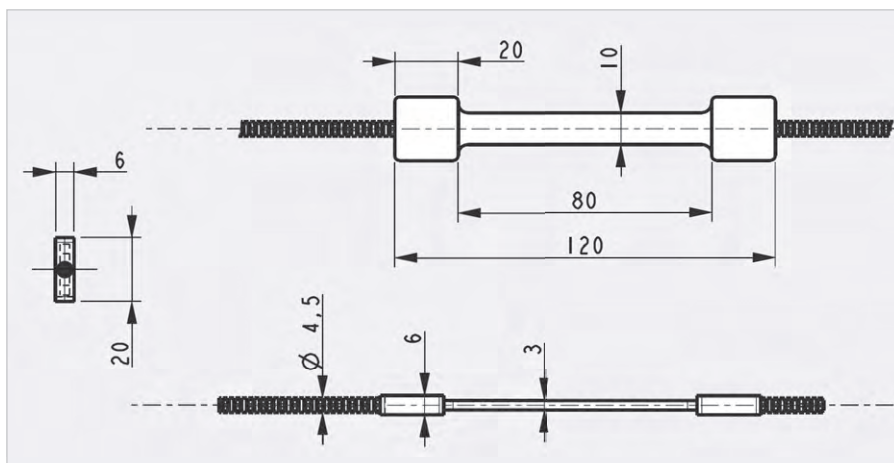


Рис. 5. Форм-фактор волоконно-оптического датчика детонации FT-OBSG-120-HT-FE-1117

Таблица 4. Технические характеристики волоконно-оптического акселерометра ОВАС-002

| Параметр | Уточнение | Значение |
|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Диапазон измерения (ЕМ) | Номинальный диапазон (ЕМ) | -2...+2 г |
| Чувствительность S | Sensitivity S | -3,3×10 ⁻³ г/ч |
| Длина волны | | 1530...1565 Нм |
| Комбинированная погрешность | Ошибка | ±0,5% FS * |
| Поперечная чувствительность | | < 1% FS |
| Диапазон частот ΔS | | < 5% в диапазоне частот 0...20 Гц |
| Резонансная частота | | 110 Гц |
| Рабочая температура | Диапазон температур | -20...+50°C |
| Тепловой дрейф | | -0,07°C/рпм |
| Максимальный диапазон частот | | 0...50 Гц |
| Температура хранения и консервации | Температура установки | -40...+60°C |
| Соединители | Разъёмы | ST/PC, FC/PC и др. опционально |

* Значение зависит от особенности сбора данных.

смещения практически в любых конструкциях с жёстким основанием. В бытовой сфере на основе рассматриваемого датчика автором неоднократно проводился мониторинг безопасности деревянного дома, который из-за длительной эксплуатации постепенно разрушался – увеличивалось смещение нижних венцов, а также части конструкций – пола, несущих стен и крыши. В этом случае датчик деформации (вариант – растяжения) устанавли-

вают между двух расходящихся поверхностей, к примеру, основного дома и пристройки к нему.

Точность фиксации смещения и высокая стабильность работы в условиях широкого температурного режима (см. табл. 5) обеспечена компенсацией температурного воздействия в технологии FBG с помощью решётки Брегга. По тому же принципу и в связи с высокой конструктивной чувствительностью тензометрического

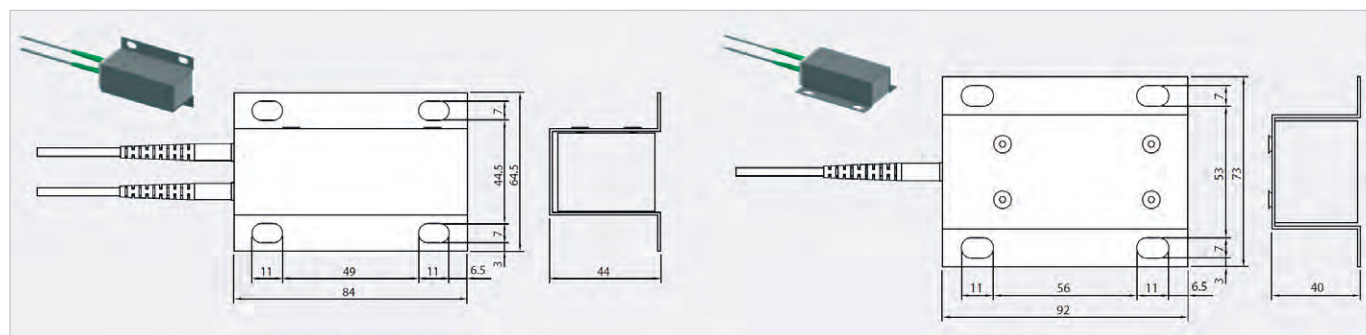


Рис. 6. Форм-фактор волоконно-оптического акселерометра ОВАС-002

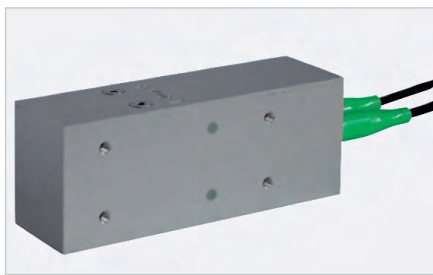


Рис. 7. Внешний вид волоконно-оптического акселерометра OVAS-002

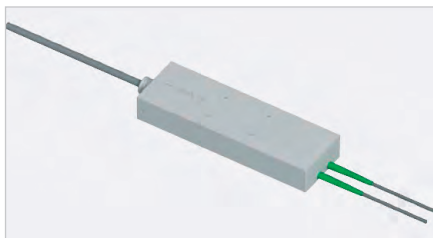


Рис. 8. Внешний вид датчика смещения OBDI

датчика смещения OBDI мы контролировали стабильность и разрушение кирпичных конструкций печей и несущих стен [4]. Применяя принцип действия датчика в относительно несложном по схемотехнике электронном устройстве, собрать которое способен каждый инженер и разработчик РЭА с помощью паяльника и нескольких дискретных элементов, уместно создать устройство, сигнализирующее при смещении контролируемых элементов конструкции и даже расширении трещин. Это то, что можно сделать буквально за пару часов [4]. Разумеется, в современных разработках электронных устройств, связанных с АЦП, анализом и хранением цифровых данных с помощью контроллеров и компьютерных систем с наглядной демонстрацией информации, с функциями ввода-вывода данных, применяются более сложные инженерные решения. Но на простом примере мы пояснили, что применение датчика OBDI, как и других, в том числе от Scaime, может носить прикладной и универсальный характер. Тензодатчик OBDI поставляется с платой и кронштейном для удобного крепления. Специальное исполнение позволяет применять датчик даже под водой и в относительно агрессивной среде. Примером тому является использование оптоволоконных датчиков деформации с длинной базой, погруженных на глубину 16 м на пирсе в Монако [1]. В табл. 5 представлены технические характеристики ВОД OBDI производства Scaime.

Таблица 5. Технические характеристики волоконно-оптического датчика OBDI

| Параметр | Уточнение | Значение |
|------------------------------------|---------------------------|--|
| Диапазон измерения (ЕМ) | Номинальный диапазон (ЕМ) | 25/50/100 мм опционально |
| Чувствительность | Sensitivity | -8 ~17 ~33 мкм |
| Разрешение | | 0,05% E _{макс} * |
| Длина волны | | 1530...1565 Нм |
| Комбинированная погрешность | Ошибка | ±0,5% E _{макс} |
| Рабочая температура | Диапазон температур | -20...+50°C |
| Тепловой дрейф | | Термокомпенсация встроенной решетки Брэгга |
| Особенности монтажа | | Крепление на винт или клей (липкую основу) |
| Температура хранения и консервации | Температура установки | -40...+80°C |
| Соединители | Разъемы | ST/PC, FC/PC и др. опционально |

* Значение зависит от особенностей сбора данных.

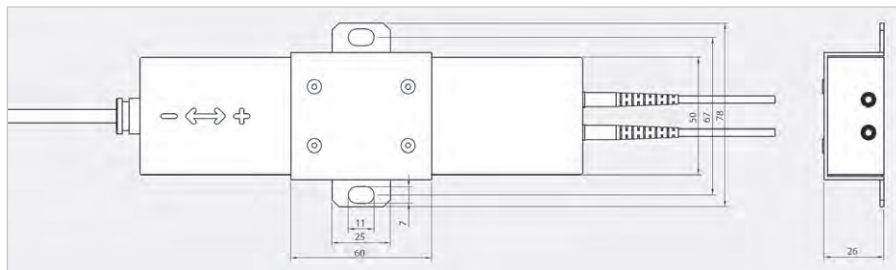


Рис. 9. Форм-фактор датчика смещения OBDI



Рис. 10. Внешний вид датчика FT-OBLG-FE-0521

На рис. 8 представлен внешний вид датчика смещения OBDI, а на рис. 9 – форм-фактор.

Экстензометр с длинной базой OBLG

Благодаря шаровым креплениям датчики OBLG удобно монтируются на все типы поверхностей, даже если они не идеально ровные. На рис. 10 представлен внешний вид датчика FT-OBLG-FE-0521 производства Scaime.

На рис. 11 представлены возможности монтажа датчиков FT-OBLG-FE-0521 с длинной базой на неровные поверхности.

Экстензометры – волоконно-оптические датчики FT-OBLG-FE-0521 с длинной базой и с высокой чувствительностью обеспечивают контроль растяжения и сжатия поверхностей, мониторинг динамических «напряжений» в несущих конструкциях и не только. Датчик соответствует классу защиты IP66, изготовлен из нержавеющей стали с возможностью монтажа

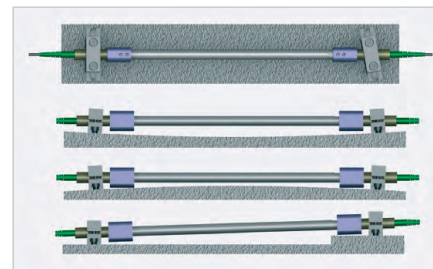


Рис. 11. Некоторые возможности монтажа датчиков FT-OBLG-FE-0521 с длинной базой на неровные поверхности

на шаровых опорах в условиях несовершенных поверхностей.

В табл. 6 представлены технические характеристики экстензометра FT-OBLG-FE-0521 производства Scaime.

На рис. 12 представлен форм-фактор экстензометра FT-OBLG-FE-0521.

Экстензометр с длинной базой OBLG

Кроме описанных выше применительно к экстензометру OBLG назначений контроля растяжения и сжатия, мониторинга физического напряжения в конструкциях, технических характеристик и особенностей, датчик с длинной базой FT-OBSGW100-FE-0918 предназначен для пайки (корпуса) или закрепления винтом. Этот датчик существенно отличается от предыдущего относительно малая длина –

Таблица 6. Технические характеристики волоконно-оптического экстензометра FT-OBLG-FE-0521

| Параметр | Уточнение | Значение |
|--|-----------------------------|--|
| Диапазон измерения (ЕМ) | Номинальный диапазон (ЕМ) | ±2000 мкм/м |
| Чувствительность | Sensitivity | ±0,8 мкм/м |
| Тепловая чувствительность решётки Брегга | Grating thermal sensitivity | ±9 рм/°С |
| Водонепроницаемость | Класс | IP66 |
| Материал | | Нержавеющая сталь класса 316L |
| Рабочая температура | Диапазон температур | -20...+70°С |
| Точность | Accuracy | ±0,5 % Е.М |
| | Repeatability | ±0,2 % Е.М |
| Особенности монтажа | | Сварка или на винт |
| Температура хранения и консервации | Температура установки | -20...+70°С |
| Длина датчика | | 0,5/1/1,5 м |
| Соединители | Разъёмы | ST/PC, FC/PC, FC/APC и др. опционально |

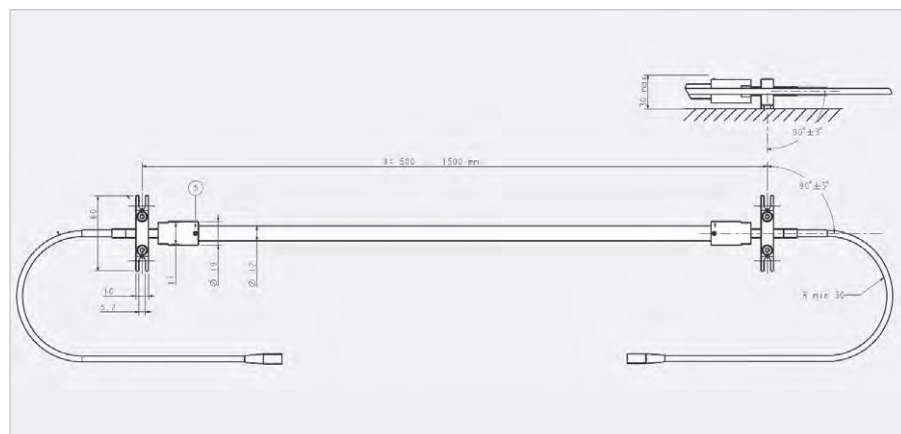


Рис. 12. Форм-фактор экстензометра FT-OBLG-FE-0521



Рис. 13. Внешний вид экстензометра FT-OBSGW100-FE-0918

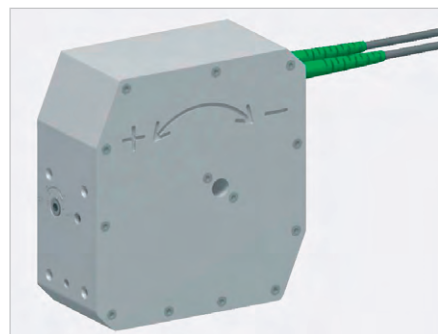


Рис. 14. Внешний вид датчика FT-OBTI-FE-1117

всего 10 см, поэтому он конструктивно предназначен для точного мониторинга в «малых средах» и участках конструкций.

В табл. 7 представлены технические характеристики экстензометра FT-OBSGW100-FE-0918 производства Scaime. Внешний вид экстензометра FT-OBSGW100-FE-0918 представлен на рис. 13.

Датчик-измеритель наклона для волоконно-оптических линий ОВТИ

Внешний вид датчика, называемого также инклинометром, представлен на рис. 14, а форм-фактор с двумя вариантами крепления и монтажа – на рис. 15.

Как видно из рис. 15 и рис. 16, это датчик с поворотными (под шестигранный малый ключ) слотами для монтажа. В том числе благодаря этому датчик обеспечивает точное измерение отклонения угла. Эта функция применяется при мониторинге вертикальной устойчивости плотин, дамб, опор, мостов, туннелей, зданий и относительно малых конструкций. Высокая чувствительность и термостабильность в работе достигается внедрением решетки Брегга. Это один из немногих датчиков с собственным весом более 1 кг.

В табл. 8 представлены технические характеристики датчика-измерителя наклона для волоконно-оптических линий ОВТИ.

Датчик температуры OBTS-100

Датчик температуры типа OBTS-100 с решёткой Брегга, реализованный, как и все рассматриваемые, по технологии

Таблица 7. Технические характеристики волоконно-оптического экстензометра FT-OBSGW100-FE-0918

| Параметр | Уточнение | Значение |
|--|-----------------------------|--|
| Диапазон измерения (ЕМ) | Номинальный диапазон (ЕМ) | ±2000 мкм/м |
| Чувствительность | Sensitivity | ±0,8 мкм/м |
| Тепловая чувствительность решётки Брегга | Grating thermal sensitivity | ±9 рм/°С |
| Водонепроницаемость | Класс | IP66 |
| Материал | | Нержавеющая сталь класса 316L |
| Рабочая температура | Диапазон температур | -20...+70°С |
| Точность | Accuracy | ±0,5 % Е.М |
| | Repeatability | ±0,2 % Е.М |
| Особенности монтажа | | Сварка, пайка или на винт |
| Температура хранения и консервации | Температура установки | -20...+70°С |
| Длина датчика | | 100 мм |
| Соединители | Разъёмы | ST/PC, FC/PC, FC/APC и др. опционально |

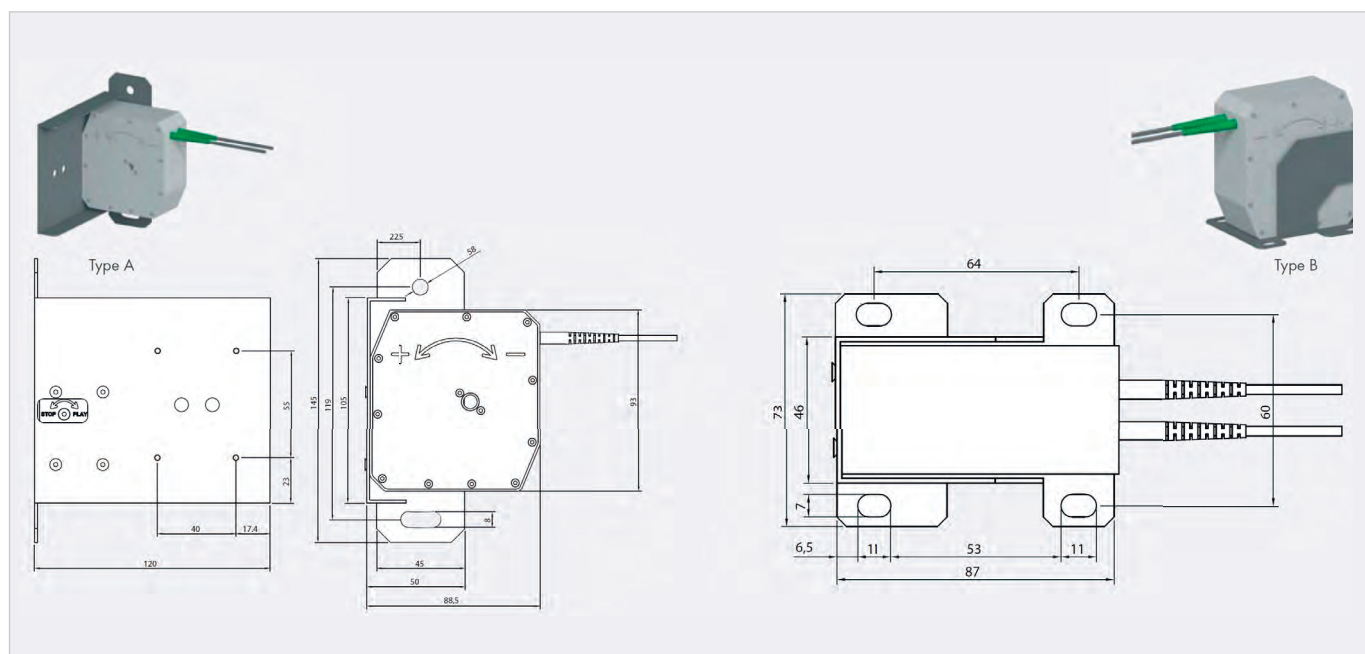


Рис. 15. Форм-фактор с двумя вариантами крепления и монтажа FT-OBTI-FE-1117

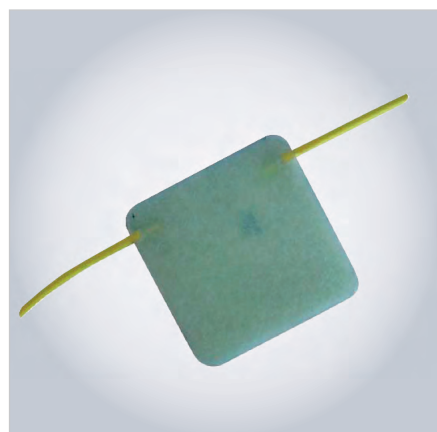


Рис. 16. Внешний вид датчика температуры FT-OBTS-100-FE-1117

Fiber Optic Bragg Grating (FBG) предназначен для измерения температуры с высокой точностью. Это также достигается за счёт технологии изготовления датчика. Дополнительные преимущества для разработчиков РЭА определяются отсутствием чувствительности к электромагнитным помехам и отсутствием возможности коррозии. Внешний вид датчика температуры FT-OBTS-100-FE-1117 представлен на рис. 16.

В табл. 9 представлены технические характеристики датчика-измерителя наклона для волоконно-оптических линий ОВТИ.

В завершение для разработчиков будет небезынтересна сводная таблица отличий рассмотренных выше датчиков, она представлена далее. Сводная табл. 10, в сути которой раскрываются отличия датчиков модельного ряда, представлена ниже.

Таблица 8. Технические характеристики волоконно-оптического датчика-измерителя наклона для волоконно-оптических линий ОВТИ

| Параметр | Уточнение | Значение |
|----------------------------------|-----------------------------|--|
| Диапазон измерения (ЕМ) | Номинальный диапазон (ЕМ) | $\pm 3^\circ$ * |
| Чувствительность | Sensitivity | $-2,10...3^\circ/\text{ч}$ |
| Длина волны | | 1530...1565 нм |
| Тепловая компенсация | Grating thermal sensitivity | Интегрированная решётка Брэгга |
| Время отклика | | ≤ 20 с |
| Комбинированная погрешность | Error | $\pm 0,5\%$ ЕМ |
| Рабочая температура | Диапазон температур | $-20...+50^\circ\text{C}$ |
| Разрешение (дискретность) | | $0,002^\circ$ * |
| Особенности монтажа | | На винт |
| Температура установки и хранения | Температура установки | $-20...+60^\circ\text{C}$ |
| Масса | | 1,2 кг |
| Соединители | Разъёмы | ST/PC, FC/PC, FC/APC и др. опционально |

* Значение зависит от особенностей сбора данных.

В табл. 10 первые четыре типа: OBSG, OBSGW, OBEG, OBLG – датчики деформации (ВОД). Среди них:

- OBSG для монтажа на клей;
- OBSGW для монтажа болтами/сваркой;
- OBEG – тензодатчики для бетона или гудрона;
- OBLG – экстензометры с длинным основанием 0,5/1/1,5 м;
- OBAS – акселерометр – контроллер ускорения (ВОА);
- OBTS – температурный сенсор;
- OBDI – датчик перемещения;
- OBTI – измеритель наклона – датчик угла деформации.

Особенности разъёмных соединений ВОД, ВОА и электронных контроллеров

Современное поколение волоконно-оптических соединителей, предложенных разработчикам РЭА от Scaime, обеспечивает высокую надёжность функционирования оборудования, коммутации и экономичности решений для наружного и внутреннего применения. Такие электронные устройства широко используются в промышленности, авиации, гражданском и военном применении. Винтовой запорный механизм с простой и безопасной установкой,

водонепроницаемость, пыленепроницаемость и устойчивость к коррозии, соответствие требованиям RoHS – лишь некоторые из рассматриваемых преимуществ.

Характеристики разъёмных соединений проверены в соответствии со следующими значениями и условиями [5]:

- защита от проникновения (сопряжённая) IEC 60529 IP68;
- сила отрыва 80 даН (80 кг);
- рабочая температура по стандарту IEC 61300-2-22 в диапазоне $-40...+85^{\circ}\text{C}$;
- устойчивость к вибрации IEC 61300-2-1 на уровне 10–500 Гц/10g;
- ударная устойчивость по требованиям IEC 61300-2-9 – 100 г;
- экспериментальное исследование на манер краш-теста в условиях солевого тумана дало результаты надёжности в течение 30 суток, затем эксперимент прекратили.

Выводы и перспективы

Как видно из приведённых сведений, рассмотренные датчики работают в широком спектре задач, диапазоне температур, а некоторые даже в сложных условиях погружения в жидкости (воду) и строительные растворы, неокислотные смеси. ВОД и ВОА остаются незаменимыми в промышленности и быту вне зависимости от фирмы производителя. Однако на рассмотренных примерах фирмы Scaime наиболее чётко видна перспектива и особенности в сравнительном анализе всех аналогичных датчиков деформации поверхности, угла деформации, перемещения, наклона, экстензометров и акселерометров других производителей. По сути, принцип их действия сопоставим. Автор благодарит Александра Константинова за содействие в получении сведений о востребованной разработчиками РЭА продукции компании Scaime – проспектов на французском языке. Из изучения французской культуры и опыта сохранения памятников старины мы узнали, что в своё время в Пантеоне для мониторинга состояния здания установили 8 экстензометров с длинным основанием типа OBLG-1000 (длиной 1 м) и 6 датчиков температуры OBTS-100 – последние для устройств термокомпенсации экстензометров. Подключённые к электронному программируемому контроллеру MDX400T-R, сопряжённому с Campbell, тензодатчики обеспечили

Таблица 9. Технические характеристики волоконно-оптического датчика измерителя наклона для волоконно-оптических линий ОБТИ

| Параметр | Уточнение | Значение |
|---|-------------------------------|--|
| Разрешение (дискретность) | | 0,05...0,1 $^{\circ}\text{C}$ |
| Точность метрологии | Ассигуа | $\pm 1^{\circ}\text{C}$ |
| Повторяемость | Периодичность замера | $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ |
| Диапазон измерения (ЕМ) | Номинальный диапазон (ЕМ) | $-30...+80^{\circ}\text{C}^*$ |
| Рабочая температура | Диапазон температур | $-30...+100^{\circ}\text{C}^{**}$ |
| Максимальное расстояние между двумя датчиками | | 1,5 км |
| Максимальная длина оптоволоконной линии | | 40 км |
| Температура установки и хранения | Температура установки | $-20...+60^{\circ}\text{C}$ |
| Чувствительность к физическому напряжению (воздействию) | Чувствительность к деформации | $< 0,3^{\circ}\text{C}/1000 \text{ мкм/м}$ |
| Соединители | Разъёмы | ST/PC, FC/PC, FC/APC и др. опционально |

* $+80...+100^{\circ}\text{C}$ в пике – максимальная температура.

** Значение зависит от особенностей сбора данных.

Таблица 10. Сводная таблица отличий ВОД и ВОА типов OBSG, OBSGW, OBEG, OBLG, OBDI, OBTI, OBAS, OBTS

| Модель | OBSG | OBSGW | OBEG | OBLG | OBDI | OBTI | OBAS | OBTS |
|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------|--|--|---------------------------------|
| Вместимость | $-5000...5000 \text{ мкм/м}$ | $-2000...2000 \text{ мкм/м}$ | $-5000...5000 \text{ мкм/м}$ | $-2000...2000 \text{ мкм/м}$ | 25/50/100 мм | $-3...3$ | $-2...+2 \text{ г}$ | $-30...+180^{\circ}\text{C}$ |
| Разрешение | 1 мкм/м | 1 мкм/м | 1 мкм/м | 1 мкм/м | 10/25/50 мкм | 0,002 $^{\circ}$ | 0,10 % | 0,05...1,1 $^{\circ}\text{C}$ |
| Комбинированная ошибка (% Н.Р.) | 0,25 | 1 | 0,25 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,3...1 |
| Чувствительность | 1,2 мкм/м | 1,25 мкм/м | 1,2 мкм/м | 1,25 мкм/м | 9/17/33 мкм | $2 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}/\text{мкм}$ | $\pm 3,3 \times 10^{-3} \text{ г/мкм}$ | 10...25 мкм/ $^{\circ}\text{C}$ |

высокоточный мониторинг состояния памятника архитектуры. Этот пример мы могли бы использовать в России, где пока техническая оснащённость для устройств мониторинга во многих сферах оставляет желать лучшего. Но ситуация поправима, если отечественные разработчики РЭА повысят внимание к тензодатчикам и устройствам мониторинга растяжения-сжатия с соединением по волоконно-оптическим линиям, в том числе по полевой шине CANopen.

Литература

1. Бабушкина Л. Оптоволоконные системы контроля деформации корпуса судна // Презентация Прософт. URL: https://tp.prosoft.ru/docs/shared/webdav_bizproc_history_get/191850/191850/.

2. Варжель С.В. Волоконные брегговские решётки: учебное пособие. СПб.: ИТМО, 2015.
3. Вестерский Н.М., Дубинко Т.Ю. и др. Измеритель деформаций G01B21/32 – для измерения деформации твердых тел // URL: <https://poleznayamodel.ru/model/10/108133.html>.
4. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции. М.: ДМК-Пресс, 2011. 144 с.
5. Техническая документация фирмы «Scaime Sas», Франция // URL: <https://scaime.com/weighing-knowledge-center>.
6. Широков Ю. Scaime – эксперт по взвешиванию // СТА. 2021. № 1. URL: <https://www.cta.ru/articles/otrasli/kontrolno-izmeritelnye-sistemy/138157/>.



ПЛИС фирмы Gowin Semiconductor

Часть 3. Инструментальные средства программной поддержки и разработка аппаратной части проектов ПЛИС GOWIN

Павел Редькин

Предлагаемая статья содержит сведения по инструментальным средствам программной поддержки ПЛИС фирмы GOWIN Semiconductor, предоставляемым как самой фирмой, так и сторонними производителями. В статье рассмотрен порядок создания проектов в системе разработки-отладки аппаратной конфигурации ПЛИС GOWIN, порядок и особенности программирования ПЛИС. Статья предназначена для разработчиков электронной аппаратуры на ПЛИС и студентов специальностей, связанных с цифровой электроникой.

1. Средства программной поддержки ПЛИС GOWIN от производителя

В качестве основных средств программной поддержки семейств ПЛИС своего производства GOWIN Semiconductor предоставляет две бесплатные программные среды для разработки-отладки приложений.

Программная среда GOWIN FPGA Designer представляет собой систему разработки-отладки приложений (IDE) на базе ПЛИС GOWIN и интегрирует в себе возможности синтеза, отображения, размещения, маршрутизации и генерации битового потока (конфигурации массива программируемой логики), а также инструменты программирования ПЛИС GOWIN, встроенный логический анализатор и калькулятор мощности. Среда GOWIN FPGA Designer поддерживает написание исходных кодов проектов ПЛИС на языках описания аппаратных средств VHDL и Verilog HDL.

Программная среда GOWIN MCU Designer представляет собой систему разработки-отладки приложений на основе программных и аппаратных процессорных IP-ядер на базе ПЛИС GOWIN и интегрирует в себе возможности компиляции, линковки и отладки встроенных программ для этих ядер. Среда GOWIN MCU Designer поддерживает написание исходных кодов программ для процессорных ядер ПЛИС GOWIN на языке C.

Отладка кода встроенного ПО для программных и аппаратных процессорных IP-ядер ПЛИС GOWIN в среде

IDE GOWIN MCU Designer осуществляется с помощью сторонних аппаратных отладчиков, подключаемых к целевой ПЛИС через интерфейс JTAG.

Дистрибутивы IDE GOWIN FPGA Designer, предназначенные для работы под ОС Windows и под ОС Linux, могут быть бесплатно загружены с сайта www.gowinsemi.com. Для инсталляции этой IDE необходима лицензия, которая также предоставляется бесплатно при запросе через указанный сайт. В случае возникновения проблем с её получением рекомендуется обратиться за помощью к российскому дистрибьютору продукции GOWIN (АО «Восток», г. Санкт-Петербург) [1].

Дистрибутив IDE GOWIN MCU Designer, предназначенный для работы под ОС Windows (работа IDE под ОС Linux не поддерживается), также может быть бесплатно загружен с сайта www.gowinsemi.com. Для инсталляции IDE GOWIN MCU Designer необходима бесплатная лицензия, порядок получения которой аналогичен порядку получения лицензии для IDE GOWIN FPGA Designer.

Загрузка конфигурации в ПЛИС GOWIN осуществляется только из IDE GOWIN FPGA Designer с помощью встроенного программного инструмента Gowin Programmer, взаимодействующего с аппаратной частью целевой ПЛИС через интерфейс USB ПК.

2. Средства программной поддержки ПЛИС GOWIN от сторонних производителей

Создание приложений на базе программных и аппаратных процессорных

IP-ядер с архитектурой ARM Cortex-M на базе ПЛИС GOWIN также поддерживается широко распространённой средой IDE ARM Keil MDK версии V5.26 и выше от фирмы Keil. Поддержка ПЛИС GOWIN в ARM Keil MDK охватывает не только принципиальную возможность разработки приложений для IP-ядер с архитектурой ARM на базе ПЛИС GOWIN с поддержкой режима отладки кода, но и наличие примеров проектов для IDE ARM Keil MDK, распространяемых GOWIN наряду с примерами проектов для IDE GOWIN MCU Designer. Фирменные руководства от GOWIN по разработке программных приложений на базе ПЛИС с IP-ядрами с архитектурой ARM, как правило, имеют по два раздела: разработка в IDE ARM Keil MDK и разработка в IDE GOWIN MCU Designer.

Отладка кода встроенного ПО для программных и аппаратных процессорных IP-ядер ПЛИС GOWIN в среде IDE ARM Keil MDK осуществляется с помощью сторонних аппаратных отладчиков, подключаемых к целевой ПЛИС через интерфейс JTAG.

3. Порядок разработки проекта ПЛИС GOWIN

3.1. Общая идеология разработки

Разработка проекта ПЛИС GOWIN начинается с создания нового проекта в среде IDE GOWIN FPGA Designer. Данный проект выступает при разработке проекта ПЛИС в качестве головного. Порядок создания нового проекта в среде IDE GOWIN FPGA Designer подробно изложен в [2].

В случае если предполагается включение в проект ПЛИС программных или аппаратных процессорных IP-ядер, отдельные проекты для их встроенного ПО необходимо создать и откомпилировать в одной из сред IDE GOWIN MCU Designer или IDE ARM Keil MDK независимо от головного проекта ПЛИС. При сборке головного проекта ПЛИС выходные данные указанных проектов передаются в него в качестве

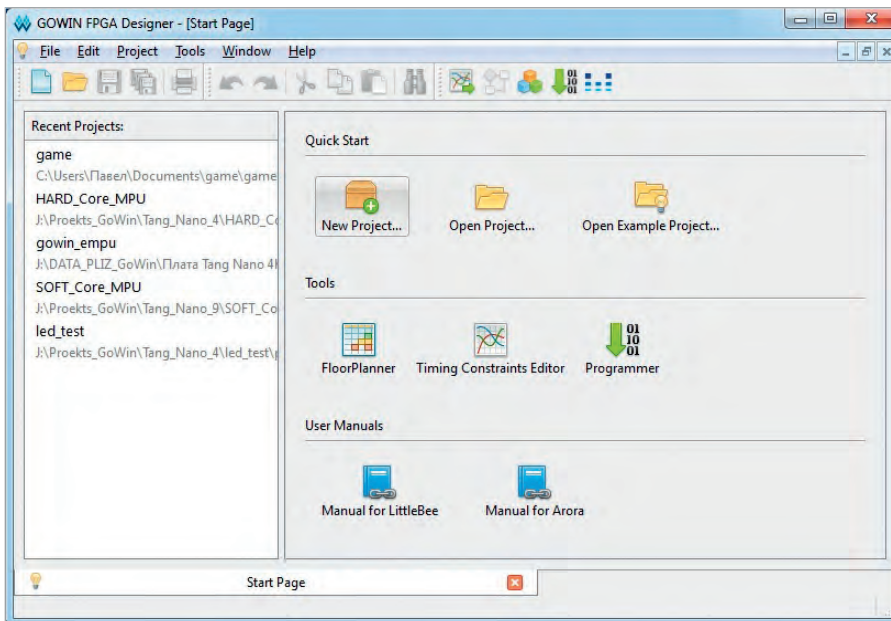


Рис. 1. Стартовое окно «Start Page» в GOWIN FPGA Designer

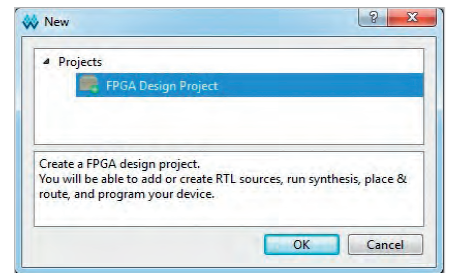


Рис. 2. Окно вариантов нового проекта

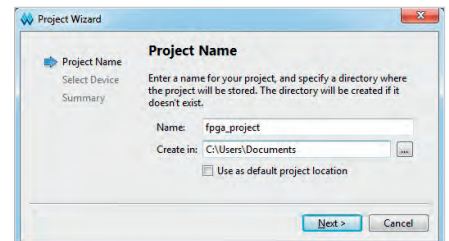


Рис. 3. Окно задания имени нового проекта и пути к нему

входных данных. В следующей части статьи будет описано, каким образом это делается.

В случае если включение в проект ПЛИС процессорных IP-ядер не предполагается, данный проект ПЛИС разрабатывается только в среде IDE GOWIN FPGA Designer и никаких входных данных из других проектов не использует.

3.2. Создание проекта ПЛИС в среде IDE GOWIN FPGA Designer

Порядок создания в среде IDE GOWIN FPGA Designer проекта ПЛИС проиллюстрируем на примере отладочной платы TangNano 9K с ПЛИС GW1NR-9. Для наглядности на начальном этапе создадим проект ПЛИС без программного IP-ядра. В дальнейшем программное IP-ядро можно будет добавить в готовый проект.

После запуска GOWIN FPGA Designer по умолчанию откроется стартовое окно Start Page, в котором нужно выбрать иконку «New Project...» и кликнуть по ней, как показано на рис. 1. Далее откроется окно, предлагающее выбрать варианты нового проекта (рис. 2). Из вариантов пока предлагается только один – «FPGA Design Project». Кликаем на кнопке «OK» в этом окне, после чего открывается окно, в котором необходимо задать имя нового проекта и путь к нему на диске ПК (рис. 3). Задаём имя и путь, после чего кликаем на кнопке «Next». Открывается окно задания целевой ПЛИС, показанное на рис. 4. В этом окне нужно как можно точнее специ-

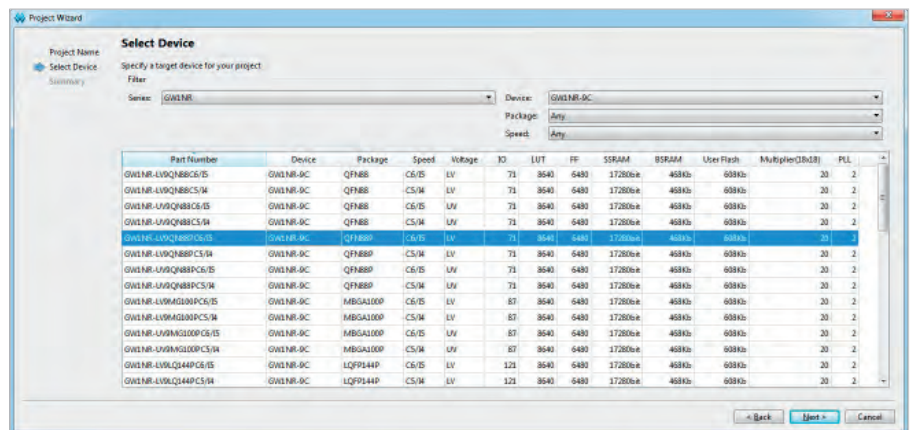


Рис. 4. Окно задания целевой ПЛИС

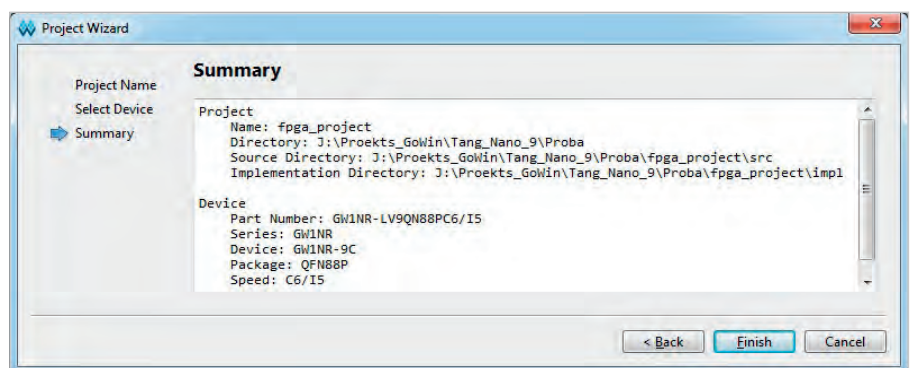


Рис. 5. Итоговое окно «Summary» с настройками проекта

фицировать используемую нами ПЛИС, обращая внимание не только на её обозначение, но и на её корпусное исполнение. Для нашего проекта задаём установленную на плате Tang Nano 9K ПЛИС GW1NR-LV9Q9N88PC6/I5 в корпусе QFN88P, после чего кликаем на кнопке «Next». Открывается итоговое окно «Summary», в котором указаны все настройки нашего проек-

та (рис. 5). Если там всё верно, кликаем на кнопке «Finish». Проект создан.

Теперь необходимо наполнить созданный проект конкретным содержанием, то есть включить в него файлы исходных текстов. Для создания таких файлов «с нуля» в главном меню выбираем File > New, после чего открывается окно создания новых исходных файлов, показанное на рис. 6. Для начала

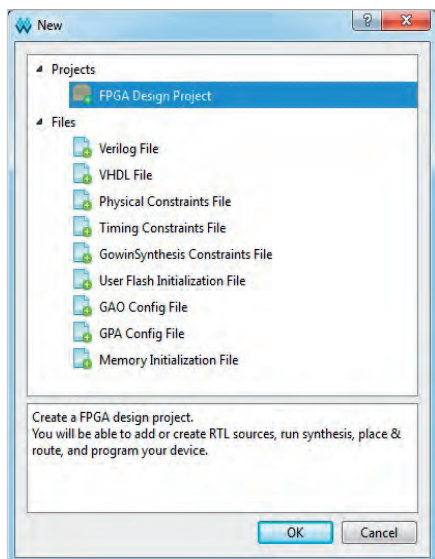


Рис. 6. Окно создания новых исходных файлов

создадим файл модуля верхнего уровня проекта на языке Verilog HDL, выбрав в этом окне позицию Verilog File, после чего нам будет предложено задать имя файла и путь к нему, как показано на рис. 7. Задаём имя файла FPGA_modul. По умолчанию создаваемый файл будет находиться в автоматически созданном каталоге src нашего проекта и будет автоматически включён в его состав (установленная галочка в позиции «Add to current project»). Кликаем на кнопке «OK», после чего на вкладке Design в окне обозрений проекта появляется позиция созданного файла FPGA_modul с расширением «.v», а в окне просмотра файлов открывается его пока ещё пустое содержимое.

Теперь настроим конфигурацию нашего проекта ПЛИС, выбрав в главном меню Project > Configuration. Откроется окно Configuration (рис. 8), в котором необходимо выбрать позицию General в группе Synthesize и задать используемые в проекте языковые стандарты для языков описа-

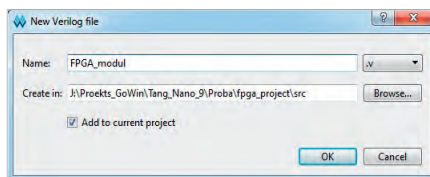


Рис. 7. Окно задания имени исходного файла и пути к нему

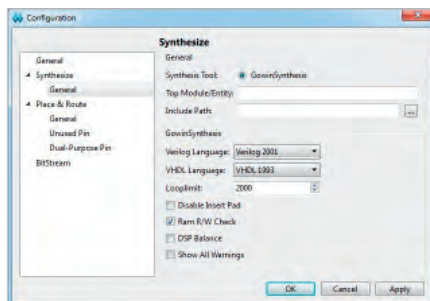


Рис. 8. Окно конфигурации проекта

ния аппаратных средств Verilog HDL и VHDL, как показано на рисунке.

Далее выбираем позицию General в группе Place & Route и задаём генерируемые в проекте выходные файлы (рис. 9).

Далее выбираем позицию Unused Pin в группе Place & Route и задаём использование выводов двойного назначения к плюсу источника питания, как показано на рис. 10.

Далее выбираем позицию Dual-Purpose Pin в группе Place & Route и задаём использование выводов двойного назначения (рис. 11). Каждая позиция в этом окне позволяет разрешить или запретить использование в качестве линий GPIO выводов ПЛИС двойного назначения, то есть таких, которые, помимо функции GPIO, могут использоваться в качестве линий одного из поддерживаемых ПЛИС интерфейсов (JTAG, SSPI, MSPI, I²C) или для какой-либо служебной функции (READY, DONE, RECONFIG_N).

Наконец, выбираем позицию BitStream и задаём параметры генера-

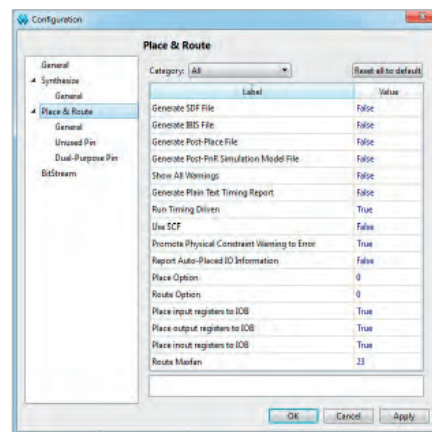


Рис. 9. Генерируемые в проекте выходные файлы

ции файла битового потока, как показано на рис. 12. К ним относятся проверка контрольной суммы CRC, сжатие файла битового потока, шифрование файла битового потока, защита файла битового потока от считывания конфигурации, интерфейс фоновой программирования, скорость загрузки конфигурации ПЛИС и формат файла битового потока. Под фоновым программированием здесь понимается возможность повторно программировать встроенную Flash-память конфигурации ПЛИС без прерывания текущего управления FPGA. Значение в поле фоновой программирования (Background Programming) задаётся в зависимости от модели целевой ПЛИС в соответствии с табл. 1.

Значение OFF в поле Background Programming задаётся в случае, если фоновое программирование отключено. После задания значения OFF в качестве интерфейса фоновой программирования для ПЛИС GW2AN-18X или GW2AN-9X задание опции «Use MSPI as regular IO» на вкладке Dual-Purpose Pin становится неактивным и невозможным.

Значение JTAG в поле Background Programming предполагает фоновое

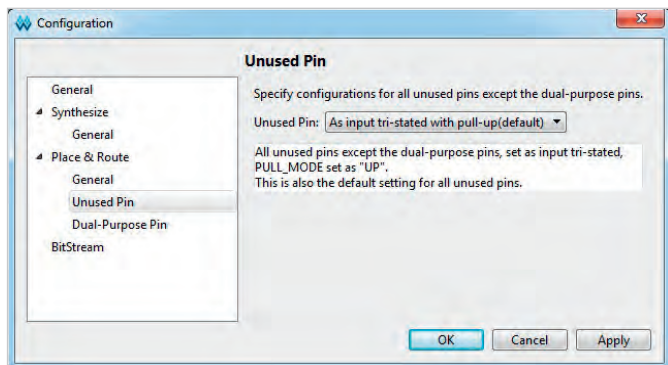


Рис. 10. Подтяжка не используемых в проекте линий GPIO ПЛИС

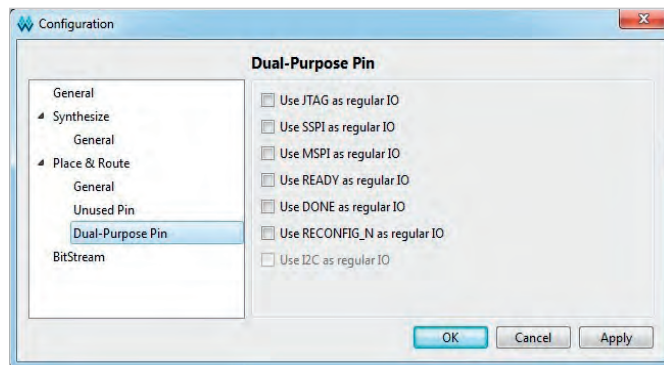


Рис. 11. Использование выводов двойного назначения ПЛИС

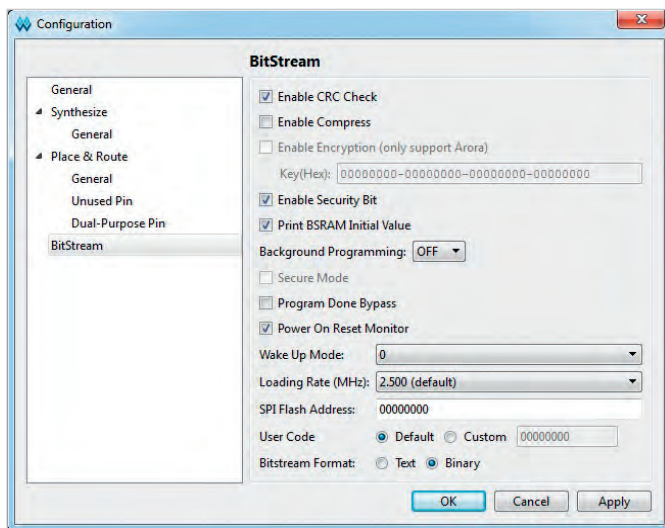


Рис. 12. Параметры генерации файла битового потока

программирование через JTAG при условии, что для линий JTAG в окне Dual-Purpose Pin не задано использование в качестве линий GPIO. Значение I²C в поле Background Programming предполагает фоновое программирование через I²C, причём при выборе этого значения на вкладке BitStream появляется дополнительное поле выбора адреса ведомого устройства (ПЛИС) на шине I²C в диапазоне от 0x00 до 0x7F. После задания I²C в качестве интерфейса фоновое программирование выбор опции «Use JTAG as regular IO» на вкладке Dual-Purpose Pin становится неактивным и невозможным.

Значение Internal в поле Background Programming предполагает фоновое программирование через внутреннюю логику ПЛИС. После задания значения Internal в качестве интерфейса фоновое программирование задание опции «Use MSPI as regular IO» на вкладке Dual-Purpose Pin становится неактивным и невозможным.

После задания значения I²C/JTAG/SSPI/QSSPI в качестве интерфейсов фоновое программирование выбор опции «Use MSPI as regular IO» на вкладке Dual-Purpose Pin становится неактивным и невозможным. Также при выборе этого значения на вкладке BitStream появляется дополнительное поле «HOTBOOT», детали использования которого описаны в [2].

Необходимо заметить, что фоновое программирование не может быть осуществлено в случае, если в составе ПЛИС имеется пользовательская Flash-память (User Flash).

Опция защиты файла битового потока от считывания «Enable Secure Bit» позволяет осуществить только одно-

кратное программирование ПЛИС. Эта опция поддерживается лишь в ПЛИС GW1NSE-2C и GW1NSER-4C, для которых она по умолчанию отключена.

Опция «Program Done Bypass» устанавливает возможность начать новое программирование ПЛИС до завершения текущего программирования.

Опция монитора сброса при включении питания «Power On Reset Monitor» позволяет произвести автоматический сброс ПЛИС при включении питания. Этот сброс подразумевает обнуление всех ячеек встроенной памяти RAM, установку линий IO в состояние с высоким выходным сопротивлением со слабой внутренней подтяжкой к плюсу питания до окончания конфигурирования и инициализации ПЛИС. По умолчанию эта опция отключена.

Опция задания способа «пробуждения» (Wake Up) ПЛИС позволяет задать один из двух вариантов: 0 и 1. В случае задания варианта 0 ножка DONE должна быть для «пробуждения» ПЛИС подтянута к плюсу питания или к общему проводу. Когда задан вариант 1 и ножка DONE подтянута к плюсу питания, то загрузка и выполнение конфигурации ПЛИС производятся в нормальном режиме. Если же для варианта 1 ножка DONE подтянута к общему проводу, то загрузка конфигурации ПЛИС производится в нормальном режиме, а для «пробуждения» ПЛИС ножка DONE должна быть подтянута к плюсу питания и соединена с линией TСК, на которой действует импульсный сигнал, который и «пробуждает» ПЛИС. По умолчанию задан вариант «пробуждения» 0.

Опция «Loading Rate» задаёт скорость загрузки битового потока из

Таблица 1. Значение в поле Background Programming параметров битового потока

| Модель ПЛИС GOWIN | Возможные значения поля Background Programming; значение по умолчанию |
|--|---|
| GW1N-1P5/GW1N-2/GW1NR-2, GW1N-4/GW1N-4B, GW1NR-4B/GW1NR-4D/GW1NRF-4B, GW1NS-4/GW1NSR-4, GW1N-9/GW1N-9C, GW1NR-9/GW1NR-9C, GW1NZ-1/GW1NZ-1C | OFF, JTAG; OFF по умолчанию |
| GW1N-1P5B/GW1N-2B/GW1NR-2B | OFF, JTAG, I2C; OFF по умолчанию |
| GW2AN-18X/GW2AN-9X | OFF, Internal, I2C/JTAG/SSPI/QSSPI; OFF по умолчанию |

Flash в SRAM в режимах AutoBoot и MSPI. По умолчанию эта скорость соответствует частоте 2,5 МГц. Для уточнения подробностей по заданию скорости загрузки битового потока для различных семейств и линеек ПЛИС GOWIN рекомендуется обратиться к источнику [2].

Опция «SPI Flash Address» позволяет задать адрес во внешней памяти SPI, с которого будет осуществляться загрузка битового потока конфигурации ПЛИС. По умолчанию этот адрес равен 00000000. Для уточнения подробностей по загрузке битового потока конфигурации ПЛИС из внешней памяти рекомендуется обратиться к руководству по программированию ПЛИС GOWIN [3].

Опция «User Code» позволяет задать для пользовательского кода битового потока конфигурации ПЛИС некое константное значение, которое будет проверено программатором при загрузке в ПЛИС файла битового потока. В случае включения указанной опции это константное значение по умолчанию равно 00000000.

Опция «Bitstream Format» позволяет задать формат выходного файла битового потока: текстовый или двоичный. По умолчанию задан двоичный формат. При выборе текстового формата генерируется файл с расширением *.fs в обычном текстовом формате, при выборе двоичного формата генерируются файлы с расширениями *.fs, *.bin и *.binx. Файлы с расширениями *.bin и *.binx представляют собой файлы битового потока в двоичном формате, причём файл с расширением *.binx содержит информацию об аннотации заголовка. Файл с расширением *.bin

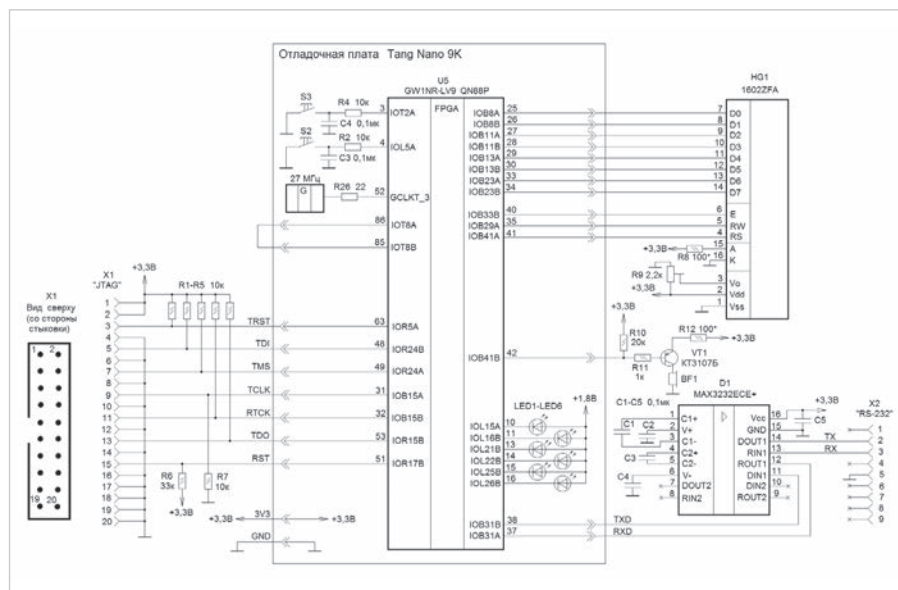


Рис. 13. Принципиальная схема макета с платой Tang Nano 9K

не содержит информации об аннотации заголовка.

Задаём параметры генерации файла битового потока, как показано на рис. 12, и кликаем по кнопке «ОК». Наш проект настроен.

Теперь заполним содержимое файла модуля верхнего уровня нашего проекта FPGA_modul.v каким-либо исходным кодом на языке Verilog HDL. Для примера в исходном коде нашего проекта реализуем несколько контроллеров, обслуживающих вывод данных в символьный двухстрочный жидкокристаллический индикатор (ЖКИ), совместимый со стандартом HD44780. Принципиальная схема макета с подключением такого ЖКИ к ПЛИС платы Tang Nano 9K показана на рис. 13. Помимо символьного ЖКИ (на схеме – HG1), на рисунке показано подключение к ПЛИС штатных кнопок S2, S3, светодиодов LED1–LED6 и генератора синхросигнала 27 МГц платы Tang Nano 9K, а также внешние для платы Tang Nano 9K узлы: преобразователь уровней «UART-RS-232» для обеспечения обмена ПЛИС с внешними устройствами по интерфейсу RS-232 (на схеме – ИМС D1, разъём X2 типа DB-9), узел генерации звуковых сигналов (на схеме – транзистор VT1, звукоизлучатель BF1 электромагнитного типа). Также на схеме несколько выводов GPIO ПЛИС подтянуты к плюсу питания +3,3 В и к общему проводу с помощью внешних резисторов R1–R7 и соединены с контактами внешнего по отношению к плате Tang Nano 9K разъёма форм-фактора интерфейса JTAG (на схеме – разъём X1). Этот раз-

ём планируется использовать в целях отладки встроенного ПО программного процессорного IP-ядра при его добавлении к проекту ПЛИС. Прочие штатные элементы платы Tang Nano 9K, в том числе штатные источники питания, на схеме условно не показаны. Линии GPIO ПЛИС выводов 85, 86 соединены между собой внешней короткозамкнутой перемычкой, назначение которой будет объяснено позднее. Кнопка S2 используется в проекте ПЛИС в качестве кнопки сброса.

Внешний вид макета показан на рис. 14.

Теперь создадим файл физической привязки линий ввода-вывода модуля верхнего уровня к ножкам нашей ПЛИС согласно схеме рис. 13. Снова открываем окно создания новых исходных файлов, показанное на рис. 6, выбрав в этом окне позицию Physical Constraints File. Аналогичным образом задаём имя (FPGA_constr) и путь к этому файлу (каталог/src нашего проекта), кликаем на кнопке «ОК», после чего заполняем содержимое нашего файла описанием линий ввода-вывода. На первоначальном этапе разработки проекта этот файл создаётся вручную. Указываем для всех цепей входов и выходов нашего проекта ПЛИС номера выводов ПЛИС и прочие параметры: наличие подтяжки к плюсу питания или к общему проводу, максимальный ток для выходов, тип логики для входов в приведённом ниже формате. В каждой такой записи за словом «IO_LOC» следует имя цепи проекта ПЛИС в кавычках, а затем задаваемый для этой цепи номер ножки ПЛИС. За словом «IO_PORT» следует имя цепи

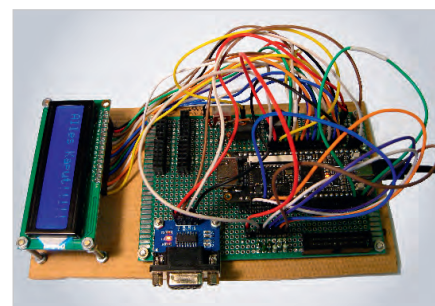


Рис. 14. Внешний вид макета с платой Tang Nano 9K

проекта ПЛИС в кавычках, а затем задаваемые для этой цепи параметры (тип логики, наличие и тип внутренних подтяжек, максимальный ток в мА для выхода), например:

```
// Вход синхросигнала, номер вывода GPIO ПЛИС - 52
IO_LOC "sys_clk" 52;
IO_PORT "sys_clk" IO_
TYPE=LVCOS33 PULL_MODE=UP;

// Выход подключения светодиода, номер вывода GPIO ПЛИС - 10
IO_LOC "led_0" 10;
IO_PORT "led_0" IO_
TYPE=LVCOS33 PULL_MODE=UP
DRIVE=8;
```

Отдельные параметры в каждой такой записи разделяются пробелами, в конце каждой записи ставится точка с запятой, строка с комментариями предваряется символами «//». После заполнения сохраняем файл кликом по иконке «дискета».

Теперь добавим в наш проект ПЛИС аппаратную систему PLL в расчёте на перспективное использование в проекте процессорного IP-ядра. Для этого в главном меню выберем Tools > IP Core Generator. В открывшемся окне генератора IP-ядер в разделе Hard Module выберем подраздел CLOCK, а в нём позицию аппаратного IP-ядра PLL – «rPLL» (рис. 15). После клика по ней откроется окно настройки параметров PLL, которое следует заполнить, как показано на рис. 16. Входную частоту для нашей PLL задаём равной 27 МГц, поскольку мы будем тактировать PLL от нашего системного синхросигнала 27 МГц. Выходную частоту PLL зададим в два раза больше входной (54 МГц) в расчёте на тактирование программного процессорного IP-ядра. После клика на кнопке «ОК» нам будет предложено включить PLL в наш проект. Соглашаемся. После этого в нашем проекте будут

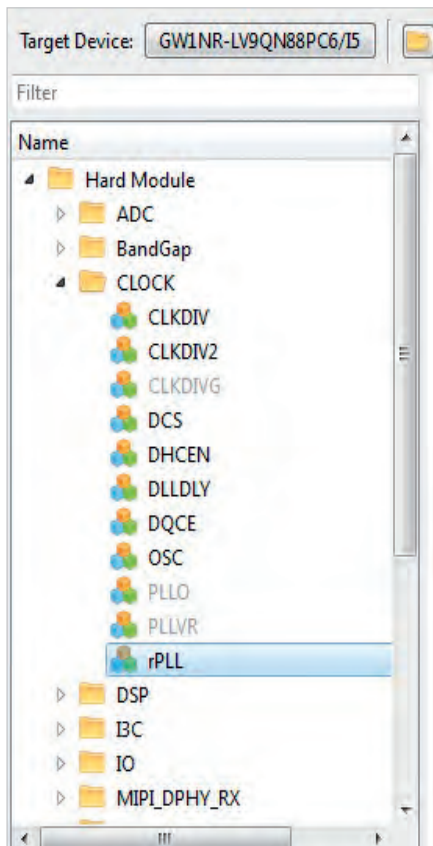


Рис. 15. Дерево генератора IP-ядер

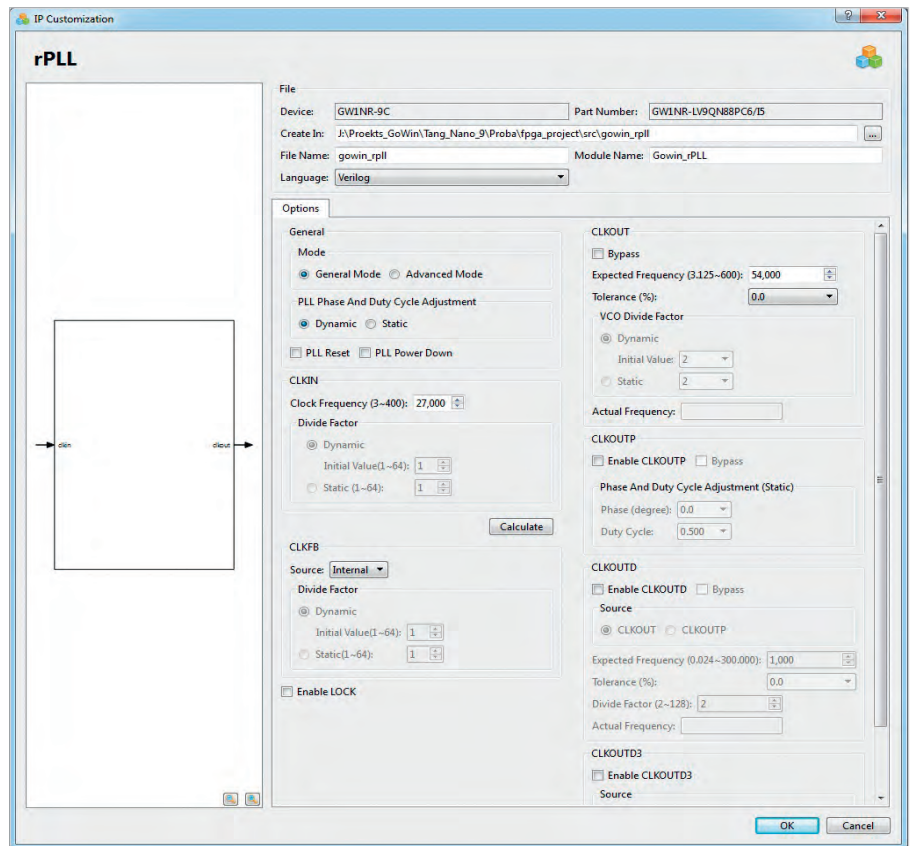


Рис. 16. Окно настройки параметров PLL

```

1 //Copyright (C)2014-2022 Gowin Semiconductor Corporation.
2 //All rights reserved.
3 //File Title: Template file for instantiation
4 //GOWIN Version: V1.9.8.08
5 //Part Number: GW1NR-LV9QN88PC6/I5
6 //Device: GW1NR-9C
7 //Created Time: Sat May 13 18:44:18 2023
8
9 //Change the instance name and port connections to the signal names
10 //-----Copy here to design-----
11
12 Gowin_rPLL your_instance_name(
13     .clkout(clkout_o), //output clkout
14     .clkkin(clkin_i) //input clkkin
15 );
16
17 //-----Copy end-----

```

```

860
861
862
863
864
865 //-----
866 // IP-ядро PLL
867 //-----
868
869 wire clkout_o_PLL; // выходной синхросигнал PLL
870
871 Gowin_rPLL Gowin_rPLL_1(
872     .clkout(clkout_o_PLL), //output clkout PLL
873     .clkkin(sys_clk) //input clkkin
874 );
875
876
877

```

Рис. 17. а) файл шаблона модуля PLL; б) модуль PLL в качестве модуля нижнего уровня в проекте

автоматически созданы два файла: файл исходного кода PLL `gowin_rpll.v` и файл шаблона модуля PLL `gowin_rpll_tmp.v`, показанный на рис. 17 (а). Из последнего необходимо скопировать исходный код и вставить его в наш файл модуля верхнего уровня проекта `FPGA_modul.v`, задав ему при этом уникальное имя, а также входные и выходные сигналы, как показано на рис. 17 (б).

Запускаем общую сборку проекта ПЛИС (синтез и компиляцию) кликом на иконке «Run All» на панели инструментов. Сборка проекта займёт некоторое время. В случае успешного завершения сборки все узлы на странице Process будут отмечены зелёными кружками с галочками, как показано на рис. 18. В случае наличия ошибок в

проекте один или несколько узлов на странице Process будут отмечены жёлтыми кружками со знаком вопроса, а в окне Console появятся сообщения об ошибках (рис. 19). Щелчком на позиции сообщения об ошибке можно переместиться на ошибку в исходном коде.

В случае безошибочного завершения сборки можно отредактировать распределение сигналов проекта по выводам целевой ПЛИС уже не вручную, а с помощью специального инструмента – планировщика FloorPlanner, для чего необходимо выбрать его позицию на странице Process (рис. 18) и кликнуть по ней. В открывшемся окне FloorPlanner нужно выбрать внизу страницу I/O Constraints, как показано на рис. 20, в которой можно отредакти-

ровать параметры всех цепей ПЛИС: номера выводов ПЛИС, наличие подтяжки к плюсу питания или общему проводу, максимальный ток для выходов, тип логики для входов и прочее. Ранее созданный нами файл с расширением `FPGA_constr.cst` при этом будет автоматически изменён, если он в текущий момент не открыт.

После безошибочного завершения сборки проекта ПЛИС можно переходить к загрузке файла битового потока проекта в конфигурационную память нашей целевой ПЛИС.

3.3. Загрузка проекта в целевую ПЛИС

Перед началом загрузки необходимо физически подключить отладочную

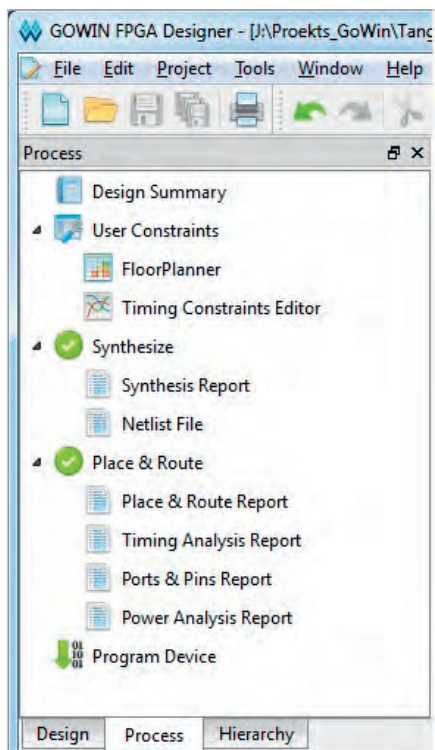


Рис. 18. Успешное завершение сборки проекта ПЛИС

платы Tang Nano 9К к ПК через USB и удостовериться, что операционная система ПК обнаружила новое подключение. В случае использования платы TangNano 9 получаем составное устройство, включающее контроллер USB и СОМ-порт, как показано на рис. 21.

Для запуска программатора ПЛИС необходимо сделать двойной клик на позиции Program Device на странице Process (рис. 18). Откроется окно программатора Gowin Programmer и поверх него – окно настройки загрузочного кабеля Cable Setting. Если оно будет иметь вид, показанный на рис. 22, а в поле Output окна программатора Gowin Programmer появится сообщение «Cable found:...», значит, программатор Gowin Programmer обнаружил подключение отладочной платы, корректно опознал её и готов загружать в её ПЛИС данные. Если подключение отладочной платы к ПК программатором не обнаружится, то откроется окно с сообщением «No USB Cable Connection». В этом случае необходимо переподключить плату к ПК и вручную протестировать наличие подключения с помощью кнопки «Query/Detect Cable» до получения требуемого результата. Также в окне Cable Setting можно задать скорость (частоту) загрузки данных в ПЛИС.

Добившись корректного обнаружения подключённой отладочной

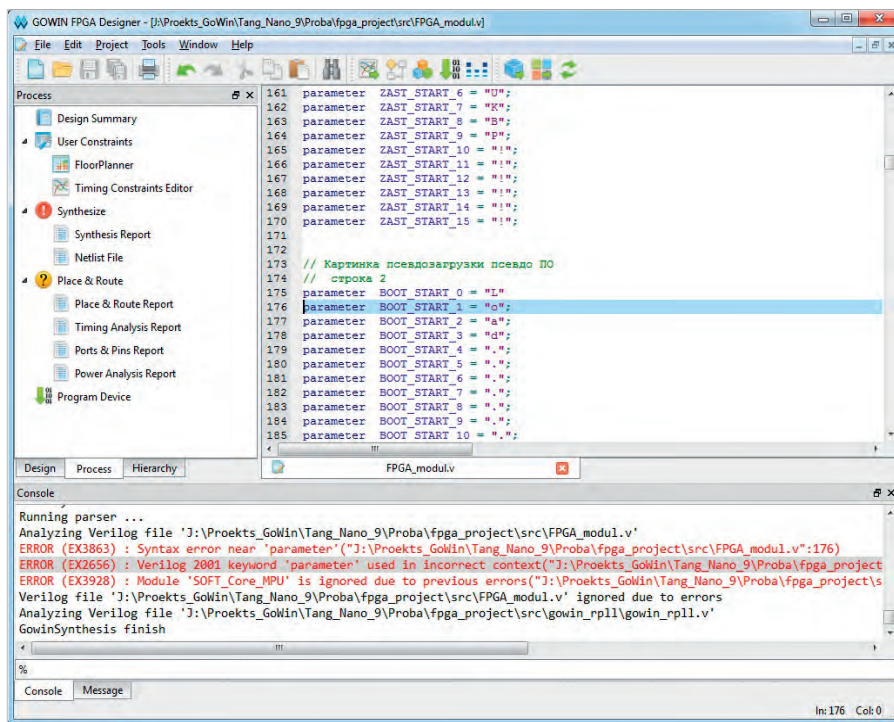


Рис. 19. Завершение сборки проекта ПЛИС с ошибкой

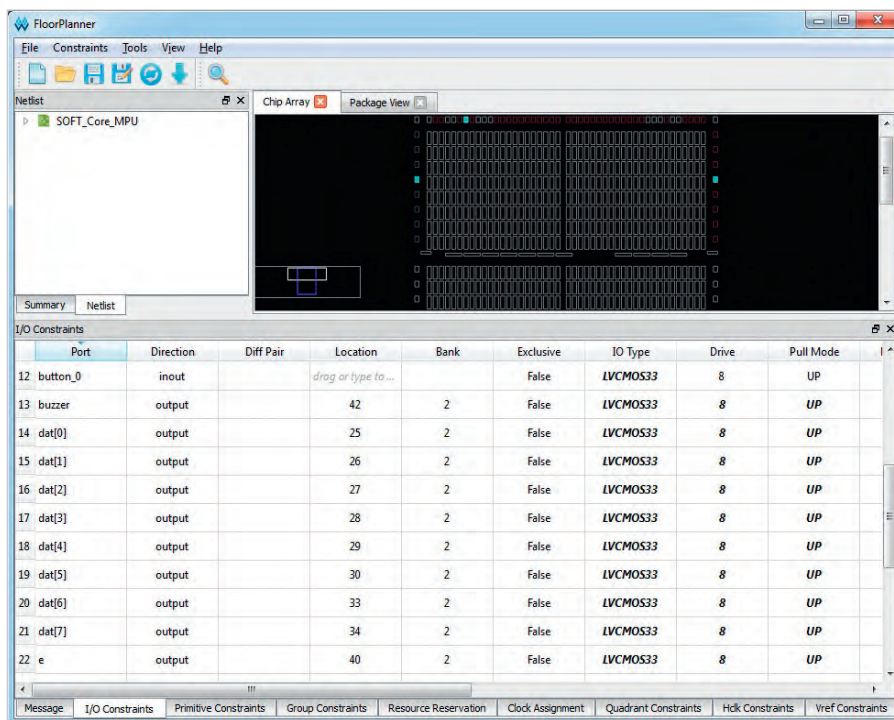


Рис. 20. Страница I/O Constraints окна «FloorPlanner»

платы, необходимо задать параметры загрузки в ПЛИС. Двойным кликом на позиции нашей ПЛИС в графе Operation открываем окно конфигурирования целевой ПЛИС (рис. 23). В поле «Access Mode» этого окна выбираем из выпадающего меню тип памяти ПЛИС для доступа, в нашем случае – «Embedded Flash Mode», то есть встроенную Flash-память, как показано на рисунке. Путь к загружаемому в ПЛИС файлу задаётся в графе

FSFile. По умолчанию там уже задан путь к файлу битового потока нашего проекта fpga_project.fs. Для сохранения заданных параметров загрузки кликаем по кнопке Save. Затем запускаем загрузку в ПЛИС с помощью иконки «Program/Configure» из главного меню окна программатора Gowin Programmer. Ход загрузки конфигурации в ПЛИС отображается нарастающей шкалой, показанной на рис. 24. По завершении в поле Output окна

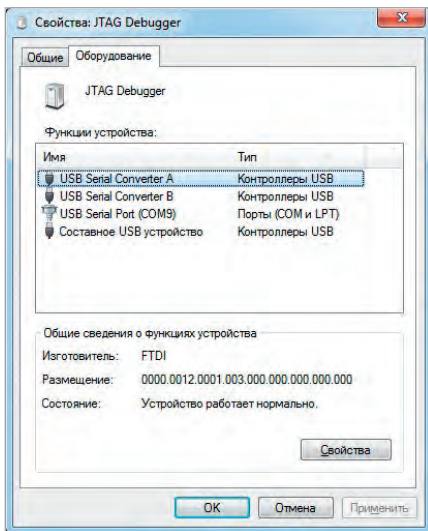


Рис. 21. Так видит подключённую плату Tang Nano 9K операционная система ПК

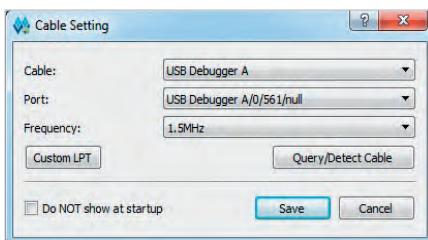


Рис. 22. Окно настройки загрузочного кабеля «Cable Setting»

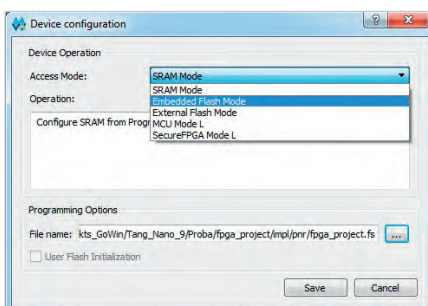


Рис. 23. Окно конфигурирования целевой ПЛИС

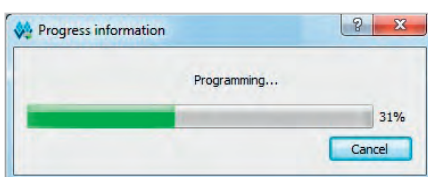


Рис. 24. Ход загрузки конфигурации в ПЛИС

программатора Gowin Programmer выдаётся сообщение о завершении загрузки «Program Finished!». После завершения загрузки проект ПЛИС сразу же стартует: на ЖКИ макета выводится начальная заставка – фраза «Hello, Friend!», затем производится «псевдозагрузка псевдо-ПО»: выводится слово «Load». Далее поле

ЖКИ заполняется точками с соответствующим звуковым сопровождением. При подключении вывода 85 ПЛИС к цепи питания +3,3 В на ЖКИ выводится фраза «Things are good», а при его подключении к общему проводу – фраза «Things are bad». Внешнюю короткозамкнутую перемычку между выводами 85, 86 ПЛИС предварительно необходимо разомкнуть.

Данный проект не несёт никакой функциональной нагрузки, а просто демонстрирует работу ПЛИС. Архив

проекта в виде файла Proba.zip доступен для загрузки с сайта журнала.

В следующей части статьи будут описаны порядок включения в данный проект программного процессорного IP-ядра и разработки для него встроенного ПО.

Литература

1. URL: <https://vostok-electronics.ru/>.
2. Gowin Software User Guide. SUG100-2.6E, 11/02/2021.
3. Gowin Programmer User Guide. SUG502-1.4E, 06/01/2022.



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@PROCHIP.RU • WWW.PROCHIP.RU



Реклама

Новые DC/DC-конвертеры на DIN-рейку MEAN WELL для высоковольтных сетей постоянного тока

Игорь Елисеев

В данном обзоре будут рассмотрены представители двух семейств DDRH и RSDH, наиболее характерные в классе источников питания на DIN-рейку и на шасси для высоковольтных сетей постоянного тока.

Сети постоянного тока не так уж редко встречаются в современном мире. Достаточно вспомнить, что весь городской электротранспорт, включающий трамваи, троллейбусы, поезда метро и монорельс, питается постоянным током. Высоковольтные сети постоянного тока широко применяются на железной дороге для питания электричек и электровозов. Станции зарядки электромобилей и электробусов, системы хранения энергии, системы альтернативной энергетики, телекоммуника-

Таблица 1. Характерные значения напряжений в сетях постоянного тока

| Напряжение, В | Назначение |
|---------------|---|
| 550...600 | Для трамваев и троллейбусов |
| 600 | Для монорельсовых поездов |
| 550...975 | Для поездов метро |
| 3000 | Для электровозов и электропоездов |
| 400...1000 | Для зарядных станций электромобилей и электробусов |
| 800...1500 | Для систем хранения энергии |
| 380/400 | Для телекоммуникационных центров и центров обработки данных |

ционные центры и центры обработки данных также нуждаются в питании постоянным током.

Все эти системы электропитания объединяет высокое сетевое напряжение. В табл. 1 представлены характерные значения напряжений в сетях постоянного тока в зависимости от назначения.

Высокое сетевое напряжение позволяет уменьшить ток нагрузки и, соответственно, снизить резистивные потери на проводах. Но в то же время это создаёт проблемы, связанные с электропитанием встроенной низковольтной электронной аппаратуры и исполнительных механизмов. Для питания этих устройств необходимо применять понижающие преобразователи постоянного тока. Но стандартные DC/DC-конвертеры, как правило, не рассчитаны на столь высокие входные напряжения. В данном случае необходимо применять специализированные источники питания со сверхшироким входом. Как видно из табл. 1, во всех случаях (за исключением электровозов и электропоездов) сетевое напряжение не превышает 1500 В. Следовательно,

это и есть тот верхний предел входного напряжения, на который должен быть рассчитан DC/DC-конвертер, предназначенный для работы в таких сетях. Что касается электровозов и электропоездов, то и для них не требуется источник питания с входным напряжением, превышающим 1500 В. Дело в том, что в этих транспортных средствах применяются тяговые двигатели, рассчитанные на гораздо более низкое напряжение, чем сетевое (3000 В). Эти двигатели соединяются между собой последовательно (или последовательно-параллельно), служа, таким образом, своеобразным делителем напряжения. В зависимости от типа двигателей цепочка может состоять из двух, четырёх или восьми элементов. Соответственно и сетевое напряжение будет пропорционально распределяться между элементами цепочки, позволяя получать ряд фиксированных напряжений с кратностью 375 В максимальным значением до 1500 В.

Компания MEAN WELL выпускает специализированные DC/DC-конвертеры именно для случаев, когда требуется источник питания со сверхшироким входом, способный работать при входных напряжениях до 1500 В. Такие приборы входят в состав семейств DDRH и RSDH, различающихся между собой конструктивным исполнением, а также диа-



Рис. 1. Внешний вид DC/DC-конвертера семейства DDRH на 60 Вт



Рис. 2. Внешний вид DC/DC-конвертера семейства DDRH на 120 Вт



Рис. 3. Внешний вид DC/DC-конвертера семейства DDRH на 240 Вт

пазонами мощностей и выходных напряжений.

Источники питания семейства DDRH выполнены в корпусе на DIN-рейку. Семейство содержит три серии на мощности 60, 120 и 240 Вт. Внешний вид этих приборов представлен на рис. 1, 2 и 3.

Входное напряжение подаётся на клеммы, расположенные в нижней части корпуса, а выходное поступает на контакты верхнего разъёма. Там же (на верхнем разъёме) расположены выводы контактов реле, служащие для дистанционного контроля за состоянием выхода источника питания (сигнал “DC OK”). Замкнутое состояние этих контактов свидетельствует о том, что источник питания находится в рабочем состоянии и напряжение на выходе в пределах нормы. Соответственно, разомкнутое состояние контактов реле сигнализирует об аварии. Также о состоянии сигнала “DC OK” можно судить по светодиодному индикатору, расположенному под верхним разъёмом, рядом с выведенным на поверхность корпуса шлицем подстроечного резистора, обозначенного меткой “+V ADJ”. Этот резистор служит для регулировки выходного напряжения в небольших пределах. У источников питания серии DDRH-240, помимо этого, имеется дополнительная пара контактов («P+» и «P-»), выведенных на верхний разъём. Эти контакты предназначены для использования в схеме параллельного включения нескольких источников питания серии DDRH-240 при работе на общую нагрузку. В схеме на рис. 4 показано, как при этом соединяются между собой выходы отдельных приборов. Вспомогательные выводы «P+» и «P-» (контакты 1 и 2 на разъёме TB3), объединённые в параллель, так же, как и выходные шины, служат для взаимосвязи между отдельными источниками питания с целью выравнивания токов (то есть приведения их к одним и тем же значениям) в их выходных цепях (рис. 4).

Допускается объединять для параллельной работы на общую нагрузку до четырёх источников питания серии DDRH-240. Естественно, все они должны быть на одно и то же выходное напряжение (с точностью до 0,2 В). Выходные токи конвертеров при параллельном включении должны быть не менее 3% и не более 90% от номинального значения.

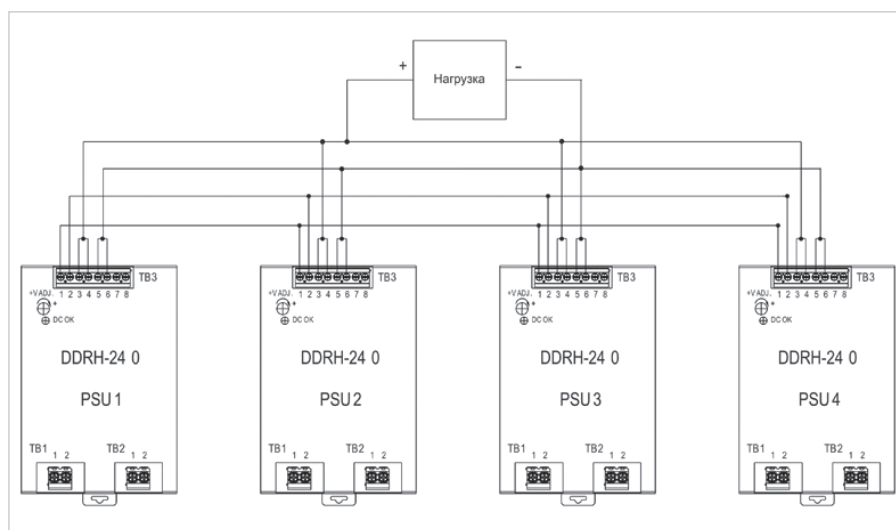


Рис. 4. Схема параллельного включения источников питания серии DDRH-240

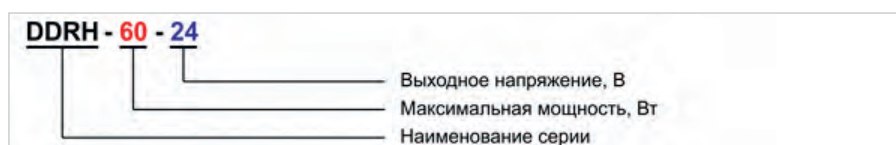


Рис. 5. Структура наименования DC/DC-конвертеров семейства DDRH

Наименования приборов включают название семейства, максимальную выходную мощность и номинал выходного напряжения. Структура наименования DC/DC-конвертеров семейства DDRH на примере источника питания DDRH-60-24 представлена на рис. 5.

В состав семейства DDRH входят источники питания на пять выходных напряжений 5, 12, 24, 32 и 48 В. Но в состав отдельных серий включены только по четыре номинала из этого списка. Пределы регулировки выходного напряжения по каждому из номиналов могут различаться в зависимости от серии. Что касается остальных характеристик источников питания семейства DDRH (электрических, технических и эксплуатационных), то они могут различаться для отдельных приборов не только в зависимости от серии и номинала выходного напряжения, но также и от величины входного напряжения, учитывая сверхширокий диапазон его изменений. Основные характеристики DC/DC-конвертеров семейства DDRH представлены в табл. 2.

Источники питания всех серий семейства DDRH имеют встроенные схемы защиты от коротких замыканий, перегрузок и перенапряжений по выходу, от перегрева, а также от недо-напряжения и переплюсовки по входу. Тем не менее для дополнительной защиты приборов требуется использовать внешний предохранитель. Такой

предохранитель должен быть рассчитан на ток до 4 А при входном напряжении до 1500 В. Этот компонент вместе с типовым держателем производит компания MEAN WELL под названием DDRH-WJ30-4-H. Схема подключения внешнего предохранителя на примере источника питания серии DDRH-240 представлена на рис. 6.

Все приборы семейства DDRH рассчитаны на охлаждение естественной конвекцией воздуха. Гарантия производителя на все источники питания данного семейства составляет 3 года.

Источники питания семейства RSDH отличаются, в первую очередь, конструктивным исполнением. Приборы данного семейства выпускаются в оболочке из тонкого листового перфорированного металла, защищающей элементы схемы от внешних механических воздействий и служащей экраном от электромагнитных излучений. Такой вариант конструктивного исполнения носит название «в кожухе». Его главное достоинство заключается в том, что благодаря перфорации оболочки достигается улучшенный теплообмен между элементами схемы прибора и внешней средой за счёт естественной конвекции воздуха.

Семейство RSDH насчитывает всего две серии по мощности – на 150 и 300 Вт. Внешний вид приборов этих серий показан на рис. 7 и 8.

Таблица 2. Технические характеристики источников питания

| Параметр/Наименование | DDRH-60-5 | DDRH-60-12 | DDRH-60-24 | DDRH-60-48 | DDRH-120-12 | DDRH-120-24 | DDRH-120-32 | DDRH-120-48 | DDRH-240-12 | DDRH-240-24 | DDRH-240-32 | DDRH-240-48 | RRDH-150-12 | RRDH-150-24 | RRDH-150-32 | RRDH-150-48 | RRDH-300-12 | RRDH-300-24 | RRDH-300-32 | RRDH-300-48 |
|--|--|------------|------------|------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|--|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 250...1500 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Диапазон входных напряжений постоянного тока, В | 150...1500 | | | | | | | | | | 250...1500 | | | | | | | | | |
| Максимальный пусковой ток на холодном старте, А | при входном напряжении 1500 В: 120; при входном напряжении 800 В: 80; при входном напряжении 150 В: 30 | | | | | при входном напряжении 1500 В: 300; при входном напряжении 800 В: 200; при входном напряжении 250 В: 70 | | | | | при входном напряжении 1500 В: 500; при входном напряжении 800 В: 300; при входном напряжении 250 В: 120 | | | | | при входном напряжении 1500 В: 500; при входном напряжении 800 В: 300; при входном напряжении 300 В: 120 | | | | |
| Номинальное выходное напряжение, В | 5 | 12 | 24 | 48 | 12 | 24 | 32 | 48 | 12 | 24 | 32 | 48 | 12 | 24 | 32 | 48 | 12 | 24 | 32 | 48 |
| Пределы регулировки выходного напряжения, В | 5...6 | 12...15 | 24...29 | 48...54 | 12...15 | 24...29 | 30...36 | 48...58 | 12...15 | 24...29 | 30...36 | 48...58 | 12...15 | 24...29 | 30...36 | 48...58 | 12...15 | 24...29 | 30...36 | 48...58 |
| Максимальный выходной ток, А | 10 | 5 | 2,5 | 1,25 | 8,4 | 5 | 3,75 | 2,5 | 8,4 | 5 | 3,75 | 2,5 | 10 | 6,2 | 4,68 | 3,12 | 20 | 12,5 | 9,37 | 6,25 |
| Размах пульсаций на выходе, мВ | 100 | 120 | 150 | 200 | 120 | 240 | 240 | 300 | 120 | 240 | 240 | 300 | 120 | 240 | 240 | 300 | 120 | 240 | 240 | 300 |
| Максимальная ёмкость нагрузки, мкФ | 6000 | 4000 | 2500 | 1000 | 4000 | 2500 | 2000 | 1000 | 8000 | 5000 | 4000 | 2000 | 4000 | 2500 | 2000 | 1000 | 8000 | 5000 | 4000 | 2000 |
| Кoeffициент полезного действия при выходном напряжении, % | 300 В | 80 | 86 | 88 | 88 | 89 | 90 | 91 | 85 | 87 | 87 | 87 | 88 | 88 | 88 | 90 | 87 | 88 | 88 | 88 |
| | 800 В | 81 | 85 | 87 | 87 | 90 | 91 | 91 | 88 | 90 | 90 | 90 | 88 | 90 | 91 | 92 | 88 | 90 | 90 | 91 |
| | 1500 В | 76 | 81 | 84 | 84 | 84 | 86 | 87 | 85 | 86 | 86 | 86 | 85 | 86 | 87 | 88 | 86 | 86 | 87 | 87 |
| Напряжение изоляции «вход-выход», не менее, В | 4000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Диапазон рабочих температур, °С | -30...+80 | | | | | | | | | | -40...+80 | | | | | | | | | |
| Рабочая высота над уровнем моря, не более, м | 5000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Среднее время наработки на отказ по стандарту MIL-НВВК-217F, ч | 454 500 | | | | | 257 200 | | | | | 214 200 | | | | | 285 900 | | | | |
| Среднее время наработки на отказ по стандарту Telcordia TR/SR-332, ч | 1 439 700 | | | | | 1 596 300 | | | | | 1 391 800 | | | | | 1 924 700 | | | | |
| Габаритные размеры (ширина × высота × глубина), мм | 57×93,5×105 | | | | | 63×125,2×115 | | | | | 85,5×125,2×129,2 | | | | | 191×86×41 | | | | |

Внешние подключения (сетевое питание и нагрузка) осуществляются посредством клеммных панелей на торцах приборов. Так же, как и в случае с семейством DDRH, у источников питания RSDH предусмотрена возможность частичной регулировки выходного напряжения. Для этой цели используется встроенный подстроечный резистор, доступ к которому осуществляется через отверстие в верхней части кожуха. Но, в отличие от DDRH, здесь имеется только LED-индикация состояния выхода (DC-OK).

Каждая серия источников питания семейства RSDH содержит приборы на четыре номинала выходного напряжения – 12, 24, 32 и 48 В. Названия приборов включают значение максимальной мощности и величину номинального выходного напряжения. Структура наименования источников питания семейства RSDH на примере изделия RSDH-150-24 представлена на рис. 9.

Основные технические характеристики источников питания семейства RSDH представлены в табл. 2.

Источники питания семейства RSDH снабжены всеми необходимыми схемами защиты как по выходу (от короткого замыкания, перегрузки и перенапряжения), так и по входу (от переполусовки и падения входного напряжения ниже заданного уровня), а также от перегрева. Но, помимо этого, как и в случае с приборами семейства DDRH, при эксплуатации источников питания RSDH необходимо включать в первичную цепь питания внешний предохранитель. Рекомендуемый тип предохранителя тот же – DDRH-WJ30-4-H, а схема включения аналогична представленной на рис. 6.

Все приборы семейства RSDH рассчитаны на охлаждение естественной конвекцией воздуха. Гарантия производителя на все источники питания данного семейства составляет 3 года.

Что касается встроенных систем защиты, то их устройство и механизмы функционирования – одни и те же для обоих семейств. Работа защитных устройств практически всегда осуществляется по следующей схеме: при возникновении аварийной ситуации срабатывает соответствующий механизм защиты, и прибор переходит в один из защитных режимов, а после устранения проблемы, вызвавшей эту ситуацию, автоматически возвращается в нормальный рабочий режим. Защитных режимов всего три, это:

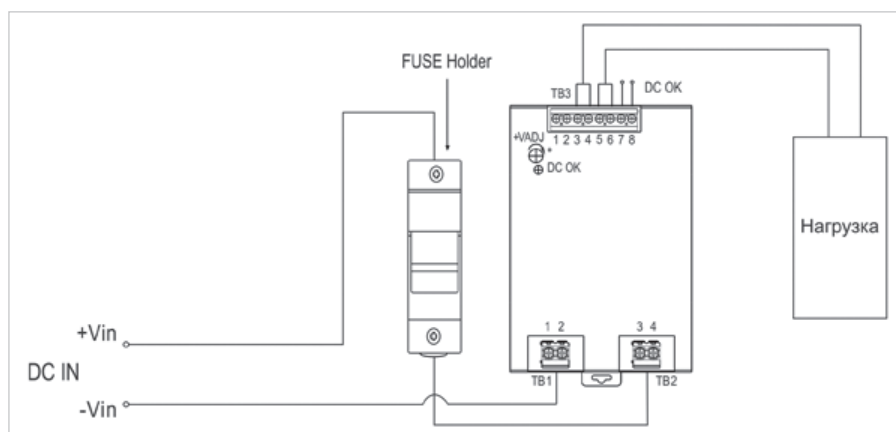


Рис. 6. Схема подключения внешнего предохранителя



Рис. 7. Внешний вид источников питания RSDH мощностью 150 Вт



Рис. 8. Внешний вид источников питания RSDH мощностью 300 Вт

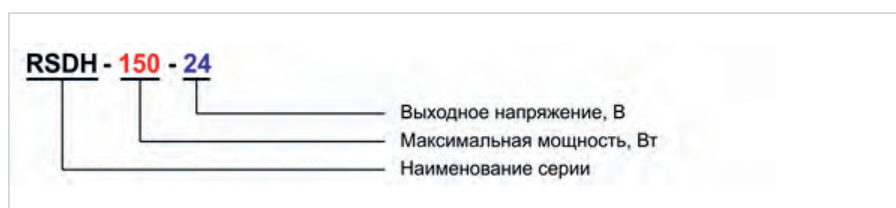


Рис. 9. Структура наименования источников питания семейства RSDH

- 1) «Shut down» – полное отключение устройства, перевод его в нерабочее состояние;
- 2) «Constant current limiting» – ограничение выходного тока, фиксация его на максимально допустимом уровне;
- 3) «Hiccup mode» – дословно «режим икания» (слово hiccup переводится с английского как «икать», «икота»), когда защитный механизм периодически, через определённые промежутки времени, запускает проверку (как бы «икает») с целью установить, не устранена ли проблема, вызвавшая аварийную ситуацию, и, в зависимости от результатов проверки, включает тот или иной режим (возврат в режим отключения «Shut down», переход в режим ограничения выходного тока «Constant current limiting» или переход в нормальный рабочий режим).

Применение того или иного защитного механизма зависит от типа нештатной ситуации.

- **Переполусовка по входу (Reverse Polarity).** Возникает при попытке подключить входные шины в обратной полярности. В этой ситуации, благодаря защитному диоду на входе, источник питания просто не включается, то есть остаётся в режиме «Shut down».
- **Падение входного напряжения ниже заданного уровня (Under Voltage Lockout).** Если входное напряжение опускается ниже определённого порогового уровня, источник отключается, то есть переходит в режим «Shut down», но после, когда напряжение на входе превысит заданный порог, снова включается и переходит в нормальный режим работы. Пороги отключения и включения не задаются точными величинами, они всегда имеют некоторый разброс в определённых диапазонах значений. Причём эти пороговые значения часто специфичны для

Таблица 3. Пороговые уровни входного напряжения для источников питания семейств DDRH и RSDH

| Серия источника питания | Порог отключения, В | Порог включения, В |
|-------------------------|---------------------|--------------------|
| DDRH-60 | 120...130 | 130...146,5 |
| DDRH-120, DDRH-240 | 200...230 | 230...245 |
| RSDH-150, RSDH-300 | 200...225 | 225...246,5 |

Таблица 4. Пороговые уровни срабатывания защиты от перенапряжения для источников питания семейств DDRH и RSDH

| Источник питания | Порог срабатывания защиты, В |
|--|------------------------------|
| DDRH-60-5 | 6,6...8,4 |
| DDRH-60-12, DDRH-120-12, DDRH-240-12, RSDH-150-12, RSDH-300-12 | 16,5...21 |
| DDRH-60-24 | 30...38 |
| DDRH-120-24, RSDH-150-24, RSDH-300-24 | 33...42 |
| DDRH-240-24 | 32...42 |
| DDRH-120-32, DDRH-240-32, RSDH-150-32, RSDH-300-32 | 40...48 |
| DDRH-60-48 | 55...60 |
| DDRH-120-48, DDRH-240-48, RSDH-150-48, RSDH-300-48 | 62...70 |

каждой серии приборов, иногда даже внутри одного и того же семейства. В табл. 3 представлены пороги включения и отключения для серий источников питания семейств DDRH и RSDH.

● **Перенапряжение (Over Voltage).** Срабатывание защиты от перенапряжения вызывается превышением выходным напряжением некой заданной верхней границы. Верхний порог срабатывания, как и в предыдущем случае, определяется диапазоном значений, зависящим в общем случае от серии источника питания и его номинального выходного напряжения. В табл. 4 представлены пороговые уровни срабатывания защиты от перенапряжения для источников питания семейств DDRH и RSDH.

После срабатывания защиты от перенапряжения все источники питания, кроме приборов серии DDRH-240, пере-

ходят в режим HiScup и затем автоматически возвращаются в рабочий режим после того, как напряжение опустится ниже порогового уровня. Что касается DDRH-240, источники питания этой серии в случае срабатывания защиты по перенапряжению отключаются и должны затем повторно включаться для восстановления рабочего режима. Очевидно, такое исключительное поведение связано с тем, что это единственная серия среди рассмотренных, источники питания которой могут включаться параллельно для работы на общую нагрузку.

● **Перегрузка (Overload) и короткое замыкание (Short Circuit).** Механизм защиты от перегрузки активизируется в тот момент, когда уровень выходной мощности достигает пороговой величины, которая определяется как 105...135% от максимального значения. При этом сразу включается режим ограничения выходного тока («Constant current limiting»), а выходное напряжение понижается. Снижение выходного напряжения в этом режиме может продолжаться лишь до определённого уровня, который определяется как 35% от номинала для источников питания серии DDRH-240 и 55% от номинала для приборов всех остальных серий. Если же выходное напряжение стремится опуститься ещё ниже, то включается режим HiScup. Возвращение в нормальный рабочий режим при уменьшении внешней нагрузки идёт в обратном направлении: сначала из режима HiScup в режим ограничения выходного тока, а затем – в рабочий режим. Короткое замыкание представляет собой предельный случай перегрузки, когда напряжение на выходе падает практически до нулевого значения. В этом случае сразу включается режим HiScup, а при устранении причины короткого замыкания автоматически осуществляется возврат в рабочий режим.

● **Перегрев (Over Temperature)** При перегреве автоматически включается режим HiScup, который так же автоматически выключается при возвращении температуры к номинальным значениям.

Все изделия, выпускаемые компанией MEAN WELL, в том числе и источники питания рассматриваемых здесь семейств, полностью соответствуют необходимому набору европейских

и международных сертификатов по электромагнитным излучениям, по электро- и пожарной безопасности. Наряду с превосходными техническими характеристиками это лишнее свидетельство, что продукция MEAN WELL найдёт применение в самых ответственных приложениях, где во главу угла поставлены критерии качества и надёжности. Одним из таких приложений является электротранспорт, где источники питания рассмотренных в данном обзоре семейств DDRH и RSDH наверняка будут востребованы. Судя по всему, компания MEAN WELL придерживается именно такого мнения. Об этом можно судить по тому, что в технической документации на источники питания DDRH и RSDH представлены сведения о вибростойкости этих изделий. Там приводятся данные о частоте и интенсивности вибраций, о том, в течение какого времени и вдоль каких пространственных осей проводились испытания, и т.д. Такие сведения почти никогда не встречаются в документации на стандартную продукцию MEAN WELL, и сам факт проведения подобных испытаний говорит о том, что источники питания DDRH и RSDH позиционируются в том числе и для использования в условиях повышенной вибрации.

Нет сомнений, что данные источники питания будут востребованы на российском рынке. Мало того что они обладают великолепными техническими и эксплуатационными характеристиками, их способность работать в сверхшироком диапазоне входных напряжений делает эти изделия просто уникальными в своём роде. Что касается производителя этой продукции – компании MEAN WELL, то в её репутации сомневаться не приходится. Это один из ведущих мировых производителей источников питания, и за более чем двадцатилетний период работы на российском рынке данная компания всегда проявляла себя как надёжный и ответственный поставщик продукции самого высокого качества. Не последнюю роль играют и цены. Производя продукцию мирового класса в строгом соответствии с требованиями международных стандартов, MEAN WELL тем не менее предлагает вполне разумные цены на свои изделия, в чём неоднократно имели возможность убедиться все российские потребители источников питания.





«СТА-ПРЕСС» МЕДИАПОРТАЛ

ТОВАРИЩ!
БИЗНЕС РОСТ ЗАМЕДЛИЛ?

РАНО ВПАДАТЬ В СТУПОР!

НУЖНО КРИЧАТЬ О СЕБЕ НЕМЕДЛЯ,

А МЫ

ОБЕСПЕЧИМ РУПОР!



Используй все возможности продвижения,
которые мы создали для тебя



Журналы

Два наших журнала уважают в отрасли. Ваши статьи и рекламу в них увидят все наши читатели



YouTube-канал

Наш канал предоставляет вам возможность интересно рассказать о себе



Сайты

Наши сайты – это ваши новости и статьи, оперативно доставленные по адресу



Конференции

На наших конференциях ПТА вы заведёте новые контакты и расскажете о себе специалистам



Дизайн-студия

Наши дизайнеры и верстальщики сделают для вас эффективную рекламу, баннер, ролик



СОВРЕМЕННАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА

+7 (917) 517-46-18 / advert@soel.ru / cta.ru / soel.ru

Приглашаем вас к сотрудничеству!

Системы питания MEAN WELL 3+N

Мощные, модульные, управляемые



Бесконечные возможности для построения систем питания

1. Решения для систем управления питанием CMU2
2. Системные решения
3. Решения для управления LED-освещением высокого напряжения постоянного тока
4. Интеллектуальные решения с DALI для управления LED-освещением
5. KNX-решение для управления зданиями
6. Решения для циркуляции энергии в системах электропрогона
7. Нестандартные решения