

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

1

2024

В номере:

**КАК ТАЙНОЕ
СТАНОВИТСЯ ЯВНЫМ:**
георадар смотрит
сквозь бетон

СТОП МАШИНА:
контроллер
сигнальных огней
на базе КР1564

БПЛА ИЗНУТРИ:
мультикоптеры —
от игрушки до оружия



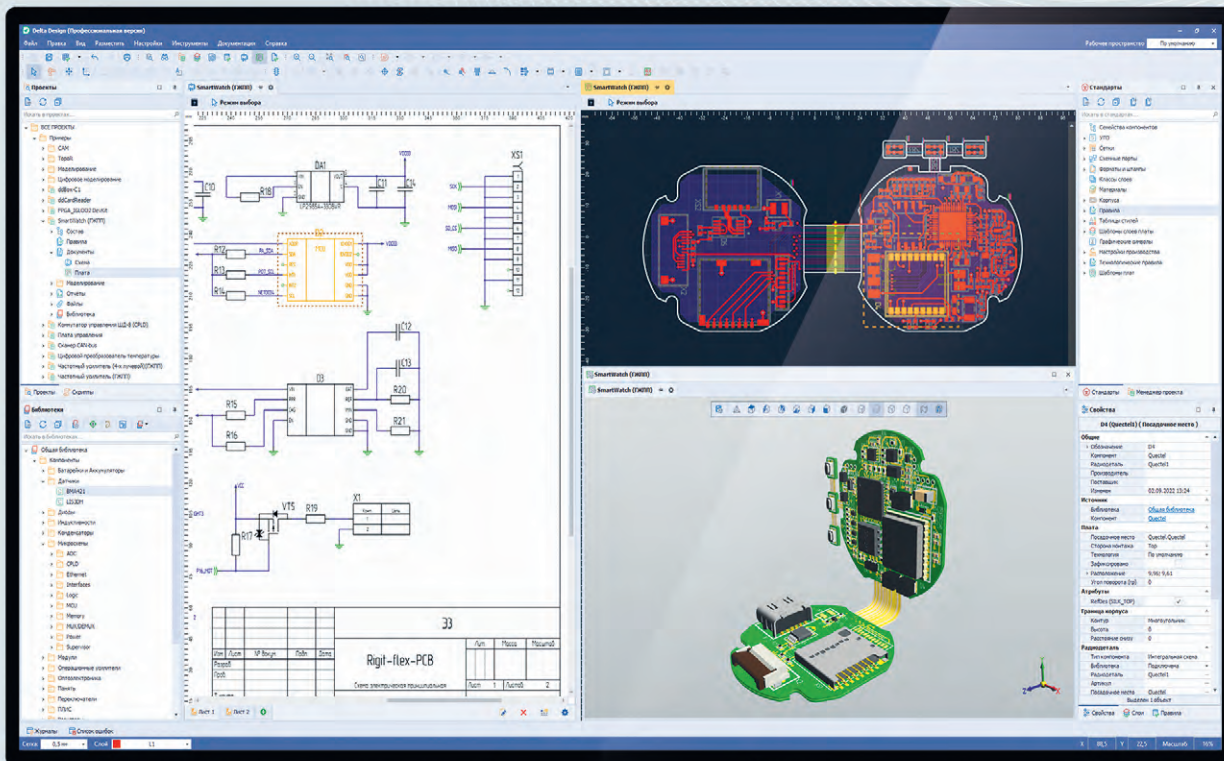
**СДЕЛАЛ ДЕЛО —
РАСТВОРЯЙСЯ СМЕЛО:**
**ДАТЧИКИ FTENG —
БУДУЩЕЕ МЕДИЦИНЫ**





DeltaDesign 3.7

Новая версия российской САПР электроники



Импорт проектов
из САПР Altium Designer



Расширены возможности
интеграции с PLM - системами



Обновлены редактор плат Right-PCB, топологический трассировщик TopoR,
механизм импорта/экспорта DXF и экспорта Gerber - файлов

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



2231
десятилетие
науки и технологий

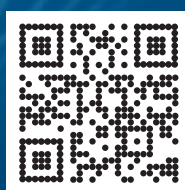
23–26 апреля 2024

СВЯЗЬ

36-я международная
выставка «Информационные
и коммуникационные технологии»

Экспозиция «Навитех» —
«Навигационные системы, технологии и услуги»

www.sviaz-expo.ru



Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»



12+
Реклама





Здравствуйтесь, уважаемые друзья!

Вот и подошёл к завершению этот год. Мы от души поздравляем вас с наступающим 2024-м! Пусть он принесёт вам семейное счастье, душевное спокойствие, крепкое здоровье, мир и процветание, ну и, конечно же, финансовое благополучие! Пусть в новом году все ваши начинания будут удачными, а ваши близкие и друзья только радуют вас!

Не забывайте и о вашей «Современной электронике». В новом году мы продолжим собирать самые интересные статьи и новости из мира высоких технологий и выкладывать все опубликованные материалы для вас на сайты журналов издательства.

Мы рады, что вы остаётесь с нами, читайте с удовольствием. 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, Р. Х. Хакимов
Вёрстка А. М. Бабийчук
Обложка Д. В. Юсим
Распространение А. Б. Хамидова (info@soel.ru)
Реклама И. Е. Савина (advert@soel.ru)

Учредитель и издатель ООО «СТА-ПРЕСС»
Генеральный директор К. В. Седов
Адрес учредителя и издателя:
117279, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 108,
пом/ком/эт 1/67/тех
Почтовый адрес: 117437, г. Москва,
Профсоюзная ул., 108
Тел.: (495) 232-00-87
info@soel.ru • www.soel.ru

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

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

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».
Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19,
бизнес-центр Вэлдан.
Тел./факс: (499) 903-69-52

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

© СТА-ПРЕСС, 2023

ЧИТАЙТЕ
ЖУРНАЛ

в ЭЛЕКТРОННОЙ ВЕРСИИ
на сайте soel.ru
и
в ПЕЧАТНОЙ ВЕРСИИ
по подписке

СОДЕРЖАНИЕ 9/2023

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

INNODISK	53
RIGOL	55
ММП_ИРБИС	4
МОРИОН	37
ОСТЕК-СМТ	4-я стр. обл.
ПЛАНАР	49
ПЛАТАН	4
СВЯЗЬ-2024	1
ЭЛЕКОНД	47
ЭРЕМЕКС	2-я стр. обл.
ЭРКОН	4, 5

Читайте в «СТА» № 1/2024:

ЭСТАФЕТА ДЛИНОЙ В 30 ЛЕТ:

Fastwel вчера, сегодня и завтра

НЕЙТРАЛЬНАЯ ТЕЛЕМЕТРИЯ:

передача данных по одному проводу

РЕКУПЕРАЦИЕЙ ПО ЭНЕРГОДЕФИЦИТУ:

электронные нагрузки возвращают
киловатты



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

РЫНОК

4 Новости российского рынка

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

6 Мультикоптеры: помощники или угроза?

Андрей Ласорла

16 Обзор технологии FTENG для создания энергонезависимых носимых медицинских датчиков и стимуляторов

Надежда Любимая

24 Мониторинг окружающей среды и защита РЭА от инфразвуковых колебаний

Вадим Экземплярский

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

32 Современные кварцевые и рубидиевые генераторы

Юрий Иванов

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

40 Контроллер стоп-сигнальных огней

Александр Одинец

48 Георадар: обзор решения для неразрушающего контроля бетона конструкций

Михаил Осипов, Константин Кравцов

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

54 Восстановление тактового сигнала и построение глазковых диаграмм на осциллографах Rigol серии MSO8000

Николай Лемешко, Михаил Горелкин

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

64 Современный способ изготовления двусторонних печатных плат с высоким разрешением своими силами. Часть 3

Алексей Кузьминов

Новости российского рынка

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

DC/DC-преобразователи «ММП-ИРБИС»

В рамках импортозамещения выпущены новые одноканальные стабилизирующие модули мощностью 1 Вт. Предназначены они для питания напряжением постоянного тока радиоэлектронной аппаратуры. Вид климатического исполнения – УХЛ категории 2.1 по ГОСТ 15150.



Конструктивно элементы выпускаются в пластмассовом корпусе, залитом компаундом. Масса модуля составляет не более 5 г. Типовой КПД равен 80%. Преобразователи имеют двукратный диапазон входного напряжения, а также низкие выходные пульсации и помехи. Электрическая прочность изоляции «вход-выход» – 1500 В постоянного напряжения. Есть защита от перегрузки и к. з. с автоматическим восстановлением. Модули могут работать в широком диапазоне рабочих температур от –40 до +80°C и имеют стойкость к воздействию механических и климатических факторов. Срок службы – 15 лет.

www.mmp-irbis.ru
+7 (495) 927-10-16

Электролитические конденсаторы для источников питания

Компания Zeasset Electronic Technology Co., Ltd основана в 2004 году и специализируется на разработке и производстве алюминиевых электролитических конденсаторов.

В фокусе развития компании находятся три основные линейки электролитических конденсаторов: Snap-In с защёлкивающимися выводами, Screw с винтовым креплением и суперконденсаторы EDLC.

Такие электролитические конденсаторы находят своё применение в таких от-

ветственных приложениях, как конвертеры и инвертеры, источники возобновляемой энергии, UPS, сварочные аппараты, частотные преобразователи, электромобили, промышленные источники питания и др.

В число технологических преимуществ производимых конденсаторов Zeasset относят:

- повышенный ток пульсаций на 30% по сравнению с аналогами конкурентов;
- увеличенный срок службы до 20 000 часов (85°C) и 10 000 часов (105°C);
- производство высокотемпературных конденсаторов до 125°C;
- модели с повышенным рабочим напряжением до 700 В.

Фабрика имеет большие производственные мощности с полностью автоматизированным циклом производства. 25% выпускаемой продукции экспортируется в страны Северной и Южной Америки, Западной Европы и Африки. В число клиентов Zeasset входят такие известные компании, как Chint, Toshiba, Miller, Panasonic, CRRC, BYD и др.

На складе компании ПЛАТАН представлены Snap-In и винтовые конденсаторы Zeasset.

+7 (495) 97-000-99
info@platan.ru
www.platan.ru

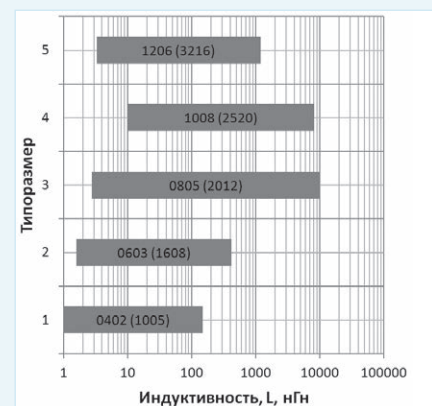
Высокочастотные и сверхвысокочастотные проволочные чип-индуктивности типов КИК, КИК1 и КИФ

АО «НПО «ЭРКОН» предлагает к применению широкий размерный ряд высокочастотных и сверхвысокочастотных проволочных чип-индуктивностей с горизонтальной обмоткой типов КИК и КИК1 с немагнитным керамическим сердечником и типа КИФ с магнитным ферритовым сердечником.

Проволочные чип-индуктивности имеют следующие достоинства:

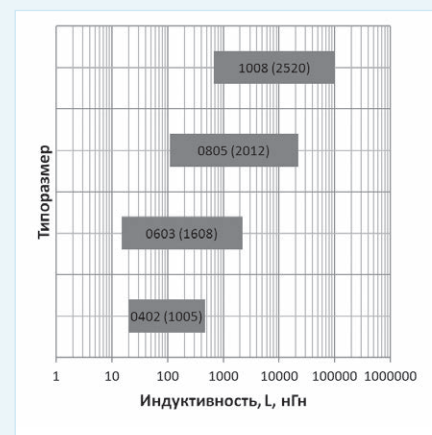
- низкое сопротивление постоянному току;
- высокое значение добротности;
- большое значение допустимого тока обмотки.

На рисунках показаны диапазоны номинальной индуктивности для чип-индуктивностей разных типоразмеров. Наиболее широким диапазоном обладают индуктивности типоразмера 0805.



Диапазоны номинальной индуктивности КИК (КИК1) разных типоразмеров

В стандартных миниатюрных типоразмерах от 0402 до 1206 достигаются значения с высокой добротностью. Благодаря этому они лучше аналогичных монолитных конструкций подходят для высокочастотных применений.



Диапазоны номинальной индуктивности КИФ разных типоразмеров

По вопросам приобретения представленных высокочастотных и сверхвысокочастотных проволочных чип-индуктивностей 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).

www.erkon-nn.ru

НОВОСТИ МИРА

Учёные Томского политеха предложили новую технологию создания гибкой электроники

Учёные ТПУ в составе международного научного коллектива разработали метод создания проводящих узоров на поверхностях разных пластичных полимеров гибкой электроники. По мнению авторов, эта технология позволит создавать композитные материалы на органической основе с добавлением восстановленного оксида графена для увеличения проводимости. Результаты представлены в научном журнале *Polymers*. Исследование выполнено в рамках проекта Российского научного фонда.

Гибкая электроника – это общий класс электронных устройств, которые можно сгибать и сворачивать. К ним относятся как простые проводники, так и электронные устройства и сенсоры, в том числе нательные сенсоры, рассказали специалисты Томского политехнического университета.

Применение элементов гибкой электроники перспективно не только для создания медицинских и спортивных устройств: не-

которые промышленные сенсоры, OLED-дисплеи, которые можно скручивать, наконец, электронная кожа с сенсорами давления и температуры для протезирования и робототехники – все эти изобретения включают в себя гибкую электронику, отметили учёные.

На сегодняшний день гибкая электроника не получила массового применения из-за сложностей изготовления механически устойчивых, но вместе с тем пластичных материалов. Несмотря на возможность применения печатных, растворных и фотолитографических методов, которые удешевили бы производство гибких электронных изделий, каждая полимерная подложка требует тщательной оптимизации технологии.

Учёные Томского политеха вместе с коллегами из Китая и Австрии разработали практически универсальную технологию обработки любых термопластичных полимеров для создания гибких электронных элементов. Поскольку для таких деталей ключевая характеристика – электропроводность, исследователи предложили способ повышения проводимости за счёт введения в полимеры частиц восстанов-

ленного оксида графена с помощью лазерного излучения.

Интересная возможность открывается с точки зрения термоформования, то есть изменения формы устройства уже после изготовления проводящего слоя. Учёные продемонстрировали это на примере проводящего браслета для умных часов. Таким образом, им удалось доказать состоятельность предлагаемого подхода, который состоит во введении лазером проводящих частиц на основе графена в полимерную структуру с её последующим термоформованием.

«Мы подобрали параметры лазера под каждый полимер и показали, что фазовые переходы и температуры деструкции полимеров определяют успешность подхода. Точный подбор характеристик излучения важен не только для сохранения целостности и консистенции материала-основы, но и для того, чтобы оксид графена перешёл в восстановленную форму. В случае успеха мы в строго заданном месте получаем материал для гибкой электроники, который не только проводит ток, но и имеет хорошую механическую стабильность», – отметили учёные.

habr.com



ЭРКОН

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ

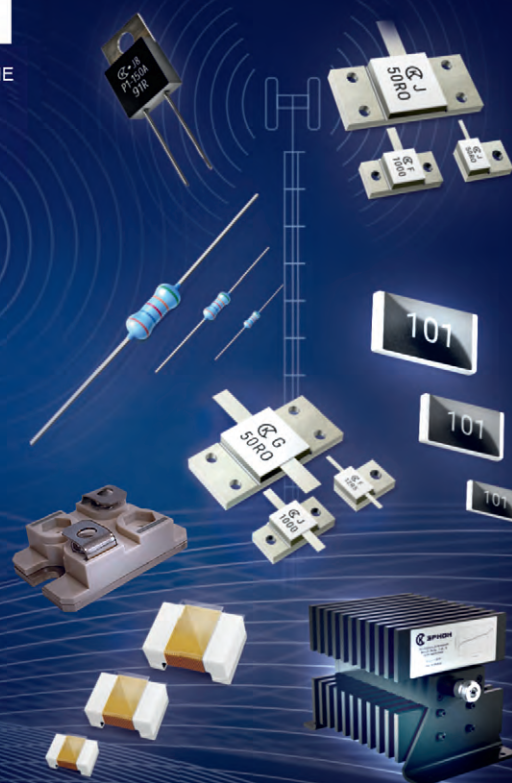
ПРОИЗВОДСТВО, РАЗРАБОТКА
И ПОСТАВКА ПОСТОЯННЫХ
РЕЗИСТОРОВ, АТТЕНУАТОРОВ
И ЧИП-ИНДУКТИВНОСТЕЙ

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

НОВИНКИ

Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (от 50 Вт-2000 Вт)
Аттенуаторы 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

Мультикоптеры: помощники или угроза?

Андрей Ласорла

Беспилотные воздушные суда (БВС), беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и беспилотные авиационные системы (БАС) как устройства современной электроники и микропроцессорной техники стали совершенной реальностью. Как инструмент, он может использоваться по-разному. Поэтому специальные разработки ведутся как в области совершенствования радиоэлектронной борьбы (РЭБ) против БПЛА малых форм, так и для защищённости БПЛА от воздействия средств РЭБ. История развития направления и совершенствования систем – предтечи современных мультикоптеров – полна интересных технических решений и экспериментов, узнать о которых подробнее предлагается в статье.

Особенности БПЛА малого форм-фактора

Развитие БПЛА привело к тому, что небольшие летательные аппараты производства КНР стали дорабатывать и использовать для разных целей, включая видеосъёмку без санкции, элементы частного и промышленного шпионажа и др. На высоте 50–300 метров такой аппарат затруднительно обнаружить визуально: он невидим и неслышен, его невозможно сбить «из рогатки». На рис. 1 представлена иллюстрация дистанционного управления мультикоптером; он находится над крышей дома, чуть ниже «белого облачка», однако его почти не видно без специальных приспособлений (монокля или бинокля).

Поэтому для защиты от такой «напасти» применяют средства РЭБ, простейшие из которых – электронные глушители, настроенные на определённую частоту. Управление любительских мультикоптеров в основном происходит на частоте 2,4...2,5 ГГц,

стоимость «любительского» мультикоптера с относительно качественной видеокамерой составит 7000–12 000 Р, она сопоставима со стоимостью носимого устройства глушения с ценой 15 000–20 000 Р [3]. Поэтому считается, что средства РЭБ для защиты от малых БПЛА являются эффективным инструментом противодействия. Конечно, называть БПЛА, будь он даже самый простой, квадрокоптером или дроном не вполне верно. Первое, поскольку давно уже не является типичной только 4-винтовая модель БПЛА, есть и 6-, и 8-, и 10-моторные устройства. Поэтому название «мультикоптер» более корректно. Второе, потому что «дрон» – не пилотируемый человеком летательный аппарат, схема управления которым не обязательно конфигурирует с использованием нескольких вертикально-ориентированных винтовых приводов (как у типичного вертолета), но может быть и типично «самолетной»: с одним или несколькими винтами, ориентированными в горизонтальной плоскости; отсюда «дрон» –

скорее сленг, чем профессиональный язык.

Более полувека прошло со времени тестовых испытаний первых мультикоптеров, за этот период появились новые достижения в области материаловедения с результатом в виде прочных и легких полимеров, существенно уменьшающих вес конструкции. Новые технологии в области современной электроники и микропроцессоров обеспечили базу для разработок стабильного управления винтокрылыми устройствами. Сегодня простым «любительским» мультикоптером может похвастаться любая семья, притом что цена его невелика, а «содержание» умещается в одной небольшой плате управления. Необходимо заметить, что ещё с 2016 года в России мультикоптеры массой более 250 г запрещены к эксплуатации без регистрации (лицензирования) в ФСБ [11]. Разнообразие конструкций БПЛА и их агрегатов предопределяет множество технических решений по автоматизации управления их движением, особенностям конструктивного выполнения и организации способов управления. Они отражены в патентных документах, принадлежащих организациям и частным лицам из ведущих промышленно развитых стран. Поскольку принцип действия и управления почти всех мультикоптеров одинаков, разница только в назначении, функционале, габаритах, массе и качестве оборудования (в том числе защиты от РЭБ), уместно рассмотреть их на примерах одного мультикоптера. На рис. 2 представлен внешний вид мультикоптера

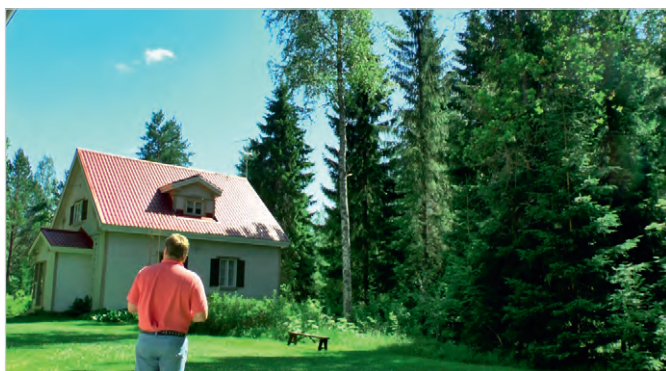


Рис. 1. Автор управляет мультикоптером над частной территорией



Рис. 2. Внешний вид мультикоптера «бытового» назначения модели Syta X8C

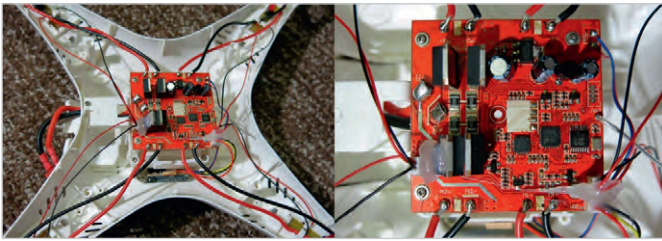


Рис. 3. Вид на плату управления мультикоптера Syma X8C

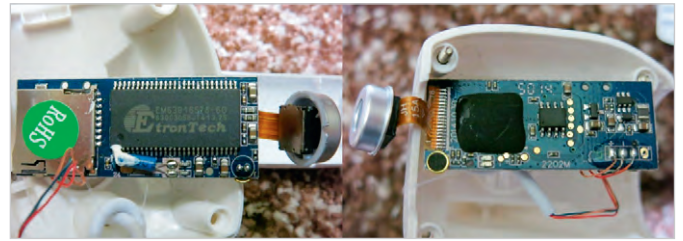


Рис. 4. Раскрытый блок видеокamеры мультикоптера

«бытового» назначения модели Syma X8C из авторского парка. На рис. 3 представлен вид на плату управления мультикоптера Syma X8C.

Как видно из этих рисунков, конструкция очень упрощена, состоит из одного модуля управления; стоимость её минимальна, а видеокamera, обеспечивающая условные 5 Мп качества картинки, реализована с помощью микроконтроллера EM63816S (рис. 4).

Элементы управления

Основа полётного контроллера БПЛА – программируемый микропроцессор (МП), отвечающий за обработку данных от датчиков и вычислительные операции. У МП есть основные характеристики: объём памяти и мощность. Чем слабее мощность процессора, тем меньше он может обработать данных, поступающих с датчиков. Маленький объём памяти ограничивает установку современных прошивок, которые с развитием направления «везят» всё больше. В табл. 1 представлены сведения относительно разных поколений процессоров, применяемых в БПЛА гражданского назначения.

Современные прошивки поддерживают процессоры F7 и выше, к примеру, относительно популярный специализированный контроллер Arducopter. Семейство МП, составляющих основную линейку современных контроллеров полета БПЛА, пополнилось 8051 AVR, PIC, ARM. Подробнее об этом сказано в [6], а разбор разницы и отличий процессоров от F1 до F7 (табл. 1) – в [10]. F7 – самый быстрый процессор (216 МГц против 168 МГц у F4) – имеет суперскалярный конвейер и возможности DSP, а это означает, что F7 является относительно хорошей платформой для разработки ПО, позволяет дополнительно оптимизировать алгоритмы контроллера полета. Платы F7 позволяют использовать больше UART со встроенной возможностью инверсии сигнала. Betaflight OSD, SmartAudio, SmartPort Telemetry, GPS, управление видеокamerой, DJI OSD, ведение жур-

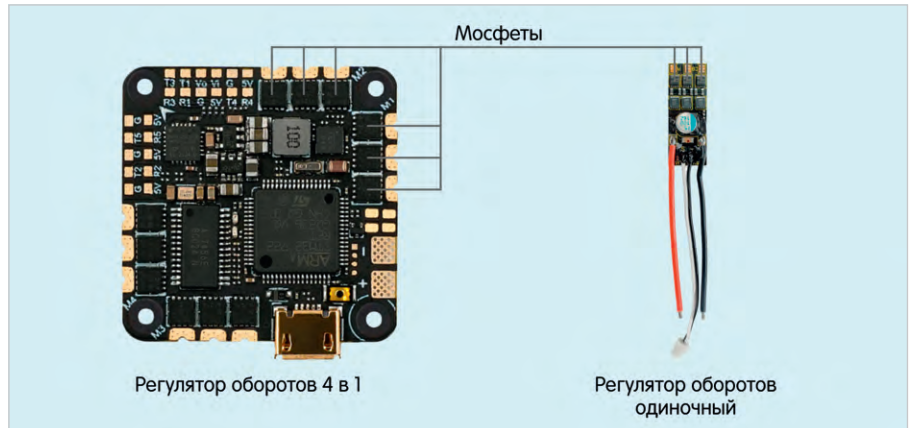


Рис. 5. Иллюстрация платы регулятора оборотов

Таблица 1. Сведения относительно разных поколений процессоров, применяемых в БПЛА гражданского назначения

Поколение процессора	F1	F3	F4	F7
Мощность	72 МГц	72 МГц	168 МГц	216 МГц
Объём памяти	128 Кбайт	256 Кбайт	1 Мбайт	1 Мбайт

нала Blackbox. Иллюстрация разницы условно проста: если по конфигурации необходимо работать с частотой 32 кГц в Betaflight, ранее нужно было специально разогнать процессор класса F4. А процессор F7 достаточно мощный, чтобы обрабатывать 32 кГц без разгона [10].

Основные функции полётного контроллера:

- сбор данных с датчиков;
- ориентация беспилотника вокруг его оси (центра массы);
- ориентация центра масс БПЛА в пространстве;
- движение БПЛА по маршруту;
- избежание противоречий управления и траектории движения в групповом полёте;
- управление полезной нагрузкой: камерой, захватами для груза и т.п.;
- обмен и оперативный анализ информации, в частности, приём команд с пульта, если управление осуществляется вручную;
- корректировка полёта в больших формациях;
- отправка управляющих сигналов на регуляторы оборотов (ESC – Electronic Speed Controller).

Время цикла опроса может быть ограничено типом гироскопа (IMU) и максимальной частотой дискретизации. Если MPU6000 имеет максимальную частоту дискретизации 8 кГц, а надо 32 кГц, придётся использовать IMU с более высокой максимальной частотой дискретизации, например, ICM-20602. Встречается конфигурация, когда в FC F7 установлено два разных гироскопа: маломощный гироскоп MPU6000, а другой – ICM-20602 – значительно более быстрый гироскоп, рассчитанный на работу с частотой 32 кГц. Такая конфигурация даёт дополнительное право выбора, какой гироскоп-датчик использовать под конкретные задачи. Для FPV дальность действия и её надёжность – это один из самых критичных параметров. Условно мощный модуль R9m от FrSky, работающий на частоте 868/915 МГц, обеспечивает условно хорошую дальность полёта. Альтернативный вариант – QCZEK LRS (LongRangeSystem) на модулях Lora 433 и 868/915 МГц. С проприетарными протоколами TX-RX (передатчик-приёмник), основными SBUS и CRSF с прошивками

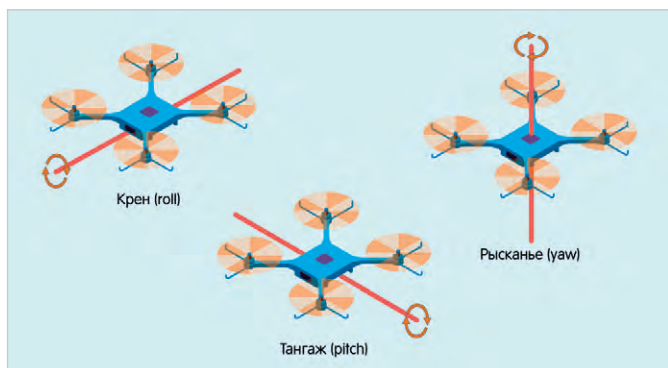


Рис. 6. Иллюстрация режимов «крен», «тангаж», «рыскание»

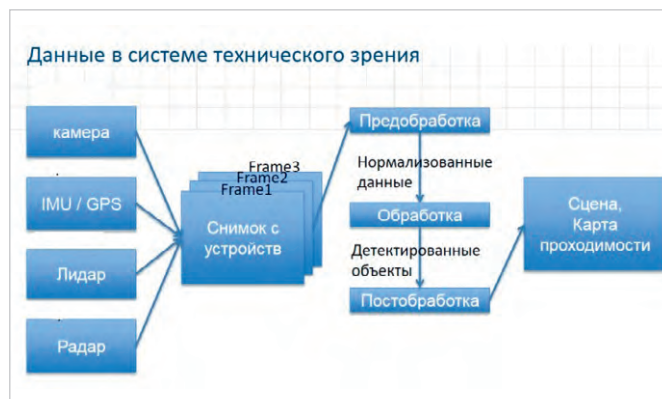


Рис. 7. Элементы системы технического зрения БПЛА



Рис. 8. Вид на электродвигатель и элементы привода мультикоптера

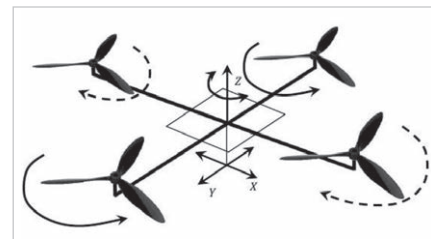


Рис. 9. Иллюстрация компенсации крутящего момента в современных мультикоптерах по четырёхмоторной схеме

Betaflight и iNAV контроллер управляет скоростью вращения электродвигателей, формируя ШИМ-импульсы на регуляторы оборотов через мощные транзисторы MOSFET. Скорость вращения электродвигателей определяется длительностью ШИМ-импульсов, передаваемых с контроллера. Это иллюстрирует рис. 5.

Направление и ход полёта мультикоптера определяются командами с ПДУ (если не запрограммировано иное, к примеру, автономный режим) с передачей энергии вращением винтов по плоскостям: «крен», «тангаж», «рыскание» (англ. – throttle, roll, pitch, yaw). На рис. 6 представлена иллюстрация этих режимов.

Система навигации и ориентации обеспечивает определение положения БПЛА на местности. Система «технического зрения» формирует картину окружающей обстановки, обеспечивает распознавание других БПЛА и возможных препятствий на маршруте. Кроме непосредственного управления БПЛА по радиоканалу в ручном режиме автономная информационная система является основой для управления маршрутизацией через экстренные шаблонные (заложенные в электронной памяти) решения в зависимости от окружающей обстановки с формированием управляющих сигналов на

исполнительные приводы. Эту схему иллюстрирует рис. 7.

В зависимости от конструкции шасси БПЛА, система исполнительных приводов обеспечивает работу приводов в соответствии с управляющими сигналами; с помощью электронных ключей на транзисторах MOSFET формируются команды на электродвигатели, передающие вращение винтам. В рассматриваемом примере это «детские» коллекторные электродвигатели типа OT-FK-132PH-3735 (рис. 8).

Литиевый аккумулятор имеет маркировку «7.4V 1800 mAh», хотя в некоторых моделях аналогичного класса попадают аккумуляторы с ёмкостью и 2300 мА·ч того же форм-фактора. Электродвигатели имеют разъём, заменить повреждённый мотор на новый можно без помощи паяльника. Винты приводятся в движение через пластиковую шестерню, притом на оси нет привычного подшипника. Размер «электромотора» почти в 2 раза больше по сравнению с коллекторным аналогом моделей Wltoys V262\V666\Tarantula X6 и др. Вес одного электродвигателя – всего 32 г.

Из истории современных мультикоптеров

Первые современные мультикоптеры в привычном теперь виде с 4 вин-

тами появились в 2006 году в компании MikroKopter (ФРГ). Каждый БПЛА оснащён несколькими электродвигателями, работа приводов контролируется микропроцессорной системой и несколькими (минимум тремя) гироскопами, обеспечивающими стабильное положение аппарата в воздухе. Чтобы исключить бесконтрольный поворот-отклонение аппарата в воздухе в 4-моторной схеме, два винта вращаются по часовой стрелке, а другие – против: так компенсируется крутящий момент. Иллюстрация представлена на рис. 9.

Полёт современного мультикоптера управляется по радиоканалу, но может проходить в автономном режиме по заранее запрограммированному маршруту. Бортовой микроконтроллер, 3 гироскопа, барометр и акселерометр, система стабилизации полета, а с 2008 года GPS-модуль для фиксации «позиции» – таковы были даже первые функциональные особенности. Причём развитие направления шло типичным путем: от профессиональных моделей с высокой стоимостью до относительно дешёвых клонов для детских забав. Так, «первая ласточка» с радиоуправлением от MikroKopter дала импульс для разработок БПЛА гражданского назначения в разных ценовых категориях и другими компаниями. Условные вехи

развития мультикоптеров в последующие годы определялись разработкой микроконтроллеров и ПО, адаптированного к разным устройствам: от бюджетных игрушек до профессиональных платформ для видеосъёмки, спасательных, полицейских, природоохранных и других операций, в том числе для журналистских задач. Таким образом, развитие микропроцессорной техники определило развитие производства БПЛА, а не наоборот. Gaui, DJI, XAircraft и другие производители использовали свои возможности и производственную базу для полного и условно независимого от конкурентов цикла: с собственной линейкой МП и ПО к ним. По другому пути пошли компании MultiWii, KaptainKuk, ArduCopter (и др.), ориентирующиеся на разработки МП на открытой платформе «электронного конструктора» Arduino, что несомненно разнообразило конфигурационные возможности выпускаемого оборудования, но этот путь менее оригинален и защищён.

В российском производстве, которое долго запускалось, но всё же разродилось собственными разработками на основе модулей из КНР и платформы Arduino, первые профессиональные аппараты несколько запоздали, но тем не менее они есть. О бытовых или «детских» мультикоптерах, рынок которых расширился многообразно и бесконтрольно, свидетельствовать бессмысленно как о жалкой реплике действительно стоящих БПЛА. Всё это было актуально до введения ограничений на использование в гражданских целях мультикоптеров определённых характеристик, что случилось на рубеже 2012–2016 гг. В настоящее время в РФ запрещено без соответствующей лицензии применение мультикоптеров с высотой полета более 250 м и весом более 250 г. Что касается профессиональных моделей, уместно рассмотреть БПЛА Delta Drone H1600H (рис. 10) стоимостью с комплексом управления чуть более 1 млн рублей, обеспечивающий мониторинг с покрытием расстояния до 100 км в течение 5 часов непрерывного полёта.

Мультироторный БПЛА гибридного типа H1600-H производства отечественной компании R7 Technology, называемый также гексакоптером с гибридной энергоустановкой, сочетает в себе мощную энергоустановку – бензиновый двухтактный мотор с электрогенератором, гарантирующий высокую производительность. Фюзеляж лета-



Рис. 10. БПЛА Delta Drone H1600H образца 2018 года

тельного аппарата выполнен из композитных материалов, обеспечивающих одновременно высокую прочность и малый вес. При небольшом собственном весе он может нести полезную нагрузку до 7 кг, не считая ёмкости бензинового бака в 10 литров. Это одно из первых сделанных в России условно мощных устройств с привлекательными для пользователя характеристиками, претендующих на профессиональный уровень. АКБ БПЛА состоит из литий-полимерных элементов. Полностью заряженная АКБ имеет напряжение 25,2 В. В комплект поставки оборудования входит зарядная станция. При габаритах устройства 1,6×1,6×0,68 м 6 электродвигателей обеспечивают взлёт и посадку в вертикальной плоскости, радиус действия (уверенного управления) и стабильной передачи видео с масштабированием на расстоянии до 13 км. Рабочая высота полёта – до 2500 м. Время развёртывания комплекса до полной готовности управления – 12–15 мин. Условия уверенной эксплуатации допускали работу при воздействии температуры окружающего воздуха в диапазоне –20...+40°C, боковом ветре до 8 м/с и в условиях умеренных осадков – дождя и снегопада. При заявленном ресурсе БПЛА в 50 полетов не повернётся язык назвать его «одноразовым». Это одна из моделей пятилетней давности. Сегодня рынок мультикоптеров значительно разнообразнее.

Современный БПЛА с фактором мультикоптера характеризуется следующими параметрами.

- Навигационные огни.
- Два 3-осевых магнетометра.
- Цифровая система телеметрии.
- Система самодиагностики и инерциальной коррекции.
- Система автовозврата при потере связи.
- Навигационная система CPS/ГЛО-НАСС/BEIDOU/GALILEO.

- FPV (видеопередатчик, курсовая видеокамера, 720×576 дисплей).
- НСУ (наземная станция управления) на базе планшета с предустановленным ПО для управления, планирования полётного задания и контроля за системами БПЛА, ПДУ и даже голосовой информатор.
- Зарядное устройство со встроенным балансиром, позволяющее производить зарядку и разрядку, балансировку и мониторинг напряжения на каждом элементе отдельно.
- Рабочий ресурс комплекса 3 года.
- Ресурс АКБ – 250 циклов заряд/разряд.

Современные тенденции

А пока в СМИ активно обсуждают темы создания современных отечественных беспилотников с крейсерской скоростью 195 км/ч, высотным потолком 3000 метров и расстоянием покрытия до 600 км. Модель, получившая название по первым буквам: «транспортная авиационная многофункциональная платформа» (ТрАМП) – имеет специальное оборудование для наблюдения с хорошей оптикой и масштабируемым функционалом съёмки с подвеской для ударной нагрузки, которой может быть что угодно, по весу, не превышающему 250 килограммов. Эти сведения приведены в [1]. По техническим параметрам описываемая модель превосходит рассмотренный выше БПЛА Delta Drone H1600H по весу возможной транспортной нагрузки. Однако до появления сведений о корректных испытаниях новой модели я бы воздержался от суждений на сей счёт в связи с российскими традициями заявлять наперёд о том, что должно сначала быть апробировано, испытано, а затем только войти в серию. Из пресс-релизов 2023 года также следует, что в России создаётся новая система государственного опознавания «свой-чужой» для малых БПЛА. К слову, для



Рис. 11. Первый мультикоптер Этьена Эмишена

больших, как ТрАМП, эта система уже внедрена в конструкцию на стадии разработки. Разработчики РЭА в области систем для БПЛА также заняты совершенствованием системы опознавания «свой-чужой», давно, с 1943 года, применяемой для самолетов, но пока не внедрённой повсеместно для мультикоптеров, чтобы «свои не перебили своих». В СССР такая система оправдывала себя, а на практике было так: при заступлении на суточное боевое дежурство на командные пункты ПВО присылали новые коды для идентификации «своих» самолетов и определения чужих посредством функции «запрос-ответ» [2]. В журнале «Современная электроника» № 1 за 2023 г. на с. 51 сообщается о том, что Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) на своём ближайшем заседании намерена рассмотреть вопрос о выделении новых частот для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [9]. Пока, в «переходный период», беспилотники используют радиочастоты в отсутствие нормативной базы. ГКРЧ определяет радиоэлектронные средства (РЭС), обеспечивающие функционирование БПЛА и БАС, как относящиеся к воздушной подвижной службе. Для упорядочения нормативной базы в правовом поле применения БПЛА предполагаются следующие полосы радиочастот: 118...137 МГц, 390...399,9 МГц, 860...876 МГц, 902...915 МГц и 921...925 МГц – для организации командной линии (управление, контроль и обмен сообщениями). Для организации каналов передачи полезной нагрузки в БАС планируется выделить полосы частот 1427...1535 МГц, 2214...2226 МГц,

2328...2340 МГц, 2400...2500 МГц и 2580...2592 МГц. Использование полос радиочастот 1710...1785 МГц и 1805...1880 МГц оправдано для установленных на БПЛА в рамках действующих решений ГКРЧ об использовании полос радиочастот для применения РЭС стандарта LTE (4-е поколение сотовой связи). Полосы радиочастот 960...1200 МГц предназначены для организации командной линии управления БПЛА, и полосы радиочастот 5...5,2 ГГц и 5,85...6,425 ГГц – для организации канала передачи полезной нагрузки в БПЛА (разновидность канала управления) для бортовых систем передачи изображения, цифровой информации с установленных датчиков и управления грузовым отсеком. Как отмечается в материалах ГКРЧ, в настоящее время на учёте Росавиации состоит свыше 60 тыс. БПЛА. В конце 2021 г. ГКРЧ выделила частоты для организации связи с беспилотными воздушными судами, но только одну полосу – 5,85...6,425 ГГц – и только для одного применения: проведения воздушного наблюдения и патрулирования при обеспечении контроля состояния удалённых (труднодоступных) промышленных объектов (нефте- и газопроводов, линий электропередач и др.). Предложения по выделению частот коррелируют с рекомендациями ЕСС (Electronic Communication Committee, Комитет по электронным коммуникациям) по минимальной ширине радиочастотных каналов, выделяемых для линий связи и управления БПЛА, а также для каналов передачи полезной информации с БПЛА на землю. Согласно отчёту ЕСС, для БПЛА предполагается выделение двух

радиочастотных полос, причём как из разных диапазонов радиочастот, так и из одного и того же диапазона: одна для радиочастотного канала управления БПЛА (скорость передачи данных в канале 0,3...1 Мбит/с, примерная рабочая ширина полосы 0,3...3 МГц) и вторая – для передачи полезной информации (скорость передачи данных в канале 5 Мбит/с, ширина полосы 5...10 МГц). Что касается РЭС, отнесённых на БВС, к воздушной подвижной службе, то такой подход согласован с Минобороны и Росавиацией. Соответственно, все предложенные диапазоны радиочастот будут выделены подвижной службе на первичной основе [9].

Из истории создания прототипов мультикоптеров

Если сделать экскурс в историю, то, может быть, первыми БПЛА были горшки с нечистотами, которые с помощью «метательных машин» летели в сторону осаждённого города, а также стенобитные «снаряды» в виде камней и ядер в «допороховую эпоху», которым сообщали энергию движения (полёта) всё те же метательные «машины» с высокой деревянной фермой и системой натяжных канатов-тросов. Они известны в истории ещё из эпохи шумеров. Эти штурмовые орудия применяли и в России во времена царя Ивана Васильевича, и даже ранее. Затем прототип военного беспилотника изобрели в 1849 году в виде воздушных шаров с автоматически сбрасываемыми фугасами для бомбардировки Венеции. Их применяли в австрийской армии того славного времени принца Евгения, когда маршал Йозеф Радецкий в 84-летнем возрасте побеждал в Италии. Причём побеждал он славно. В битве при Кустоцце он противостоял итальянскому королю, но силы и средства, в частности личный состав, закончились, и маршал в потёмках отступил. Когда же утром ему доложили, что итальянцы тоже покинули город, Радецкий проявил поистине дар полководца и быстренько занял опустевшую местность, приписав победу себе. Затем история БПЛА продолжилась на заре вертолётостроения в 1920-х годах.

Параллельно развивалась технология создания БПЛА, управляемых дистанционно или в автономном режиме. Первым в мелкосерийное производство поступил немецкий беспилотный бомбардировщик Fliegermaus, способ-

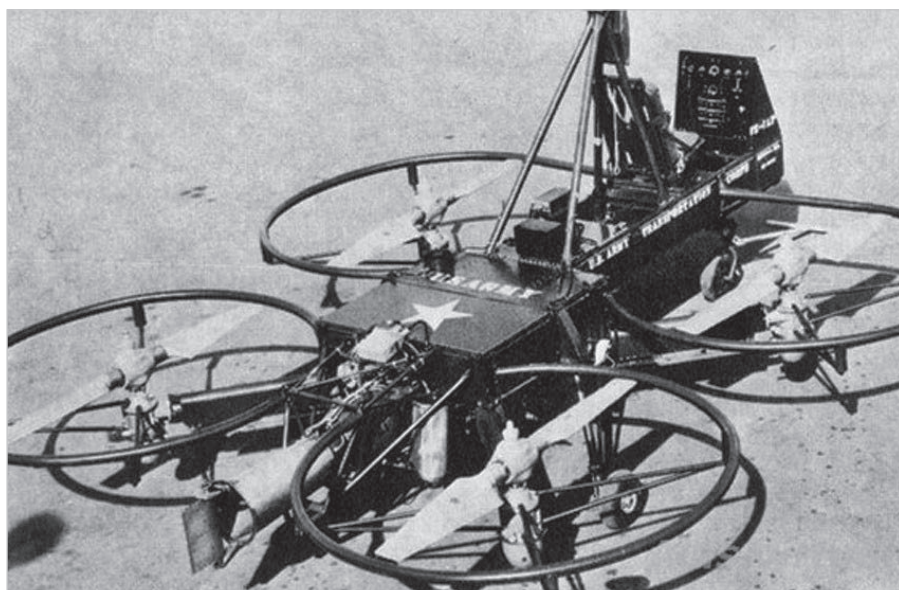


Рис. 12. Внешний вид аппарата VZ-7 американского производства, 1958 год

ный нести бомбовую нагрузку и управляемый по радио. Ещё один пример – созданный в 1917 году «Автоматический аэроплан Хьюитта-Сперри» с двумя гироскопами для автономного полёта по заданному курсу. Американский конструктор русского происхождения Георгий Ботезат и французский инженер Этьен Эмишен параллельно занимались разработками пилотируемых аппаратов с форм-фактором современных мультикоптеров, когда винты, разнесённые на 4 стороны относительно центра конструкции с помощью балок, посредством системы ремённой и цепной трансмиссий приводились в действие от одного двигателя. Отсюда пошло название «квадрокоптеры». Первые прототипы разработаны в начале прошлого столетия. На рис. 11 представлен мультикоптер Этьена Эмишена.

Если считать достижением того периода, что на испытательном полигоне «вертолёты» поднялись на высоту до 15 м и даже пролетели определённое расстояние (модель Эмишена преодолела 1100 м), дальше тестовых испытаний дело не продвинулось из-за тяжёлой и ненадёжной трансмиссии, передающей крутящий момент с одного двигателя на 4 ротора. Для поперечного и курсового управления модель Эмишена использовала 8 винтов, а аппарат Ботезата мог двигаться только с попутным ветром. Без системы стабилизации и качественного управления аппараты обоих мастеров были неустойчивы в полете даже на такой «детской» высоте [5]. Изобретение «автомата контроля пере-

коса» и рулевого винта способствовало вертолётостроению по соосной схеме, ставшей на многие годы классическим решением вертикального взлёта, и 4-винтовую схему на 30 лет забыли. Относительно удачный квадрокоптер изобрел Георгий Ботезат в 1956 году. Этот аппарат управлялся с помощью несущих винтов. VZ-7 компании Curtiss-Wright в 1964 году проходил лётные испытания в армии США, показал хорошую стабильность и управляемость, но по заключению военной комиссии на вооружение не принят из-за несовершенных эксплуатационных характеристик. Внешний вид аппарата VZ-7, по форм-фактору напоминающий мультикоптер, представлен на рис. 12.

Самолёты-снаряды, являвшиеся прототипом крылатых ракет, были известны в ВОВ и в 1950-х годах, когда беспилотники запускали со специальных установок «Стрела» и «Сопка», стоявших на вооружении в советской армии. Таков был ракетный комплекс проекта 67 с пусковой установкой Б-163 и ракетой С-2, имевшей обтекаемый цилиндрический фюзеляж с лобовым воздухозаборником, на верхней поверхности которого располагался кожух головки самонаведения. В этом может убедиться любой, посетив военные музеи, к примеру, комплекс сооружений форта «Красная горка» по дороге к атомграду Сосновый Бор. Подробнее об этом в [8]. Их боевое применение автору неизвестно, скорее это памятник соревнованию противоборствующих держав. Однако и такие разработки отечественного военпрома



Рис. 13. Внешний вид «Сerp-BC» – системы подавления радиочастот управления БПЛА

способствовали развитию технической мысли по совершенствованию БПЛА. Переоборудованные из типичных моделей беспилотники-разведчики и бомбардировщики были и в странах НАТО. С первых разработок привычной нам схемы мультикоптеров уделяли внимание системе стабилизированной подвески для фиксации и закрепления оборудования и груза. В современных моделях можно говорить о высокой стабилизации подвески с компенсацией колебаний и разворотов БПЛА по осям. Теперь поговорим о проблемных вопросах современных технологий.

Методы защиты от проникновения БПЛА

Система «Сerp-BC» позволяет воздействовать как на сигналы глобальных навигационных спутниковых систем – GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou, так и на сигналы управления БПЛА в диапазонах 2,4 и 5,6 ГГц, используемых в сетях Wi-Fi [7]. На рис. 13 представлен внешний вид системы «Сerp-BC».

Разумеется, таких реализованных разработок несколько, а устройство «Сerp-BC» рассмотрим как относительно безопасный пример (чтобы не рассматривать реальные и засекреченные устройства, применяемые в РЭБ сегодня). По заявлению разработчиков устройства, оно может подавлять БПЛА на 360° по горизонтальной оси. По вертикали устройство воздействует на БПЛА-нарушитель в секторе от 10° до 80°. Также предусмотрена возможность управляемого секторального подавления. Режимы работы в каждом из 4 азимутальных секторов задаются независимо друг от друга. Потребляемая мощность устройства не более 150 Вт, а дальность действия – до 3 км. Связь с собственным пунктом управления осуществляется по сети

Ethernet посредством оптоволоконного канала. Таким образом, понятно, что устройство «Серп-ВС» предназначено для борьбы с несанкционированным нарушением воздушного пространства со стороны БПЛА на расстоянии до 3 км. Однако это крайне малый радиус покрытия, в то время как необходимо как минимум в 2 раза больший. Далее разработчики заявляют, что «Серп-ВС» способен подавить канал управления беспилотником, разорвать связь с оператором, вывести из строя навигационное оборудование, дезориентировать дрон в пространстве и сорвать выполнение полётного задания. Система нейтрализует сигналы GPS, ГЛОНАСС, Weidou (в диапазонах L1, L2, L5), а также разрывает управление дронами по Wi-Fi». Ну, это совсем уже «детский лепет», и далее давайте рассмотрим, почему.

Методы повышения «выживаемости» БПЛА в условиях активной РЭБ

Методы борьбы с БПЛА, как заявлено разработчиками «Серп-ВС», касаются выведения из строя навигационного оборудования с целью нарушить ориентацию БПЛА в пространстве. А преодолевается это следующим образом (говоря упрощённо): «ошибка» по электронной инерционной системе накапливается быстро, но достаточно обеспечить тот же маршрут – удержание на цели с точки потери сигнала GPS с запасом по времени – до возобновления связи со спутником. Таким образом, «защищённый» БПЛА должен уметь лететь по выбранной траектории самостоятельно некоторое время в зоне действия средств РЭБ, как простейший вариант с прокладкой маршрута по ПО «Adupilot Mission Planer».

Рассмотрим пример заранее запрограммированного маршрута БПЛА «лететь на высоте 300 м, 2 км вперед, потом 1,5 км вправо, потом снижаться до окончательного завершения программы или – вариант – вернуться в точку старта». Для этого нужна только качественная инерционная система автономной навигации (работающая временно без связи со спутником). Вариативно возможно использовать ФАР из патч-антенн. Вообще, разработка новой системы инерциальной навигации может принести огромные дивиденды. Убеждён, что над этим уже трудятся специалисты отрасли. Ещё одним вариантом противодействия

системам защиты является полностью автономный режим полета БПЛА, включающийся по команде оператора или автономно за несколько километров до объекта воздействия. В таком случае – при полном отключении электронного и навигационного оборудования в условиях «последней мили» – БПЛА представляет собой просто снаряд без «электроники», летящий без манёвров и корректировок высоты, подобно обычному снаряду, следовательно, не подверженный влиянию устройств глушения. Если обеспечить полёт мультикоптера в автоматическом режиме, по азимуту и «по ветру», то потери в точности местоположения будут значительными. Ветер может сносить и крупные пилотируемые самолеты, управляемые по ILS; опытные летчики гражданской авиации и ВВС подтвердят, что при означенных рискованных факторах по согласованию с оператором на земле самолёты нередко уходят перед посадкой в условиях сильного бокового ветра на второй круг. То же касается влияния рассматриваемых особенностей на БПЛА.

Сегодня для повышения выживаемости БПЛА, в частности, изучаются вопросы установки радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), чтобы возможное устройство глушения в охраняемом периметре радиоканала не влияло на курс и задачи БПЛА. Однако это уже профессиональный уровень и компетенция разработчика, элементная база военпрома, недоступная для сборки устройства «на коленке». Достаточно мощная система с ИИ на борту в сочетании с видеокамерами и многоканальным GPS), хотя и будет сопоставима с ценой качественного лазерного гироскопа, для инерциального наведения всё же обеспечит БПЛА улучшенную защиту. Довольно спорной является идея ориентировать БПЛА на запеленгованный сигнал устройства глушения. Несмотря на то что это можно сделать при мощности передатчика 150 Вт на частоте L1, для этой частоты ширина полуволновой рамки примерно 9 см, и пеленгующую антенну вполне можно разместить на «дешёвом» БПЛА. Вопрос этот требует дополнительных исследований: будет ли эффективным в соответствии со стратегическими задачами попадание БПЛА в устройство глушения, расположенное не в центре, а по периметру «охраняемого» объекта?

Ещё один вариант достижения мультикоптерами цели может быть таким. Не один, а два «аппарата» используют на высоте 2–3 км; при подлёте к объекту один БПЛА остаётся на своей траектории и в полётном «эшелоне», а другой снижается и принимает команды от первого, как ретранслируемые от основного пункта управления или локальные, непосредственно от находящегося на высоте БПЛА. Разумеется, в подобной связке может быть не два мультикоптера, а 22... И этот вариант – одна из причин вновь задуматься о безопасности объекта методами РЭБ, совершенствуя их.

Варианты повышения надёжности средств РЭБ

Рассматриваемое устройство и подобные ему рассчитаны на условно простое неглубокое прикрытие от несанкционированного проникновения незащищённых (в части РЭБ) БПЛА. Система, таким образом, рассчитана на мультикоптеры гражданского назначения и «бытовые» варианты, адаптированные для иных задач. Однако навигационное оборудование, установленное на небольших БПЛА, – 6-канальный акселерометр, магнитный компас и баровысотометр являются простейшими элементами, повлиять на них с помощью глушения радиочастоты нельзя. В целях повышения надёжности защиты территории и воздушного пространства вблизи охраняемого объекта уместно рассматривать ту же систему как элемент защиты, то есть необходима установка их (в том числе однотипных) по периметру и радиусу 15–20 км. Такая защита была бы более надёжной. Но этот путь хоть и возможен, однако значительно удорожает весь комплекс защитных мероприятий, организуемых с помощью «Серп-ВС» и аналогичных по техническим характеристикам устройств. А пока система представляется полумерой, то есть способна, несомненно, защитить воздушное пространство и территорию от «любительских» мультикоптеров, к примеру, с платой управления, представленной на рис. 3 (в начале статьи), но она бесполезна против профессиональных БПЛА, оснащённых многоуровневой защитой. Как полумера и паллиатив эта система лучше, чем ничего, однако надо иметь в виду все рассматриваемые факторы и условия её эффективности и понимать, что она не только не панацея от несанкционированного

рованного проникновения БПЛА, но и может быть банальным имитатором освоения отпущенных больших материальных средств под вполне конкретные ТУ защиты объекта для заинтересованных лиц. Другим вариантом защиты от БПЛА может являться установка систем глушения воздушного, а не только наземного базирования, к примеру, на высоких мачтах, установленных за несколько км от объекта и по периметру. Таким образом защищённость объекта повышается.

Устройство глушения радиочастот передатчиком условно большой мощности – 150 Вт – работает по принципу вторичного сигнала на известной частоте и создания электромагнитных помех. Расчёт на то, что подобные помехи затруднят связь БПЛА по спутниковому каналу для контроля собственного местоположения летящего устройства. Сигнал будет принят с опозданием на несколько секунд – это уже значительно снизит точность и результативность применения БПЛА. Трёхсекундное запаздывание в приёме сигнала может иметь последствия смещения БПЛА на километры. Разумеется, в БПЛА определённого назначения будут встроены системы не только дублирования отслеживания координат, но и «автопилот», держащий заданный курс в расчёте на то, что связь со спутниками временно недоступна. В этой связи противодействуют две концепции «нападения» и «защиты» оборудования, идёт непрекращающееся соревнование специалистов-разработчиков по купированию методов противодействия противной стороны. Учитывается и то, что профессиональные БПЛА с условно военным назначением имеют установленную защиту от глушения радиочастот, в которой задействованы несколько резервных каналов связи. Передаваемый со спутника навигационный сигнал GPS содержит 3 модулированные несущие частоты: L1 с центральной частотой 1575,42 МГц ($154 - f_0$), L2 с центральной частотой 1227,6 МГц ($120 - f_0$) и L5 с центральной частотой 1176,45 МГц ($115 - f_0$), где $f_0 = 10,23$ МГц [7]. «Генераторы-глушилки» стоят условно недорого, а усилители мощности расширяют зону их действия. Причём «глушитель» мешает приёму высокоточного сигнала, если расположен недалеко от БПЛА, даже если глушение происходит на смежных (неточных) радиочастотах. Систе-

ма защиты наводит помехи на известных частотах в радиусе 3 км. По сути, устройство может быть полезным для установки по периметру охраняемой территории в коммерческом секторе, «чтобы папарацци с камерами не лезли». Для защиты критической инфраструктуры против профессиональных БПЛА она бесполезна.

У БПЛА военного и промышленного назначения передача информации коррекции координат происходит через связь со спутниками условно медленно из-за распределения данных по времени. Это один из проблемных вопросов оперативного дистанционного управления БПЛА, совершенствованием которого активно занимаются разработчики. Высокоточный сигнал со спутников рассматриваемое устройство глушит на 300–500 метров при прямой видимости (в этой зоне невозможно работать с гражданскими навигаторами), при этом смартфон спутники «видит», так как в смартфоне «навигатор» опирается не только на данные GPS, но и на инерционные датчики. Это хорошо видно, когда в туннеле при потерях связи устройство реагирует на смену траектории/ряда. В современном профессиональном БПЛА такие датчики уже предусмотрены в базовой схеме, иначе невозможно было бы им управлять. Заметить эту особенность, скажем, наблюдателю-экспериментатору по дорожному навигатору, установленному в автомобиле, оперативно затруднительно, поскольку в современном «навигаторе» задействован программный «лаг», в периоде которого потеря спутников скрывается. «Система-глушитель» рассчитана на то, что БПЛА перестанет контролировать высоту и пройденное расстояние из-за недостаточной точности контроля расстояний на местности ± 100 м [5]. Тем не менее датчики успешно справляются с задачей стабилизации полёта, но не реагируют гарантированно на изменение местоположения в пространстве под воздействием внешних сил. К примеру, в случае недавней атаки воздушным потоком истребителя Су-27 над Чёрным морем БПЛА MQ-9 Reaper это хорошо проявилось. Датчики устойчивости обеспечивают полёт так, что БПЛА ветром не перевернётся, но куда его сильным потоком ветра снесёт – пока непредсказуемо. Однако ветер не может быть 24 часа в сутки... Вариант подмены сигнала GPS тоже теоретически существу-

ет, но, скорее, для простейших БПЛА. К примеру, можно рассматривать вопрос о подмене сигнала с тем, чтобы БПЛА получил заместительный и мощный сигнал от аналогов спутников, но расположенных на земле в виде устройств глушения – генераторов соответствующих частот в диапазонах GPS L1, L2, L5. Непрофессиональный «одноразовый» мультикоптер без соответствующей защиты против РЭБ такой подмены не обнаружит, а перепрограммировать его не будут, ибо нерентабельно; проще послать несколько дешёвых с расчётом, что хотя бы один долетит.

Рассмотрим следующую иллюстрацию. Для самостоятельного изготовления устройств на ESP8266 с управлением по Wi-Fi любыми подключёнными электронными устройствами, в том числе БПЛА, можно ознакомиться с рекомендациями в [12]. Причём завершать можно конкретные соединения, т.е. выборочно. При работе с корректно адаптированной антенной и усилителем мощности расстояние воздействия значительно увеличивается, и на приведённом примере можно понять, как работают системы, блокирующие сигналы по Wi-Fi. Что касается рассматриваемого устройства, сфера его применения представляется ограниченной. То есть оно предназначено против исследователей частной собственности или отпугивания папарацци, но не против «байрактаров» и серьёзных целей защиты.

Перечень практического использования беспилотных комплексов, среди которых силой технической мысли разработчиков совершенствуются самолётные, мультироторные, вертолётные и другие БПЛА (аэростаты, конвертопланы), далеко не полон. Возможность получения видеопотока из эпицентра событий в режиме реального времени без угрозы для жизни оператора активно используется журналистами. Один из безопасных примеров – репортажи со спортивных мероприятий в условиях «растянутых» расстояний – велогонки, соревнования по гребле и яхтенные регаты, а также марафонские забеги и др. Беспилотники доставляют медикаменты в районы стихийных бедствий и военных действий. Мультикоптеры успешно используются для поиска людей и судов, попавших в аварийную ситуацию, «патрулирования» приграничной территории. Беспилотники способны перехватывать информацию



Рис. 14. Самодельный БПЛА из Сирийской Арабской Республики для военных целей

от радиолокационных станций и передавать её на землю. Такие устройства постоянно развиваются и совершенствуются. В дальнейшем возможно создание авиационных отрядов из пилотируемых и беспилотных аппаратов. Они могут быть вооружены ракетами и использоваться в ударных целях. Обратите внимание на рис. 14: здесь представлен БПЛА, начинённый взрывчаткой, подобранный на территории САР в 2018 году.

На сегодняшний день самой тяжёлой в армии США считается модель RQ-11 Raven с размахом крыльев 1,5 м и скоростью до 95 км/ч, способная пребывать в полете до 1 часа.

Выводы

Как мы увидели в обзоре, производство мультикоптеров развивается. Было много разговоров в предыдущие годы о беспилотном «такси» на базе мультикоптера в Москве и в Саудовской Аравии, однако всё это характеризуется «пилотными» моделями, проходящими испытания, анонсами, но не серийным производством. Тем не менее тенденции в совершенствовании БПЛА чётко прослеживаются: увеличение даль-

ности полетов в автономном режиме, внедрение в функционал ИИ, увеличение веса полезной нагрузки (транспортного отсека). Пример и история БПЛА с форм-фактором мультикоптеров наглядно показала эволюцию и сложный путь к реализации даже перспективных идей. Как нередко бывает, гениальные решения не всем и не всегда видятся таковыми. При отсутствии финансирования довольно затруднительно существовать не только Кулибину, Попову, Зворыкину или Пильчикову, но и Кеймену (сегвей), и Эмишону, и Ботезату (и др.). Поэтому «налицо» не российская, но интернациональная проблематика отсутствия поддержки талантливых изобретателей. Тем не менее люди с опережающими время идеями рано или поздно оказываются правы, и их имена сохраняются в истории лучше, чем имена безвестных критиков. Ну а главное, конечно, в том, что прогресс не остановить. Перспективные идеи всегда возьмут своё.

Литература

1. В России создали дальний транспортный беспилотник // URL: <https://avia.pro/news/>

na-vooruzhenii-rossii-poyavilsya-voennyu-bespilotnik-tramp?ysclid=ldvgrjz48o9682751.

2. В России делают систему опознавания «свой-чужой» // URL: <https://www.ixbt.com/news/2023/02/06/chto-by-svoi-ne-perebili-svoih--v-rossiju-delajut-sistemusvoj-chuzhoj-dlja-dronov.html?yrwinfo=1678115585517129-9502114447442416664-sas3-0804-36f-sas-17-balancer-8080-BAL-7536>.

3. *Кашкаров А.П.* Электронные устройства для глушения беспроводных сигналов (GSM, Wi-Fi, GPS и некоторых радиотелефонов). М.: ДМК Пресс, 2016. 96 с.

4. Квадрокоптер Delta H1600H // URL: <https://russiandrone.ru/catalog/bespilotnye-kompleksy/multitrotornye/benzinovyy-dron-delta-h-1600-h/>.

5. Первый квадрокоптер: история появления // URL: <https://dzen.ru/a/Wqu96tyvjkr9VqSd>.

6. Подробно о полётном контроллере // URL: <https://dronomania.ru/faq/dron-svoimirukami-urok-4-polyotnyj-kontroller.html>.


7. Противодронные устройства Ростеха защитили от беспилотников нефтяную компанию // URL: <https://rostec.ru/news/protivodronnye-ustroystva-rostekha-zashchitili-ot-bespilotnikov-neftyanuyu-kompaniyu/>.

8. Противокорабельные комплексы «Стрела» и «Сопка» // URL: <https://topwar.ru/92923-beregovoy-raketnyy-kompleks-sopka.html>.

9. Россия легализует частоты для беспилотников // Современная электроника. 2023. № 1. С. 51. URL: https://www.soel.ru/magazines/PRINT/SoEl_2023-1pr/50/.

10. Сходства и отличия процессоров для БПЛА // URL: <https://rchooby.pro/blogs/f1-f3-f4-f7-i-h7-poletnye-kontrollery-v-cem-raznica>.

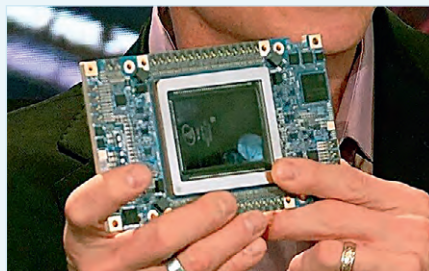
11. *Суомалайнен А.* Беспилотники: автомобили, дроны, мультикоптеры. М.: ДМК Пресс, 2018. 188 с.

12. Электронное устройство глушения радиосигналов – джаммер на основе ESP8266 // URL: www.youtube.com/watch?v=zTndXkPUM08. 

НОВОСТИ МИРА

Intel показала, чем будет завоёвывать рынок искусственного интеллекта. Компания продемонстрировала ускоритель Gaudi3

Компания Intel не только заявляет, что «вся индустрия заинтересована в ликвидации рынка Nvidia CUDA», но и продолжает разрабатывать собственные ускорители для ИИ. Сегодня Intel продемонстрировала модель Gaudi3, которая должна выйти в следующем году.



Всех подробностей о данном решении пока нет, но сама Intel говорит, что производительность в режиме BF16, которая как раз важна для ИИ, по сравнению с Gaudi2

будет повышена в четыре раза, а пропускная способность вырастет в полтора раза. Правда, для Gaudi2 мы показателей производительности в этом режиме не знаем, и неясно, где и насколько активно используются такие ускорители.

Сама Intel говорит, что линейка Gaudi претерпела значительный рост благодаря производительности и совокупной стоимости владения. Учитывая, что ускорителей Nvidia точно не хватит на всех желающих, Intel вполне может преуспеть на этом рынке.

ixbt.com



«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!

Обзор технологии FTENG для создания энергонезависимых носимых медицинских датчиков и стимуляторов

Надежда Любимая

В статье приводится обзор современной и инновационной медицинской электроники и рассматривается её влияние на медицину в целом. Особое внимание уделяется преобразованию биологических свойств человека в электрический ток по технологии FTENG.

Новые технологии в сегменте биоэлектронных носимых устройств медицинского назначения с долговременным автономным питанием являются инновационным направлением развития современной электроники и полезны для анализа разработчикам РЭА. Инновационные разработки свидетельствуют, что анализ элементарных частиц потоотделения человека может обеспечить неинвазивный и непрерывный мониторинг состояния здоровья даже на молекулярном уровне, а также является преобразуемой в электрический ток энергией, что предполагает широкие перспективы развития сегмента автономного питания для электронных устройств (в том числе чипов) малой мощности. Также в обзоре представлена перспективная разработка по заживлению ран с помощью сверхмалого тока и датчиков – новейших разработок электроники в области медицины.

Американские, китайские и корейские исследователи разработали и испытали на мышинной модели диабетической язвы биорезорбируемый беспроводной электрод для мониторинга состояния и электротерапии хронических ран. Отчёт о работе появился в журнале Science Advances [3]. В 2022 году свой вариант беспровод-

ного атравматичного пластыря для электротерапии предложили сотрудники Стэнфордского университета. В нём управляющий модуль и электроды расположены на одной полимерной подложке, уверенно фиксируемой на коже при комнатной температуре, но теряющей «липкость» при нагревании до +40°C [4].

Хроническими называют раны, которые не закрываются в течение 8–12 недель. Они представляют серьёзную проблему для лечения, поскольку связаны с потерей функции и подвижности поражённой части тела; приводят к социальным стрессам, их производной – изоляции, депрессии и тревожности; иногда госпитализации; повышению рисков заболеваемости и смертности. Особенно распространены и трудноизлечимы повреждения кожи при сахарном диабете, это проблема, возникающая у 25% людей в возрасте от 40 лет и выше. Для помощи пациентам с хроническими ранами используют системы замедленного высвобождения биологических элементов, пересадку клеток и биоинженерию кожи. Особый интерес представляет электротерапия, поскольку воспаление, сопровождающее повреждения кожи, нарушает эндогенные сигналы, способствующие миграции кера-

тиноцитов, фибробластов и иммунных клеток в процессе заживления. При этом существующие адгезивные электроды в медицине дорогостоящи, подключаются к громоздкому оборудованию, обладают ограниченной функциональностью и могут вторично травмировать ткани при отклеивании (расфиксации), что ограничивает применение электротерапии. В опубликованном в ноябре 2022 г. исследовании участвовали более 30 авторов, двое из которых наши соотечественники [2]. На рис. 1 представлены материалы и конструкции биорезорбируемой электротерапии.

Биорезорбируемая беспроводная система электротерапии

Для беспроводного питания на резонансной частоте 13,56 МГц применялись 7-витковые катушки, микроконтроллер ATiny84A, линейные регуляторы с малым падением напряжения $V_{out} = 2,8$ В и 1,1 В, NFC M24LR04E-R, усилитель ОРА330AIYFFR. Силиконовый эластомер Silbione-4420 сформировал герметизирующую структуру для беспроводной платформы. Все образцы перед исследованиями подвергались стерилизации газообразным этиленоксидом (EtO, анпролен, AN74i). Для определения электрического поля, плотности тока, тока в электродах и изменения температуры в слоях раны и тканей мыши на электрод воздействовали напряжением 1,1 В. Для изготовления использовали биологически инертный молибден. Почему молибден? Этот металл хорошо проводит электрический ток, механически прочен и инертен по отношению к живым тканям. После окончания использования он постепенно резорбируется с образованием нетоксичных молибдат-анионов (MoO_4^{2-}), что было подтверждено дополнительными экспериментами. Это обосновывается расчётными характеристиками материалов, представленными в табл. 1.



Рис. 1. Материалы и конструкции биорезорбируемой, беспроводной и безбатарейной системы электротерапии

Таблица 1. Расчётные характеристики материалов

Слои электродов и тканей	Толщина (мкм)	Плотность (ρ) (кг/м ³)	Удельная теплоёмкость (Cρ) (Дж/кг·К)	Теплопроводность (k) (Вт/м·К)	Относительная диэлектрическая проницаемость (ε)	Электропроводность (σ) (См/м)
Молибден	15	10 200	250	138	1	2×10 ⁷
Роговой слой	5	1090	3350	0,209	5×10 ²	2×10 ⁻⁶
Жизнеспособный эпидермис	22	1090	3350	0,209	5×10 ⁶	0,026
Дерма	280	1090	3350	0,322	5×10 ⁹	0,222
Подкожный жир*	300	911	3660	0,21	5×10 ⁷	0,08
Мышцы	2000	1060	3730	0,53	2×10 ⁷	0,25

*Примечание. Подкожный жир – это жировая ткань и гладкая плотная мышца.

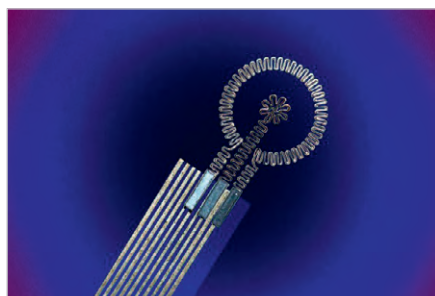


Рис. 2. Вживляемый элемент беспроводного модуля

Испытания термических, механических и электрохимических характеристик устройства представлены в [6]. Чтобы избавиться от недостатков, сотрудники научных центров США, Китая и Южной Кореи под руководством Гильермо Амира (Guillermo Ameer) и Джона Роджерса (John Rogers) из Северо-Западного университета в Эванстоне разработали компактную беспроводную систему для электротерапии с гибкими растяжимыми биорезорбируемыми электродами. Помимо лечебного воздействия, она позволяет следить за состоянием раны по электрическому сопротивлению [5].

Беспроводной модуль (вживляемый элемент представлен на рис. 2) наклеивается на здоровую кожу вблизи хронической раны.

Он состоит из индукционной спирали для питания с резонансной частотой 13,56 МГц от внешнего источника; электронной системы на чипе, которая подключается к компьютеру или смартфону ближней бесконтактной связью (NFC) по протоколу ISO15693; светодиода для индикации работы и микроконтроллера, создающего и измеряющего ток для стимуляции напряжением 1,1 В. К микроконтроллеру гибким соединителем крепятся внутренний и наружный металлические змеевидные электро-

Таблица 2. Объёмы азотной кислоты, перекиси водорода и конечных растворов в зависимости от типа ткани

Тип ткани	Приблизительный вес используемой ткани (г)	Объём HNO ₃ (мл)	Объём H ₂ O ₂ (мл)	Конечный объём (мл)
Цельная кровь	0,2	0,25	0,25	5
Печень	1–1,5	2	0,5	40
Все другие	0,1–0,5	0,5	0,125	10

ды; с диаметром 2 мм один – внутренний располагается над центром раны, наружный, диаметром 10,5 мм, окружает её. Последний закрепляется на коже кольцевидной накладкой. После окончания курса электротерапии ножку внутреннего электрода перерезают и оставляют имплантат рассасываться в ране, а накладку с внешним электродом удаляют.

В табл. 2 для сведения представлены объёмы азотной кислоты, перекиси водорода и конечных растворов в зависимости от типа ткани.

«Умные» повязки на основе мультимодальных носимых устройств могут обеспечить физиологический мониторинг в режиме реального времени и активное вмешательство для ускорения заживления хронических ран. Тем не менее разработка датчиков и стимуляторов для современных технологий смарт-бинтов до недавнего была ограниченной. Пока клейкие электроды были необходимы для надёжной передачи сигнала, отсоединение их приводило к вторичному повреждению деликатных тканей раны без адгезии. Теперь же создана биоэлектронная система из беспроводных датчиков с электронной стимуляцией контактирующих с кожей гидрогелевых электродов. По опыту на мышах очевидно, что можно контролировать

изменение состояния и температуры кожи и обеспечивать электрическую стимуляцию раны [5]. На доклинических моделях рана заживала на 25% быстрее и с улучшением ремоделирования кожи примерно на 50% – по сравнению с типичной подконтрольной исследователям группой. Кроме того, исследователи наблюдали активацию прорегенеративных генов в клеточных популяциях моноцитов и макрофагов, что усиливает регенерацию тканей, неоваскуляризацию и восстановление дермы [3]. На рис. 3 представлена динамика заживления раны и растворимости имплантата – соответственно столбцам – по состоянию в первый день, 6-й, 9-й, 12-й, 15-й и 18-й.

Верхний ряд иллюстрирует процесс заживления необработанной раны, нижний ряд – той же раны, но обработанной. В ходе термических, механических и электрохимических испытаний на грызунах описываемая разработка продемонстрировала стабильную работу, допускала растяжение кожи примерно на 15%, не вызывала чрезмерного нагревания и нежелательных реакций на молибденовый электрод со стороны эпидермиса, жировой ткани и биологических жидкостей. Биорезорбция электрода, отсутствие накопления молибдена и нарушений в тканях иллюстрируется

следующими результатами пилотных испытаний, зафиксированными регенеративными процессами заживления ран у мышей с диабетом, признаны положительными, так исследователи перешли к клиническим испытаниям. Фрагмент электрода, имплантированный мышце целиком, рассосался полностью за 35 недель. При этом важно, что молибден не накапливался в ключевых органах и тканях – сердце, лёгких, печени, селезенке, почках, мышцах и головном мозге и не вызывал гистологических изменений. Гистологическое исследование показало, что на 18-й день толщина грануляционной ткани без лечения и с электротерапией достигла в среднем 195, 222 и 595 микрометров (мкм). На 30-й день толщина эпителия составила соответственно 15, 16 и 48 мкм при формировании микрососудистого русла соответственно 26, 29 и 112 сосудов на 1 мм². Плотность и организация коллагеновых волокон практически не отличались во всех группах: электротерапия не нарушала формирование соединительной ткани [3]. На рис. 4 представлена схема взаимодействия имплантата по каналу беспроводной связи.

Беспроводной безбатарейный носимый «датчик пота», работающий от движения человека

Еще 20 лет назад внедрение новейших устройств маломощной электроники снизило проблематичность энергопотребления носимых устройств и позволило использовать небольшие дисковые батареи типа «таблетка». Несмотря даже на эти усилия, батареи по-прежнему связывались с ограничениями, поскольку их необходимо заменять или заряжать. В определённых условиях литий-ионные батареи подвержены взрыву, что создаёт проблемы с безопасностью. Серия историй о том, как «отказывали», провоцируя пожарную опасность, системы вентиляции легких в больницах на пике пандемии коронавируса – тому в пример. О безбатарейных системах с питанием по радиоканалу ближнего радиуса действия NFC журнал «Современная электроника» неоднократно писал. С рассмотрением проблематики очевидно, что питание в формате NFC несовершенно из-за относительно короткого рабочего расстояния вза-

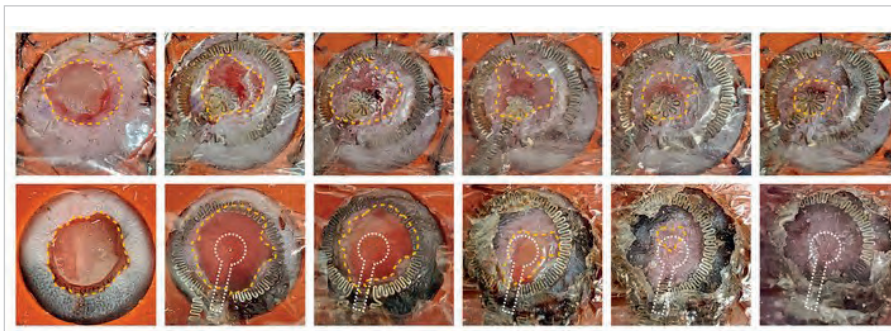


Рис. 3. Два ряда иллюстраций заживления. Динамика заживления раны соответственно столбцам – по состоянию в первый день, 6-й, 9-й, 12-й, 15-й и 18-й

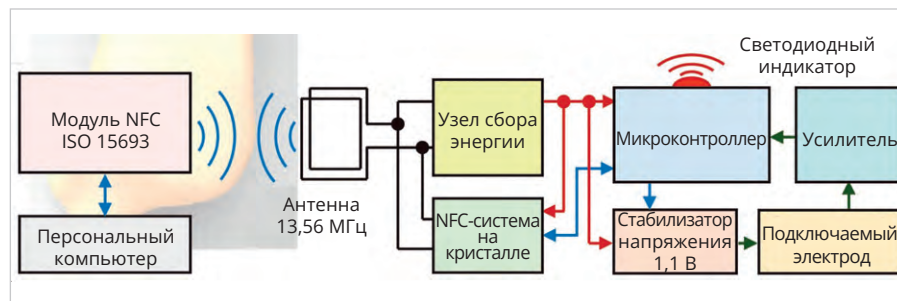


Рис. 4. Схема взаимодействия имплантата по каналу беспроводной связи

имодействия датчиков и устройства анализа данных. Носимые устройства, способные определять жизненные показатели – пульс, частоту дыхания и температуру, интегрируются в повседневный образ жизни. В качестве альтернативы электроэнергию питания получают из возобновляемых и устойчивых источников, таких как солнечный свет, биожидкости и даже посредством изменения состояния кожного покрова при движении человека, поскольку выделяемый при активном движении и физических нагрузках пот содержит молекулярные биомаркеры – электролиты, метаболиты, аминокислоты, гормоны, которые могут анализировать носимые электронные биодатчики. Непрерывный мониторинг таких биомаркеров в перспективе дополнит лабораторные анализы крови, позволяя в режиме реального времени отслеживать состояние здоровья, а также проводить раннее выявление и лечение заболеваний. Беспроводные носимые биосенсоры – датчики-преобразователи механического и биохимического изменения характеристик эпидермиса человека получили распространение благодаря потенциалу для неинвазивного мониторинга состояния здоровья. Эффективный аккумулятор электрической энергии, реализуемый посредством устройства электронного преобразователя от активного физического дви-

жения человека, – это перспектива к устойчивому и стабильному питанию будущих носимых устройств небольшой мощности. Сегодня, несмотря на проводимые в разных странах исследования, носимые (портативные и автономные) устройства сбора энергии несовершенны из-за сложных процедур изготовления и условно низкой надёжности, что делает их непригодными для непрерывного биозондирования. Теперь учёные Калифорнийского университета предложили коллегам результаты испытаний и выводы по апробации серийно производимой электронной платформы без собственного источника электропитания, эффективно использующей энергию, преобразованную от движения (деформации) тела человека при физических упражнениях и движении вообще – с помощью независимого трибоэлектрического наногенератора (FTENG) на основе гибкой печатной платы (FPCB). Модуль FTENG имеет условно высокую выходную мощность – приблизительно 416 мВт·м⁻². Благодаря бесшовной системной интеграции и эффективному управлению питанием система с трибоэлектрическими датчиками способна питать мультиплексные биосенсоры и передавать данные по беспроводной связи на пользовательские интерфейсы через Bluetooth [1].

Особенности новых трибоэлектрических наногенераторов

Трибоэлектрические наногенераторы (ТЭНГ, TENG) преобразуют механическую энергию, создаваемую движением человека, в электрическую энергию за счёт сочетания индуктивных и трибоэлектрических эффектов. Этим объясняется научная новизна исследования специалистов РЭА в области медицинских технологий и актуальность проблематики оборудования. Вновь предложен метод сбора энергии от изменений состояния кожного покрова (динамика сокращений эпидермиса, изменения температуры и влажности участка кожи – потоотделения) для питания носимых датчиков во время интенсивных физических нагрузок. Явление перспективно ещё и тем, что не зависит от неконтролируемых внешних источников, таких как солнечный свет или беспроводные передатчики энергии. Несмотря на преимущество, большинство существующих устройств на основе TENG до сих пор нуждалось в совершенствовании из-за низкой энергоёмкости, условно неэффективного управления питанием, отсутствия непрерывности питания и долговечности. Таким образом, об использовании технологии TENG для непрерывного питания полностью интегрированной беспроводной носимой системы молекулярных датчиков до сих пор не сообщалось. Проблемное поле исследования таково, что для совместимости с традиционными процессами производства FPCB необходимы электронные устройства, обеспечивающие высокую производительность и надёжность. Преобразование потоотделения кожи человека в электрическую энергию можно использовать для питания носимых (автономных и портативных) устройств, которые производители позиционируют как «кожный интерфейс» [6].

Гибкая система по технологии FTENG изготовлена и апробирована коммерческим производителем FPCB. В основе 2 листа коммерчески гибких ламинатов с медным покрытием (толщиной 120 мкм; JingHuang Electronics Co.), состоящих из гибкой полиимидной подложки и медной плёнки, покрытых тонким слоем эпоксидного клея (рис. 5).

Водонепроницаемые двусторонние медицинские ленты толщиной 75 мкм компании Adhesives Research. Сера-

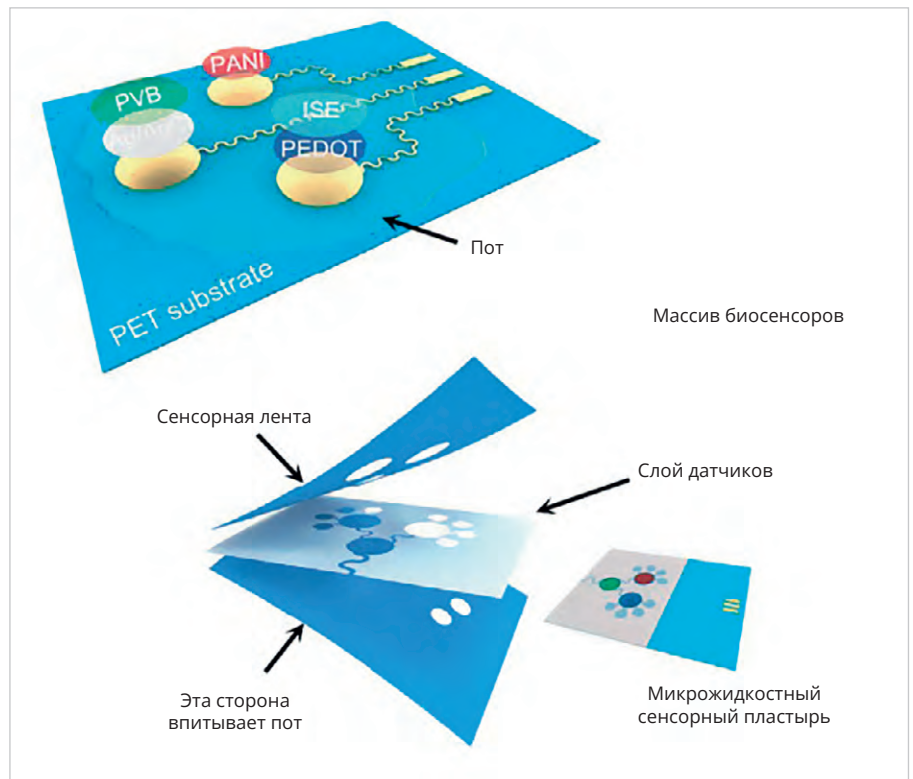


Рис. 5. Основа гибкого электронного биодатчика по технологии FTENG

бряная проводящая краска компании Structure Probe Inc. Влагостойкая ПЭТ-плёнка толщиной 100 мкм McMaster-Carr. ПТФЭ толщиной 50 мкм компании Laet. На медные плёнки нанесён фотолитографический рисунок и произведено травление раствором $FeCl_3$ для изготовления элементов биодатчика. Для защиты электрода статистической основы нанесён слой ENIG. Ещё один слой ПТФЭ нанесён на подвижный электрод, чтобы вызвать затем электризацию. Общая площадь однопанельного биодатчика FTENG составляет 22,6 см². Параметры таковы: длина 5,78 см; ширина 3,78 см. Масса датчика всего от 0,586 до 0,782 г в зависимости от наличия ПТФЭ-покрытия. Водонепроницаемая медицинская лента-подложка FWS3 ламинируется на коже человека – в местах с минимальной динамикой колебаний и двигательной активности мышц, и таким образом обеспечивается устойчивый сбор температурных колебаний и выделений влаги отводящих пот желез и генерация электрического тока. В системе участвует встроенный модуль Bluetooth с низким энергопотреблением (BLE), что позволяет передавать данные датчика на мобильный интерфейс, в том числе для отслеживания состояния здоровья во время тренировки. Носимая система с полностью автономным питанием без

батарей состоит из схемы беспроводного датчика с низким энергопотреблением и микрожидкостного датчика пота, реализованного всего на одной гибкой печатной плате и работающего в режиме высокоэффективного носимого автономного режима TENG (FTENG FWS3). Это позволяет динамически отслеживать ключевые биомаркеры пота, к примеру, pH и Na⁺. На рис. 6 представлена схема, иллюстрирующая работу модуля FWS3 с объединённым функционалом сбора энергии движения человека, обработку сигналов, микрожидкостное биосенсорное определение пота и беспроводную передачу данных на основе Bluetooth с передачей на мобильный пользовательский интерфейс для отслеживания состояния здоровья в режиме реального времени.

На рис. 7 представлена схема пластыря микрожидкостного датчика, конформно прикреплённого к коже человека.

Микрожидкостные слои с лазерным рисунком прикреплены к сенсорной подложке из полиэтилентерефталата (ПЭТ) в многослойной структуре (медицинская лента PDMS) для контролируемого и автоматизированного отбора проб пота на теле. Чтобы проверить работу микрожидкостной системы, динамическое биосенсорное исследование выполнено во время вве-



Рис. 6. Безбатарейный модуль FWS3 для беспроводного и неинвазивного молекулярного мониторинга

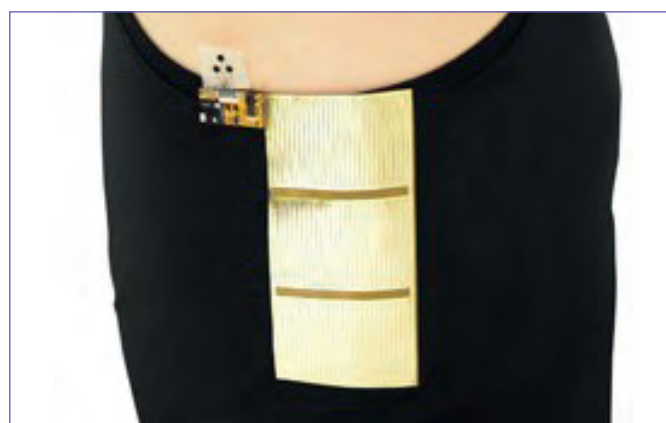


Рис. 7. Вид пластыря микрожидкостного датчика, конформно прикреплённого к коже человека

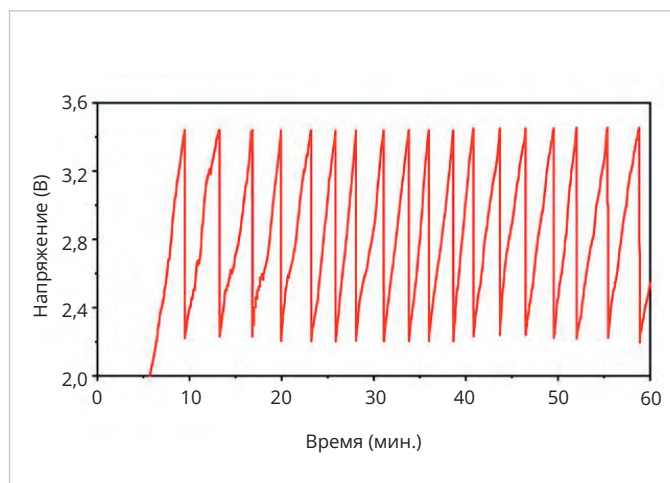


Рис. 8. Схематическая диаграмма работы модуля FWS3

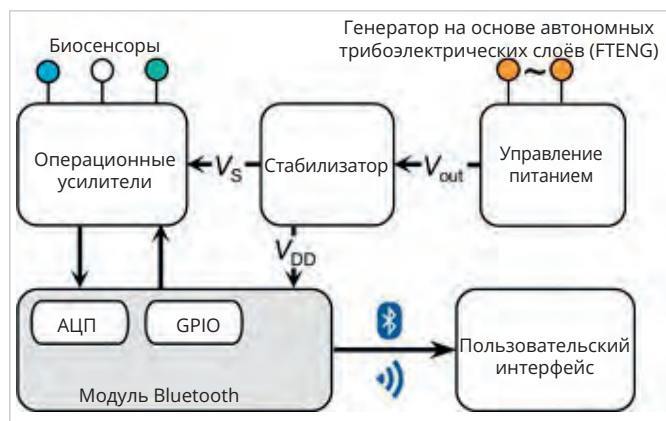


Рис. 9. Блок-схема системного уровня, показывающая управление питанием, преобразование сигналов, обработку и беспроводную передачу FWS3 от FTENG к биосенсорам

дения непрерывного потока растворов Na⁺ при различных физиологически значимых скоростях потоотделения 1, 2 и 4 мкл/мин. При скорости потока 2 мкл/мин Na⁺ датчику потребовалось ~2 минуты, чтобы достичь новых стабильных показаний. Высокое временное разрешение повторяется в течение нескольких циклов изменения концентрации.

Первая демонстрация полностью интегрированной безбатарейной носимой системы с трибоэлектрическим приводом для мультиплексного обнаружения пота состоялась в марте 2023 года в Калифорнийском технологическом институте (США).

На рис. 8 представлена схематическая диаграмма работы модуля FWS3 с микрофлюидным датчиком пота, взаимодействующего с гибкой схемой.

На рис. 9 представлена блок-схема системного уровня, показывающая управление питанием, преобразование сигналов, обработку и беспроводную передачу FWS3 от FTENG к биосенсорам, а затем к пользовательскому интерфейсу.

FTENG изготавливается по коммерческой технологии FPCB. Система FTENG состоит из встречно-штыревого неподвижного статора и подвижного ползунка в виде решётки (рис. 5). Для получения эффекта электризации политетрафторэтилен (ПТФЭ) и медь используются в качестве трибопар в гибком ФТЭН-исполнении. Межэлектродное расстояние биосенсора-датчика оптимизировано с помощью исследований плотности переносимого заряда FTENG. Подвижные части электронного датчика формируются с помощью фотолитографии с использованием встречно-штыревой и решётчатой структуры соответственно. Поверхность электрода покрыта химическим никелем/иммерсионным золотом (ENIG), а статор дополнительно ламинирован [1].

Принцип работы и особенности

Во время двигательной активности (тренировки) человека влага потоотделения преобразуется датчиком FTENG с использованием методов конденсации и поступает на элек-

тронный модуль управления питанием (PMIC) – рис. 4. Так, по достижении уровня полной зарядки на накопительном конденсаторе, стабилизирующем напряжение питания программируемой системы BLE на модуле микросхемы (PSoC) и операционных усилителей, происходит передача адаптированных в цифровой вид данных с потенциометрических измерений по BLE. Необходимо отметить, что долговременная стабильность трёхпанельного FTENG при зарядке конденсатора ёмкостью 47 мкФ при рабочей частоте 1,5 Гц достигается в течение 2 часов. Это иллюстрирует рис. 10, где график заряда модуля представлен в трёх разных вариантах нагрузки, значение напряжения дано в мВ.

И это очень важно, поскольку совершенствование системы идёт дальше именно в таком направлении – сокращение времени выхода на стабильность аккумуляирования заряда накопительного конденсатора, следовательно, автономного электропитания модуля. Рабочий механизм модуля FTENG объясняется эффектом связи контакт-

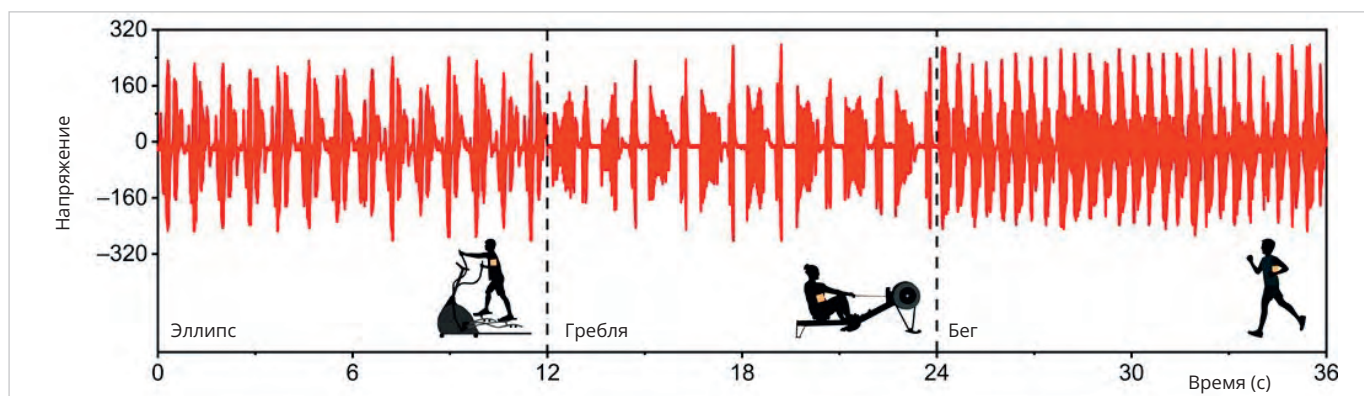


Рис. 10. График заряда модуля FTENG

ной электрификации и переноса заряда, вызванного скольжением в плоскости. Поскольку медь более трибоэлектрически положительна, чем ПТФЭ, электроны накапливаются на ПТФЭ в процессе сокращений кожи и выработки потоотделения. В исходном состоянии гибкого датчика из-за электростатического равновесия между встречно-штыревыми электродами нет изменений, нет и электрического импульса (тока). При движении кожного покрова человека процесс однонаправленного скольжения приводит к возникновению электрического зарядного потока между электродами датчика до тех пор, пока не будет достигнут уровень заряда накопительного конденсатора, о чём было сказано выше. Причём модуль FTENG способен работать на различных частотах 0,5, 1,25 и 3,3 Гц, в результате чего максимальный ISC составляет 8,39, 19,11 и 42,25 мкА соответственно. Напряжение холостого хода (V_{oc}), достигаемое при частоте 0,5 Гц, представлено на рис. 10. Разумеется, при разной частоте и сопротивлении участка кожи данные будут различны, а при увлажнении эпидермиса вследствие естественного потоотделения сопротивление участка кожи будет сокращаться.

Так, при рабочей частоте 1,5 Гц увеличение сопротивления свыше 1 МОм участка кожи в месте размещения датчика-модуля приводит к быстрому увеличению напряжения. Зафиксировано, что при сопротивлении участка кожи 4,7 МОм модуль FTENG достигает максимальной выходной мощности 0,94 мВт (что соответствует $416 \text{ мВт} \cdot \text{м}^{-2}$).

Управление энергопотреблением мало мощного биодатчика

FWS3 состоит из встречно-штыревого биодатчика FENG, РМІС, регулятора с малым падением напряжения,

двух мало мощных усилителей и модуля BLE PSoC, интегрированного в FPCB на основе полиимида. С помощью мостового выпрямителя, преобразующего сигнал переменного тока, генерируемый FTENG, в сигнал постоянного тока, РМІС накапливает мощность, генерируемую FTENG, в двух параллельных конденсаторах – условно 220 и 47 мкФ. Три нагрузочных резистора шунта имитируют пороговые и гистерезисные напряжения так, чтобы для автономного питания передавалась только условно избыточная энергия, а накопленная конденсаторами являлась «стабилизационным фондом». И наоборот, при падении напряжения до 2,3 В блок управления РМІС отключает накопительные конденсаторы до тех пор, пока они не зарядятся до уровня 3,5 В. При питании биосенсора только от накопительных конденсаторов – в случае отсутствия движения и потоотделения – напряжение регулируется электронным контроллером до 2,2 В для обеспечения стабильного функционирования [6]. Каждый раз, когда накопительный конденсатор заряжается до 3,5 В, модуль BLE PSoC инициирует один рабочий цикл ~510 мс, как показано на блок-схеме. После запуска основного процессора PSoC переводит контакт ввода-вывода общего назначения (GPIO) в высокий цифровой уровень, чтобы активировать операционные усилители (ОУ) после их предыдущего отключения. Затем встроенный 12-разрядный АЦП PSoC производит выборку и усреднение 32 каналов потенциометрических измерений, полученных на выходе ОУ. После измерения АЦП усилители отключаются для минимизации энергопотребления. Для точной работы submodule BLE PSoC требуется часовой кварцевый генератор (WCO) с частотой 32 кГц, его время запуска не более

500 мс. Поэтому после измерений АЦП основной процессор PSoC запускает WCO и уходит в режим ожидания на 500 мс с ультранизким потреблением всего ~2 мкА. Затем BLE инициализируется, и данные передаются беспроводным способом на контроллер. При напряжении питания 2,2...2,3 В биодатчик потребляет в среднем 330 мкА в течение ~510 мс.

Характеристика производительности биосенсора

Механическую надёжность сенсорных накладок оценивали, многократно изгибая их на трёхмерно-печатной форме (радиус кривизны 2 см) в течение 800 циклов. Измерения датчика производились каждые 200 циклов. В другом исследовании непрерывные измерения датчиков были записаны во время активной деформации датчиков. В течение 6 недель ионоселективные датчики хранили в условиях окружающей среды при комнатной температуре (+25°C). Испытуемые выполняли сердечно-сосудистые упражнения на беговом тренажёре (Aeon), эллиптическом тренажёре (Precor) и гребном тренажёре (Stamina). Перед тренировкой верхнюю часть спины испытуемого протирали спиртовыми тампонами и марлями. Затем для приклеивания FWS3 использовали водонепроницаемую двустороннюю медицинскую ленту. Для обеспечения точности данных для каждого испытания использовался новый пластырь с микрофлюидным датчиком. Для оценки выходной мощности во время тренировки выход биодатчика подключали к осциллографу. При оценке эффективности системы, включая пластырь с микрожидкостным датчиком, испытуемым предлагали двигаться на тренажёре – беговой дорожке с примерной скоростью

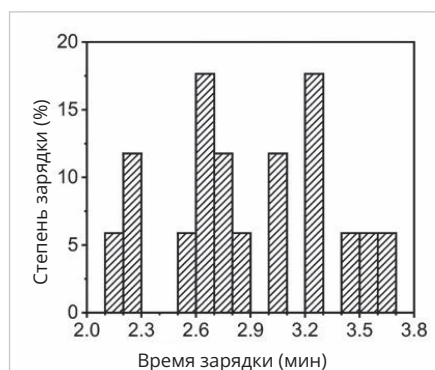


Рис. 11. Накопительный потенциал конденсатора, заряжаемого FTENG, в реальном времени

9 км/ч (программируемая настройка тренажёра) в течение 30 мин. Данные с помощью биодатчиков считывались постоянно, а фиксировались регулярно с периодом в несколько минут с помощью беспроводного интерфейса BLE, обеспечивающего коммуникацию с ПК. Кроме того, образцы потоотделения периодически собирали со лба испытуемых и пипеткой помещали в пробирки для центрифугирования при 6000 об/мин в течение 15 минут. Затем образцы пота замораживали при температуре -20°C для дальнейшего тестирования.

Факторы эксплуатации: стабильность и долговременность

Долговечность датчика на основе M-PDMS, W-PDMS и ПТФЭ проверена после 20 000 циклов испытаний. Так, ПТФЭ демонстрирует высокую механическую прочность без царапин, в то время как известные ранее разработки M-PDMS и W-PDMS имели заметные повреждения поверхности при тех же равных условиях среды испытаний. Реакция FTENG стабильна после 1000 циклов изгиба (радиус кривизны 5 см) и при различных физиологических температурах. Более того, FTENG сохраняет высокую производительность после 100 циклов стирки, что указывает на превосходные возможности ношения по сравнению с обычными TENG (M-PDMS и W-PDMS). Дело в том, что TENG, обычно изготавливаемые на тканевой основе в сочетании с полимерным покрытием, относительно дешевы, но ограничены низким «разрешением» и серийностью. FTENG на основе FPCB предлагает экономичное и механически надёжное решение для сбора энергии с высоким разрешением. Поэтому условно новая технология биосенсоров FTENG на осно-

ве FPCB обеспечивает экономичное и механически более надёжное решение. При разработке и совершенствовании устройств с питанием FTENG, разумеется, важно учитывать стоимость, свойства материалов, механические свойства и условную мощность.

Перспективы совершенствования датчика пота

Параллельное подключение нескольких FTENG может быть практичной стратегией для увеличения выходной энергии автономного источника питания. Вполне возможно применять не одиночные датчики, а массивы двойных и тройных биосенсоров (эксперименты ведутся на уровне 6 биосенсоров), используемых для анализа пота на основе ионоселективных электродов (ИСЭ). Электрод Ag/AgCl покрыт поливинилбутиралем (ПВБ) для поддержания потенциала в системе потенциометрических измерений составляющих, выделяемых железами. Датчики, реагирующие на pH и Na^+ , тем и интересны, что демонстрируют высокую чувствительность, соответственно 56,28 и 58,63 мВ при уровнях нормы pH (от 4 до 8) и Na^+ концентрации (от 12,5 до 200 мМ); по тем же причинам устройства с такими датчиками обладают селективностью. Отклики датчиков зафиксированы стабильными при различных физиологических температурах; всё сказанное делает их подходящими для непрерывного мониторинга с помощью носимых устройств.

Обычные физические упражнения, такие как бег, гребля, элементы легкой атлетики и занятия на соответствующих тренажёрах, вызывают скользящее движение между частью туловища и внутренней стороной руки. Бег на беговой дорожке был выбран в качестве упражнения для проведения экспериментов по проверке всей системы на теле. Кривая зарядки и разрядки накопительного конденсатора FPCB в продолжении 60-минутного сеанса с постоянной скоростью показывает, что может быть достигнуто до 18 рабочих циклов. Продолжительность цикла зарядки/разрядки колеблется от 2,1 до 3,7 мин. Биодатчик накапливает электроэнергию, когда статор и ползунок физически трутся друг о друга посредством механического сокращения (движения) кожного покрова человека, а также при потоотделении. Несмотря на колебания продолительно-

сти циклов заряда/разряда конденсаторов, вызванные различной площадью трения, силами и частотами, система FWS3 показала себя стабильной при обычных физических нагрузках. Накопительный потенциал конденсатора, заряжаемого FTENG, в реальном времени и среднее время зарядки для каждой передачи пакета, когда испытуемый бежит на беговой дорожке в течение 1 часа с постоянной скоростью 9 км/ч, представлен на рис. 11.

Когда потенциал превышает значение 2,3 В, конденсатор разряжается из-за передачи данных BLE. Эти данные демонстрируют потенциал носимого автономного устройства с биодатчиком для непрерывного мониторинга различных физиологических биомаркеров пота во время тренировки.

Характеристика FTENG

Для выходных характеристик FTENG использован цифровой осциллограф (Agilent DSO-X 2014A), напряжение холостого хода контролировали с помощью пробника с пределом измерений 100 МОм. Ток короткого замыкания усиливался маломощным усилителем тока SR570 от Stanford Research Systems. Программное обеспечение COMSOL использовалось для моделирования и проверки электростатической стимуляции. При испытании на долговечность максимальный зазор между PDMS и трибоэлектрическим материалом – медью зафиксирован на уровне 3 мм при рабочей частоте воздействия 2 Гц. Микроскопическое изображение встречно-штыревого электрода статора характеризовали с помощью оптического микроскопа (Carl Zeiss AXIO). СЭМ-изображения ПТФЭ, M-PDMS и W-PDMS были получены с помощью СЭМ с автоэлектронной эмиссией (FEI Quanta 600F) – рабочей станцией (CHI 860, CH Instruments) для электрохимического осаждения и характеристики сенсора. Иллюстрация процесса изготовления пластыря микрожидкостного датчика с массивом электродов представлена на рис. 12.

После предварительной обработки ПЭТ-подложки использовали испарение с помощью электронного луча с результатом формирования золотых электродов диаметром 3 мм после осаждения металлов на ПЭТ. Сначала к ПЭТ-сенсору прикрепляли слой водонепроницаемой двусторонней медицинской ленты с камерами диаметром 3 мм. Затем на медицинскую ленту наклеи-

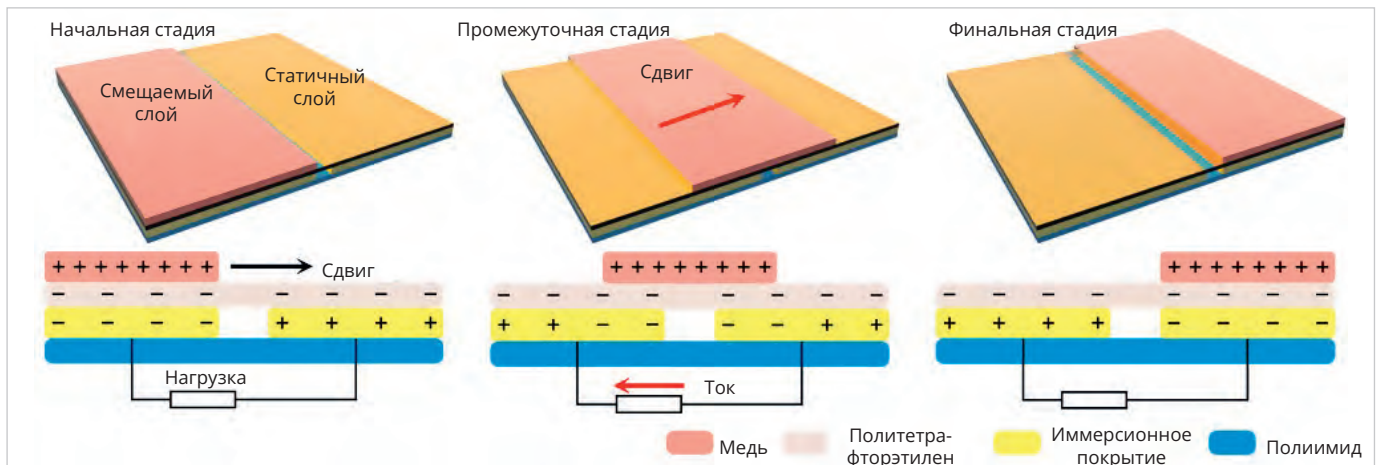


Рис. 12. Процесс изготовления пластины микрожидкостного датчика с массивом электродов

ли слой ПДМС (толщиной 100 мкм) с резервуарами диаметром 3 мм, входами, выходами и жидкостными соединениями. После этого слой медицинской ленты с отверстиями был прикреплён к слою PDMS. Трёхпанельные биосенсоры FTENG, работающие с частотой в диапазоне 1–2 Гц, наиболее результативны по отдаваемой мощности преобразованной энергии, если зафиксированы на руке человека в области локтевого сустава, предплечья. Результирующие циклы зарядки и разрядки накопительных конденсаторов при разной частоте показаны на рис. 13.

Выходное напряжение в диапазоне от 100 до 300 мВ (при активном движении сустава накопительный конденсатор заряжается каждые 300 секунд). Улучшения беспроводной коммуникации данных с точки зрения интервала передачи могут быть достигнуты за счёт дальнейшего повышения плотности мощности и эффективности FTENG.

Выводы

Технология FTENG уже вызвала интерес ввиду потенциального применения в системах с автономным питанием в носимых и имплантируемых устройствах медицинской электроники. Методы совершенствования разработки касаются того, что сигналы FTENG недостаточны для удовлетворения потребителей относительно мощных. Во-вторых, для непрерывного ношения необходимо увеличить срок службы биодатчиков повышением стабильности органических полимерных материалов, используемых для изготовления устройств. Разработчики РЭА продемонстрировали, что уже можно эффективно и надёжно извлекать энергию из движений человека во

время энергичных упражнений с помощью FTENG с поддержкой FPCB. По сравнению с традиционными технологиями FPCB демонстрирует перспективную механическую и электрическую стабильность даже после интенсивных деформаций и многократных циклов промывки. Благодаря бесшовной системной интеграции и эффективному управлению питанием гибкая система способна питать мультиплексные биосенсоры и передавать данные по беспроводной связи на пользовательские интерфейсы через Bluetooth во время движения не только людей, но и других живых организмов, к примеру, крупного рогатого скота. При дальнейшем развитии технология, которой в данном сегменте (сокращения и изменения свойств кожи при динамическом воздействии) медицинской электроники пока нет альтернатив, станет ещё более привлекательной для разработчиков РЭА, специализирующихся на автономном беспроводном персонализированном мониторинге здоровья при повседневной деятельности крупных живых существ. Подобные устройства также будут востребованы в области охраны окружающей среды и обороны. Что касается санкций и партнёров российских компаний из США и Европы, пока продукцию закупают через дистрибьюторов, продолжающих обеспечивать рынок в России согласно договорным отношениям. Разумеется, и особенно в 2023 году, ориентация на КНР стала определяющей. С Китаем сотрудничают европейские производители, заказывая недорогую продукцию для продажи под своей торговой маркой. В обороте российских компаний – производителей РЭА в сфере медицинской электроники китайская продукция занимает около 50–55%. Как

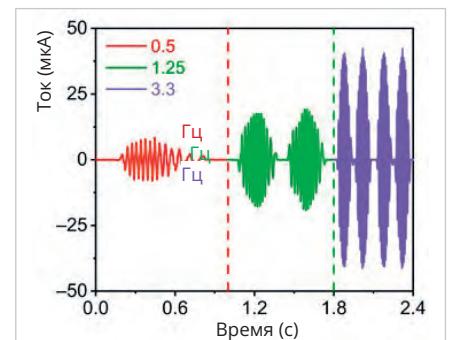


Рис. 13. Результирующие циклы зарядки и разрядки накопительных конденсаторов биодатчиков

правило, это высокомаржинальный, востребованный товар.

Литература

1. Беспроводной безбатарейный носимый датчик пота, работающий от движения человека // URL: <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aay9842>.
2. Беспроводная интеллектуальная повязка замкнутого цикла со встроенными датчиками и стимуляторами для улучшенного ухода за раной и ускоренного заживления // URL: <https://www.nature.com/articles/s41587-022-01528-3>.
3. Биоразлагаемые молибденовые электроды для временной электрокардиостимуляции // URL: <https://nplus1.ru/news/2023/02/28/heal-and-disappear>.
4. Биорезорбируемая, беспроводная и безбатарейная система для электротерапии и определения импеданса на раневых участках // URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.ade4687>.
5. Лицук О. Беспроводные электроды на треть ускорили заживление хронических ран и рассосались в них // URL: <https://nplus1.ru/news/2023/02/28/heal-and-disappear>.
6. Joseph W. Song et al. // Science Advances, 2023.

Мониторинг окружающей среды и защита РЭА от инфразвуковых колебаний

Вадим Экземплярский

Новые вызовы времени регулярно заявляют о себе. Наряду с разными возможностями контроля, диагностики окружающей среды изучаются методы определения и фиксации импульсов инфранизкой частоты, пронизывающих атмосферу, акватории, и имеющих свойства отражения от земной поверхности и частично – от возведённых на ней объектов. В обзорной статье дан анализ новых достижений в области мониторинга волн ИНЧ с целью формирования тактики защиты человека, а также противодействия разрушению РЭА.

Методы обнаружения возмущения природного фона (взрывов)

Космическое пространство – естественная среда с присутствующим излучением разных характеристик, в том числе с радиационной и ионизирующей составляющей. Изучения космических явлений, в том числе в атмосфере и её слоях, солнечной активности проводятся постоянно и разными странами. Исследования проводятся не только с целями уточнения источников вторичного излучения в виде нейтронов, гамма-квантов, протонов и других тяжёлых частиц, но и для защиты космических аппаратов, включая спутники различного назначения. Электронные диагностические устройства обнаружения возмущения атмосферы, в том числе ядерного взрыва (NDDS), идентифицируют и классифицируют по мощности и направлению источники геомагнитной, гидроакустической, инфразвуковой и сейсмической активности и аномалии (в том числе взрывы), а также связаны с отбором проб воздуха. При ядерных взрывах в воздух попадают радиоактивные изотопы, которые могут быть условно безопасно собраны посредством БПЛА. Радионуклиды могут включать америций-241, йод-131, цезий-137, криптон-85, стронций-90, плутоний-239, тритий и даже ксенон. Однако пробы воздуха возможны и с помощью сети наземных контрольных «радионуклидных» станций, установленных по всему миру. Даже подземные испытания выделяют радиоактивные газы (ксенон и др.), доступные к обнаружению. Одним из недостатков метода является то, что воздушные потоки перемещают радионуклиды непредсказуемым

образом, в зависимости от места взрыва и погодных условий в соответствующее время. Кроме того, БПЛА не может пока «бороздить» стратосферу и космос. С другой стороны, сейсмический метод определения аномалий более универсален: вибрация распространяется как в космическом пространстве, так и на земле на большое расстояние. Поскольку энергия, вызванная взрывом или сильной сейсмической активностью, будет передаваться по-разному, наблюдения за сейсмическим и инфразвуковым фоном признаны в нескольких странах перспективными для обнаружения несанкционированной детонации поверхности Земли и в космическом пространстве. Договор о частичном запрещении испытаний (РТВТ) запрещает ядерные испытания в атмосфере, под водой и в космическом пространстве. Однако кто в современном мире знает, насколько фактически долгосрочны некогда заключённые договоры?

Для обнаружения и контроля над проведением подземных, подводных и космических испытаний в бюджетах многих стран предусмотрены сейсмологические исследования. Значительный прогресс был сделан за декаду лет Шериданом Спитом, который преобразовал данные сейсмографов в звуковые файлы. Теперь возможно отличить землетрясения от взрывов, проанализировав в аудиоспектре разницу с помощью электронных устройств и ПО. Ядерные испытания всегда производили гамма-лучи, рентгеновские лучи и нейтроны. Распространение радиоактивного газообразного ксенона, йода-131 и цезия-137 может быть обнаружено на разных континентах за много миль. Известной американской

спутниковой системой обнаружения ядерных объектов был проект VELA, состоявший из 12 военных спутников, оборудованных детекторами рентгеновского, нейтронного и гамма-излучения. Мониторинг основан на том, что взрыв испустит массивную вспышку рентгеновского излучения многократно с интервалом менее 1 микросекунды. С появлением глобальной системы позиционирования (GPS) спутники на околоземной орбите помогают лучше обнаруживать и фиксировать координаты сейсмической активности. Современные спутники оснащены видеокамерами, что позволяет фиксировать не только наземные возмущения фона (взрывы), но и проводить мониторинг более мелких объектов – одушевлённых и неодушевлённых. Недостатком метода спутникового обнаружения является то, что лучи испускают нейтроны и могут давать ложные сигналы датчикам, поэтому важна комплексная диагностика и наблюдение за фоном атмосферы в разных направлениях (с датчиками различного назначения).

В дополнение к сказанному гидроакустические станции в разных уголках мира созданы для наблюдения за деятельностью в Мировом океане. Вода относительно быстро переносит (не поглощает) звук, особенно инфразвук, и такой метод диагностики фона также признан эффективным. Совершенствуется «подводное оборудование» в части определения направления и силы инфразвуковой активности, а проблематика связана с неоднородной структурой морского дна и др. факторами.

И наконец, инфразвуковые волны. Их улавливают микробарометры, о которых будем говорить далее. Первые станции инфразвукового контроля позволяли обнаружить взрыв мощностью более 1 килотонны в тротиловом эквиваленте. Инфразвуковые волны могут проходить «сквозь» землю, отражаясь несколько раз, а в атмосфере они подвержены влиянию ветра и колебаний температуры. Источник инфразвуковых волн относительно удалённого источника трудно классифицировать по его природе (химический, водородный вариант от ядерного взрыва), однако его

факт зафиксировать вполне возможно. Международная система мониторинга (IMS), состоящая примерно из пяти сотен станций, использует разные типы датчиков. Для сбора данных и аналитического расчёта силы воздействия IMS использует системы обнаружения гидроакустических, инфразвуковых и сейсмических волн, а также пробоотборники воздуха для определения радионуклидов. С помощью системы идентифицировали ядерные испытания, проведённые Индией и Пакистаном в мае 1998 года, и позже испытания в стране «чучхе» даже с условно низкой мощностью 0,6 килотонны в 2006 году. Подробнее о системах обнаружения ядерного взрыва рассказано в [9].

Однако за всем этим исследователи не забывают и о перспективном воздействии колебаниями (волнами) инфразвуковой частоты. Звуки ультранизких частот (УНЧ) в стратосфере зафиксированы аэростатами специального назначения, длина каждого 7 метров. Так, исследователи из лаборатории Сандии на протяжении нескольких месяцев исследовали именно стратосферу, как область, находящуюся выше уровня полёта гражданских самолётов. Эта область представлена на рис. 1.

В начале эксперимента предполагалось, что в относительно спокойном с точки зрения естественной аудиоактивности слое атмосферы – стратосфере Земли чувствительным электронным оборудованием на аэростатах можно зафиксировать звуки, не достигающие поверхности Земли. Действительно, необычные источники звука были определены, а результаты исследования в 2023 году опубликованы. В перспективе предполагается наблюдать и классифицировать движение воздушных целей, вулканические извержения и иную сейсмическую активность с Земли, характеризую-

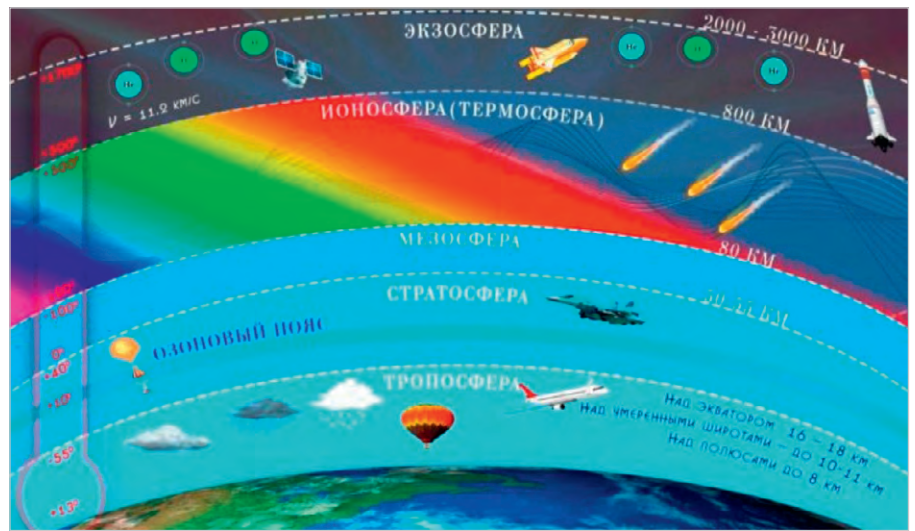


Рис. 1. Околокосмические области атмосферы

щуюся распространением инфразвуковых волн, не слышимых человеку. Об этом подробно в [12].

Но особенно хорошо этот метод с эффектом направленности действует для зданий, поскольку находящиеся в них люди ощущают эффект, усиленный изолированным помещением с качественной акустикой, с резонирующим эффектом конструкции (стен) – так же, как камень громче «шумит» в пустом ведре. Конкурентная борьба за такие технологии и идёт в мире. Трубы, памятные из книг Библии, и связанная с ними история осады города Иерихон – лишь прообраз такого возможного психического и физического воздействия. Параболический отражатель Schallkanone (Ричард Валлаушек, 1944) использовался для воспламенения горючего вещества и кислорода и являлся прообразом современных направленных генераторов звуков инфразвуковой частоты. Современные разработки куда более смертоносны: когда электронная переносная система генерирует инфразвуковые «акустические пули», они могут деморализовать противника за сотни метров. Подробнее об этом в [3], [4].

Система обнаружения сейсмической активности в атмосфере

Использование в качестве информационных и контрольных параметров электромагнитных и сигналов инфранизкой частоты (ИНЧ), получаемых из атмосферы после её возмущения, – перспективное направление развития инженерной мысли. В качестве датчиков используют инфразвуковые микрофоны, способствующие регистрации акустических сигналов в диапазоне частот 0,01...50 Гц и микробарометры, регистрирующие сигналы ИНЧ в диапазоне 0,02...4 Гц.

При анализе инфразвуковых сигналов, регистрируемых инфразвукометрическим комплексом, выявлено два типа инфразвуковых сигналов. Первый тип представляет одиночный импульс (рис. 2). Второй тип сигнала представляет собой серию импульсов или квазигармоническую последовательность (рис. 3). Наличие разных видов сигналов объяснимо тем, что длительность и форма инфразвукового сигнала зависит от силы, направленности и удалённости источника ИНЧ [3].

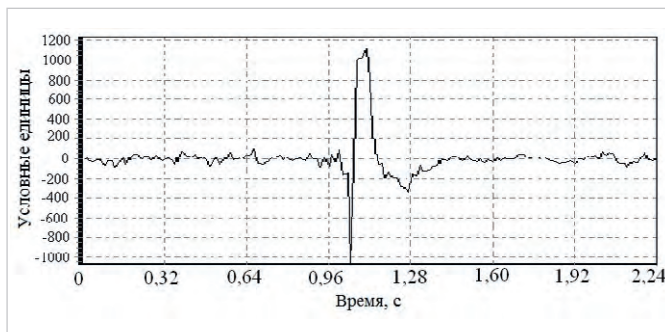


Рис. 2. Иллюстрация одиночного импульса инфразвукового сигнала

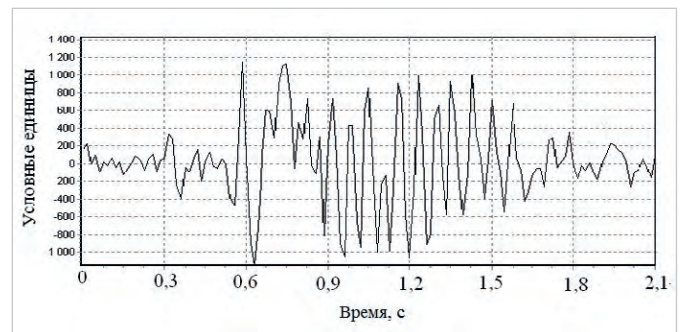


Рис. 3. Иллюстрация квазигармонической последовательности инфразвукового сигнала

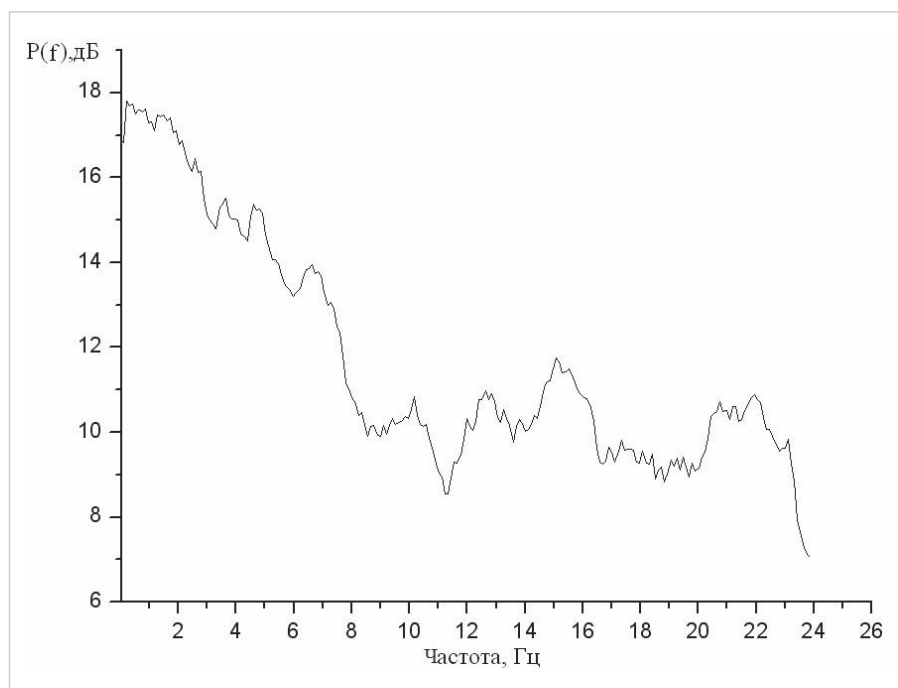


Рис. 4. Спектр относительной интенсивности сигнала ИНЧ

Спектр относительной интенсивности и уровень $P(S)$ сигнала ИНЧ представлен на рис. 4.

По результатам исследований генерации сейсмических и электромагнитных волн на примере грозовых разрядов установлено, что в атмосфере акустические волны образуются в широком диапазоне звуковых и инфразвуковых частот. В спектре акустического поля наблюдаются два частотных максимума: один в диапазоне частот менее 20 Гц, наиболее часто наблюдается максимум на частотах 0,2...2 Гц и связан с разрядом внутри облака, второй – в диапазоне между 40...60 Гц, связанный с разрядом в землю [2].

Один из механизмов генерации инфразвуковой волны молниевым раз-

рядом предложен Десслером (1973) и получил развитие в работах Фью (1985). Начальная фаза инфразвуковой волны характеризуется фазой сжатия и уменьшением давления в начальной стадии сигнала. Исходя из этого, можно отличить инфразвуковые сигналы, источником которых являются грозовые разряды, от сигналов других источников [2].

С помощью инфразвукового комплекса, состоящего из трёх инфразвуковых датчиков, можно определить направление прихода акустической волны в плоскости земли (определение пеленга сигнала). Поэтому размещение микробарометров на местности и в устройстве типично осуществляют в форме треугольника. На рис. 5 пред-

ставлен внешний вид микробарометра отечественного производства.

Микробарометры – это чувствительные барометры, совмещённые с альтиметрами давления, могут измерять давление воздуха с условно высокой точностью. Микробарометры обычно имеют разрешение микробар (мкбар) или паскалей (Па), тогда как обычные барометры могут разрешать только в гектопаскалях (гПа) или миллибарах (мбар). Современные системы адаптированы для работы с ПК и удалёнными серверами, поэтому принятые показания немедленно записываются. Своевременное обнаружение на большом расстоянии инфразвуковой сигнатуры возмущения атмосферы, в том числе взрывного характера, после оперативного определения места и мощности взрыва поможет при оповещении людей об опасности и принятии защитных мер.

При корректной диагностике и обработке сигналов, зафиксированных микробарометрами (тремя и более), определяется диаграмма направленности возмущения атмосферы и/или поверхности земли – в зависимости от того, где установлено диагностическое оборудование. Пример такой диаграммы представлен на рис. 6. По оси ординат показано количество воздействий (пачки импульсов).

Используя комбинированную систему, состоящую из инфразвукового комплекса и электронного флюксметра (см. рис. 7), можно определить расстояние до источника инфразвука. Приведённый пример электронного флюксметра служит для иллюстрации измерения электростатического поля



Рис. 5. Внешний вид микробарометра

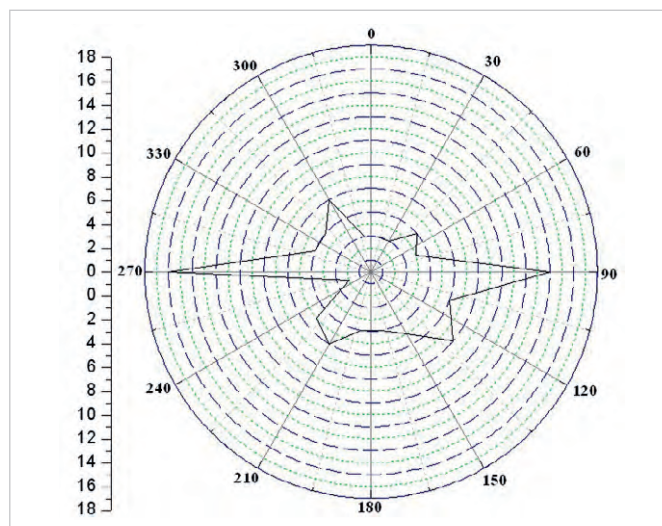


Рис. 6. Иллюстрация диаграммы направленности как результат определения импульсов ИНЧ

вблизи поверхности Земли. Электромагнитная система обнаружения сейсмической активности и грозовых разрядов подробно описана в [2].

Выводы делают при определении таких параметров, как скорость акустической волны ИНЧ, её направление – от источника и расстояния до инфразвукового события. На рис. 8 представлена структурная схема измерительно-вычислительного комплекса с использованием электрической антенны (ЭА).

На рис. 9 представлена иллюстрация временной задержки между электрическим импульсом возмущения атмосферы и импульсом ИНЧ.

Из этого следует, что за электрическим, электромагнитным или акустическим импульсом в атмосфере с небольшой задержкой следует импульс ИНЧ. Как сказано выше, инфразвуковые сигналы условно разделяют на представляющие одиночный импульс и множественный сигнал, представляющий серию импульсов. Спектральный пик регистрируемых инфразвуковых сигналов находится на частоте примерно 1 Гц на фоне общего повышения уровня шумов в конкретной ситуации. Из-за низкой частоты колебаний длина волны составляет несколько метров. В силу этой особенности обнаружение и регистрация инфразвука представляют определённые трудности. Устройства обнаружения (датчики) для работы на большой дистанции должны иметь значительные размеры. Только так корректно источник инфразвука может быть зафиксирован на расстоянии в несколько километров. Сложность также в том, что упругие механические колебания среды распространения смешиваются с механическими колебаниями не инфразвуко-



Рис. 7. Электронный флюксометр с открытой крышкой

вой природы. Так, датчики инфразвука требуют защиты от наводимых ветром помех и других возмущений от близкорасположенных объектов. Вот почему для корректного обнаружения, как правило, применяют комплексный диагностический центр, в составе которого и сейсмический, и акустические датчики [11].

Варианты защиты РЭА в околокосмическом пространстве

Особое значение в условиях возможного несанкционированного воздействия импульсами, в том числе инфранизкой частоты, уделяют защите многофункциональной РЭА от ионизирующего излучения с помощью «экранов», корпусов из материалов, ослабляющих проникновение излучения, причём установлено, что экранирующее оборудование под воздействием «принятого» излучения может само являться источником вторичного излучения в виде нейтронов, гаммаквантов, протонов и других тяжёлых частиц [1]. Интересные статистические данные зафиксированы с помощью искусственных спутников Земли на околоземных орбитах. Данные

свидетельствуют об одиночных сбоях РЭА за определённый период времени, в частности, сбоях в работе интегральных микросхем динамической памяти [8]. Это связывают не только с радиационной активностью разных слоёв атмосферы, но и с воздействиями инфразвуком. Исследователи получили информацию в том числе с помощью электронной компонентной базы индийской навигационной спутниковой системы IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) и NAVIC (Navigation with Indian Constellation – навигация с использованием индийской системы спутников).

Цели и задачи таких систем нормативны, предметны и практичны: связаны с решением проблематики надёжности и функциональной устойчивости РЭА в околокосмическом пространстве, в том числе радиационной стойкости и невосприимчивости к инфразвуковым воздействиям. Уровень радиационной нагрузки на аппаратуру на различных орбитах, даже условия проникновения через защитные экраны, а также условия и предложения по дополнительной защите РЭА от воздействия ионизирующих излучений представлены в [8]. Так, для орби-

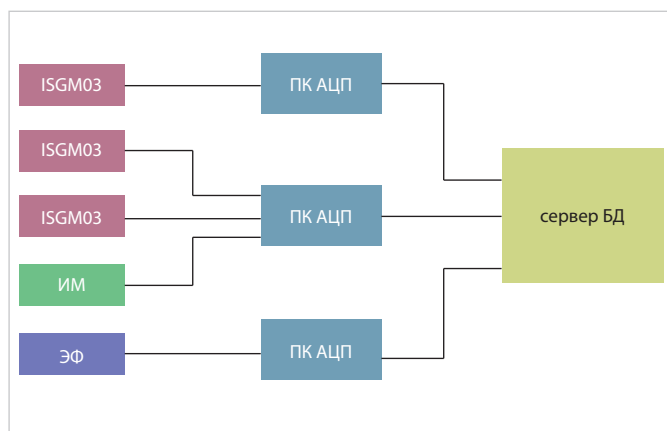


Рис. 8. Структурная схема измерительно-вычислительного комплекса

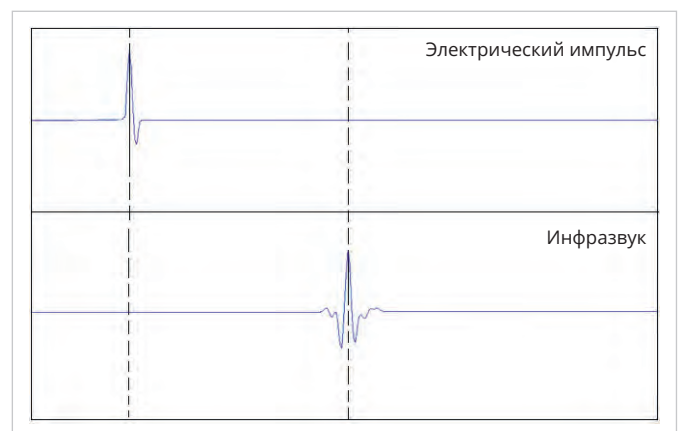


Рис. 9. Иллюстрация временной задержки между электрическим импульсом возмущения атмосферы и импульсом ИНЧ

ты высотой 1000...3000 км для обеспечения стойкости РЭА к воздействию ИИ уровня 10 крад дополнительная защита в 2-3 раза увеличивает массу аппаратуры, а для обеспечения стойкости оборудования к воздействию ИИ уровня 100 крад масса увеличивается примерно на 30%.

Варианты применения сигналов ИНЧ на Земле

Актуальность вопроса прослеживается и в возможностях и результатах военного применения инфразвука. Тема сама по себе не секретная, важны детали, а за подробностями мы отсылаем заинтересованных лиц к публикациям в открытом доступе. Не секрет, что инфразвуковое оружие, результативная суть применения которого ориентирована как на личный состав (людей), так и на выведение из строя техники, разрабатывается давно, с середины XX века. Условно недорогое, но эффективное средство хотели бы для безопасности иметь многие. Доказано, что в зависимости от частоты генерации инфразвук создаёт для человека паническое состояние, может вызывать сумасшествие, страх, потерю контроля над обстоятельствами, ухудшение самочувствия и даже летальный исход [11]. Вопрос до конца не изучен, однако некоторые нюансы известны: инфра-оружие направленного действия может приводить к дестабилизации обстановки как на поле боя, так и в гражданской жизни, и полицейских функциях, к примеру, для разгона демонстраций. Неосознаваемый страх, непонимание причинно-следственной связи его возникновения имеет место при определённом воздействии инфразвука на человека. Предполагают, что даже после однократного воздействия у человека возникает стойкий иммунитет против совершения определённых действий.

Влияние инфразвуковой волны на конструкции и состояние человека

Инфразвук представляет собой звуковые волны низкой частоты, не слышимые человеком. За верхний уровень частот инфразвука принято считать 16 Гц. Наименьший уровень диапазона 0,001 Гц. На практике интерес представляют колебания, имеющие десятую или сотую доли герца.

Кроме природных и техногенных воздействий источниками инфразвука могут быть:

- средства наземного, воздушного и водного транспорта;
- компрессоры, мощные вентиляционные системы и системы кондиционирования, создающие уровни звукового давления >100 дБ на частоте 20 Гц, 98 дБ на частоте 4 Гц, 85 дБ на частоте 2...8 Гц;
- пульсация давления в газообразных смесях;
- здания и сооружения;
- движение человека и животных;
- землетрясения, извержения вулканов, грозные разряды, шторм, ветер.

По временным характеристикам инфразвук подразделяется на постоянную и хаотичную параметрическую характеристику, определяемую тем, что уровень звукового давления изменяется за время наблюдения в 2 и более раз.

Источниками ИНЧ также являются грозные разряды, сейсмическая активность при землетрясениях. Инфразвуковые колебания слабо поглощаются в естественной среде и могут перемещаться на значительные расстояния по поверхности земли, воды и воздуха. Поэтому с помощью специальных датчиков удаётся определить расположение эпицентра землетрясения, мощного взрыва либо даже отдельного выстрела из артиллерийской установки. Инфразвук представляет собой физическое тело с колебательными (причём изменяемыми) движениями определённой частоты. Частота собственных колебаний снижается с увеличением размеров объекта, также инфразвуковые волны появляются при колебаниях или перемещениях объекта с условно большой скоростью. Это легло в основу определения скорости, направления и силы источника инфразвука. Генераторами незатухающих волн являются устройства, напоминающие мощные по воздействию «свистки». Если условная «труба» имеет один закрытый конец, длина волны соответствует 1/4 стоячей волны. К примеру, инфразвуковой «свисток», созданный французским учёным Гавро, имел наибольшую мощность 2 кВт и диаметр в 1,5 м. При испытаниях оборудования инфразвуковые волны приводили к появлению трещин на стенах на расстоянии в радиусе 500 м. Отсюда понятно, что инфразвуковые волны лучше проникают в помещения, чем звуковые. Действие волн ИНЧ объясняется резонансной природой [11]. В случае приближения частот колеба-

ний тела к частотам внешней инфразвуковой волны наблюдается эффект резонанса. Именно поэтому объясним физический эффект, когда в окнах вылетают стекла при взрыве даже на значительном расстоянии.

В условиях пересечённой местности, особенно в городских условиях компактной и относительно высотной застройки, инфразвуковые волны преломляются и отражаются, в том числе могут оказывать воздействие в обратном направлении. Получаемый резонанс можно регулировать электронными средствами для выполнения различных профильных задач. К примеру, если в XX веке при необходимости «выкурить» из помещения нежелательных лиц применяли шумовые, световые и газовые «методы» воздействия, то теперь к ним добавляется воздействие волнами инфразвуковой частоты, локально разрушающими психику. Причём источник воздействия нельзя определить без специального оборудования. Для обнаружения инфразвука рекомендованы устройства, основанные на принципе резонансного вибратора; упрощённо прообразы: струны, рупоры, трубы. Такие формы приняты за основу для совершенствования и создания на их основе электронных устройства из-за удобного к последующему усилению резонанса, возникающего при воздействии инфразвука. Из недостатков устройств относительно узкий диапазон обнаруживаемых ИНЧ, в том числе из-за узкой АХЧ, совпадающей с собственной резонансной частотой, и относительно большие размеры с диаметром в несколько метров ввиду необходимой кратности длинам обнаруживаемых волн. Преимуществом в данном случае является высокая чувствительность и КПД.

Вибрация относится к факторам высокой биологической активности. Выраженность ответных реакций обуславливается главным образом силой энергетического воздействия и биомеханическими свойствами человеческого тела как сложной колебательной системы. Это обосновано тем, что колебательные процессы присущи живому организму, они постоянно имеются. Поэтому внутренние органы человека рассматривают как колебательные системы с упругими связями.

В целом волны с частотой инфразвука оказывают неблагоприятное влияние на человека. При длительном

воздействии у людей появляется раздражение, головная боль и усталость. Физиологические свойства типичного homo sapiens таковы: если человек спокойно лежит, «рабочая» частота тела примерно 4 Гц, в стоячем положении составляет 5...12 Гц. Почти каждый жизненно важный орган имеет свою частоту колебаний, следовательно, воздействие на него посредством резонанса частот возможно, что в некоторых случаях приводит к тяжёлым последствиям для здоровья. Резонанс человеческого тела, отдельных его органов наступает под действием внешних сил при совпадении собственных частот колебаний внутренних органов с частотами внешних сил. Для брюшной полости частота колебаний составляет 3...4 Гц, для грудной клетки – в пределах 6...8 Гц. При возникновении резонанса человеку субъективно кажется, что внутренние органы начинают вибрировать. Причину явления видят в резонансном эффекте. При повышении частот колебаний более 0,7 Гц возможны чётко осознаваемые резонансные колебания. Область резонанса для головы в положении сидя при вертикальных вибрациях наблюдается в диапазоне 20...30 Гц, при горизонтальных – 1,5...2 Гц. Особое значение резонанс приобретает по отношению к органам зрения. Расстройство зрительных восприятий проявляется в частотном диапазоне 60...90 Гц, что соответствует резонансу глазных яблок. Для органов, расположенных в грудной клетке и брюшной полости, резонансными являются частоты 3...3,5 Гц. Для всего тела в положении сидя резонанс наступает на частотах 4...6 Гц.

Инfrasound определённой частоты способен вызвать расстройства мозга, привести к потере зрения и вызвать летальный исход. Поэтому в промышленности, транспорте и жилых домах принимаются разные меры, чтобы снизить воздействие на людей инфразвуковых колебаний – для их безопасности. По аналогичному принципу инфразвуковые волны воздействуют на неживые объекты. Известен реальный пример из истории, когда по каменному мосту, чеканя шаг, передвигался отряд солдат, и при этом возникли резонансные колебания, что привело к разрушению моста.

Тем не менее между ответными реакциями организма и уровнем воздействующей вибрации нет линейной зависимости. Мощность колеба-

Таблица 1. Сведения о влиянии импульсов НЧ и ИНЧ, вибрации на организм человека

Амплитуда колебаний, мм	Частота, Гц	Результат воздействия
< 0,015	Различная	Влияние не обнаружено
0,016–0,05	30–40	Нервное возбуждение, приводящее с накопительным эффектом к депрессии
0,051–0,1	15–20	Опасные, необратимые изменения в ЦНС, органах слуха, работе основных органов
0,101–0,3	50–150	Возможно заболевание
0,101–0,3	150–250	При накопительном эффекте возможно заболевание
0,101–0,3	Менее 1	Опасно потерей контроля над ситуацией

тельного процесса в зоне контакта и время контакта являются главными параметрами, определяющими развитие вибрационных патологий, структура которых зависит от частоты и амплитуды колебаний, продолжительности воздействия, места приложения и направления вибрационного воздействия, демпфирующих свойств тканей, явлений резонанса и других условий. Среди людей, часто путешествующих в автомобильном транспорте и по железной дороге (особенно в последнем варианте), значительный процент страдающих в условной старости болезнями коленных суставов, артритами разного свойства, что связано с ритмичным воздействием на организм человека, в частности коленные суставы и связки, импульсов ИНЧ, создаваемых при движении транспорта. Причём эти недомогания возникают без всяких иных травм и «спортивной» активности. Вибрационная патология стоит на втором месте (после пылевых) среди профессиональных заболеваний. Частота заболеваний определяется дозой, а особенности клинических проявлений формируются под влиянием спектра вибраций. Выделяют три вида вибрационной патологии: от воздействия общей, локальной и толчкообразной вибраций. Кроме того, принято различать три формы вибрационной болезни: периферическую – возникающую от воздействия вибрации на руки (спазмы периферических сосудов, изменение цветовой окраски (малокровие) пальцев рук на холоде, ослабление подвижности и боль в руках в покое и ночное время, потеря чувствительности пальцев, гипертрофия мышц); церебральную – от преимущественного воздействия вибрации на организм человека (общемозговые сосудистые нарушения и поражение головного мозга); смешанную – при совместном воздействии общей и локальной вибрации.

В табл. 1 представлены сведения о влиянии импульсов НЧ и ИНЧ и вибрации на организм человека.

Современные средства измерения инфразвука

На практике для обнаружения инфразвуковых волн используют в основном компактные датчики, преобразующие акустические колебания в электрические сигналы с их дальнейшим усилением и обработкой средствами электроники. Инфразвуковые колебания уместно измерить с помощью микрофона, чувствительного к звуковому давлению на НЧ и подключённого через полосовые фильтры к метрологической системе или АЦП с дальнейшим выводом аналитических данных на ПК. Естественные инфразвуковые колебания исследуют для уточнения природной «жизни» океанов, атмосферы, в том числе нахождения мест, где происходят или происходили взрывы, или извержения вулканов. Предсказывают цунами и контролируют проведение даже подземных ядерных и иных испытаний. Для регистрации инфразвуковых волн используют геофоны, гидрофоны или микрофоны. В электронике бытового назначения инфразвуковыми называются пассивные и активные датчики проникновения, регистрирующие изменение давления (возникновение низкочастотной звуковой волны) в помещении. Неравномерность АЧХ микрофона в области НЧ и ИНЧ влияет на возможность корректного измерения уровня инфразвука с использованием широкополосного фильтра. В переносных электронных системах контроля изменения инфразвукового фона используют конденсаторные микрофоны, у которых калибровочные поправки находятся в пределах: ±0,2 дБ (для частоты 16 Гц), ±0,3 дБ (для частоты 8 Гц), ±0,5 дБ (для частоты 4 Гц), ±1,0 дБ для частоты 2 Гц. С чувствительностью звукового давления



Рис. 10. Инфразвуковые датчики

10...50 мВ/Па. Они имеют номинальный частотный диапазон вплоть до нижней частоты 1...2 Гц. Об этом рассказано в [5].

Звуковые волны, возникающие в таких ситуациях, как, к примеру, хлопанье дверью с последующей вибрацией дверной коробки, распространяются с частотой ниже 2 Гц. Относительный «минус» применения в том, что поступление наружного воздуха в условно закрытое помещение (в связи с открытым окном или дверью) может вызвать ложные сигналы тревоги. Пассивные акустические датчики относятся к категории пассивных волнометрических датчиков. Типичный акустический датчик состоит из микрофона, усилителя и электронного блока обработки сигналов. Обработка сигналов – в фильтрации, подсчёте импульсов и (или) в интеграции импульсов и шумов. К примеру, устройство «Экофизика-110А» в максимальной комплектации способно измерять не только инфразвук, но и шум, вибрацию, и ультразвуковые волны, создаваемые даже воздушным потоком. Комплектуется следующими элементами: МИ ПКФ-14-012 (для измерения инфразвука в помещениях жилых и общественных зданий), МИ ПКФ-14-016 (инфразвук на рабочих местах в помещениях и на территории), МИ ПКФ-19-056 (инфразвук в условно контрольной точке). Либо нужно применять устройство типа «Экофизика-110А» (конфигурация HF-L) в комплекте с микрофоном и предусилителем, с дополнительными антеннами П6-7Х.

Ультранизкочастотные конденсаторные микрофоны свободного поля также подходят для высокочастотного инфразвука от 0,5 Гц и выше, к примеру, 40AZ, BSWA MP-201 и др. Так как ЭДС чувствительных элементов связана не с амплитудой движения чувствительной мембраны, а с ускорением её движения, то при инфразвуке (одно

колебание за несколько секунд) ЭДС в капсулях практически отсутствует, из-за чего инфразвук невозможно регистрировать микрофонами. В этой ситуации помогают специальные устройства – микробарометры. Но и у них есть ограничения. Инфразвук является упругими колебаниями среды распространения, представляющими чередующиеся зоны сжатия, периодическое изменение давления (с периодичностью 1 колебание в несколько секунд) по фронту распространения, поэтому импульсы инфразвука возможно зафиксировать микробарометрами. Условно «высокочастотный» инфразвук невозможно фиксировать микробарометрами из-за их реактивности (не успевают реагировать на относительно быстрые незначительные изменения звукового давления).

Компактные датчики инфразвука применяются в инфразвуковых станциях обнаружения и мониторинга за испытаниями вооружений различного свойства, в системах раннего оповещения о природных катаклизмах (бури, цунами), в шумомерах-анализаторах [4], [10]. Поэтому более удобно осуществлять прямое измерение акустических уровней и силы из воздействия в среде инфразвука с помощью комбинированного шумомера, оснащённого подходящим встроенным набором фильтров, анализатором спектра и чувствительным микрофоном. Так больше шансов установить различные виброакустические факторы. Кроме прочего, для измерения инфразвуковой вибрации отечественные разработчики ранее использовали шумомер ВШВ 003-М2 – для измерения и частотного анализа параметров шума и вибрации, шумо-вибро-интегратор ШВИЛ-01 – для измерений эквивалентных уровней непостоянного шума и локальной вибрации, вибромер ВВМ-201 – для измерения параметров вибрации, ШВИЛ-01ДМ – для измерения инфразвука, общей, транспортной, технологической и коммунальной вибрации, а также функциональные аналоги – виброметр М-1300, снабжённый фильтрами (Robotron) и шумомер 2231 (4322 фирма «Брюль и Кьер») [10]. Такие инфразвуковые датчики представлены на рис. 10.

По международным стандартам принято оценивать инфразвук только по степени воздействия на органы слуха. Например, частотная коррекция G (ISO 7196) обеспечивает максимум пропускания для частоты 20 Гц, в непосредственной близости к нижней октаве слышимого диапазона частот. Поэтому при выборе оте-

чественными разработчиками элементов РЭА для измерения инфразвука важно убедиться, что они могут контролировать параметры, предусмотренные российскими гигиеническими нормативами.

Реальные примеры исследования с помощью инфразвука

Много привлекающих внимание слухов ходит о Коробовой яме в окрестностях Верховья, Вологодской области, к примеру, старожилы свидетельствуют: когда проезжали по дороге мимо Коробовой ямы (она отстоит от лесной дороги на 100 м), по неизвестной причине вышибало дуги в лошадиной упряжке. Название приводим местное, от старожил; значение происходит от речки Коробовая, протекающей рядом. На практике в 2023 году этой речкой оказался едва пробивающийся в лесу ручёк. Название его происходит от слова «корб», что на вепском языке обозначает «глухой лес». Альтернативное название «ямы» в виде аэропорта для НЛО – «Верховский кратер». Поговаривают, что именно сюда упал осколок метеорита, а также об иных «чудесах», исцелениях и аномальных явлениях, якобы связанных с местом. Не исключено, что кратер Коробовой ямы является «вершиной» природного газового источника. Разумеется, находясь по случаю в условно аномальном районе, корреспондент не мог не заинтересоваться неопознанным доселе явлением. Теперь мы не только знаем, где находится Коробовая яма, но даже исследовали её «вдоль и поперёк». Это относительно пологий кратер 16 м в глубину и 42 м – в диаметре. Её вид представлен на рис. 11.

Поляна, как видно из иллюстрации, настолько ровная и аккуратная, что невольно возникает мысль о посадке в этом месте некоего НЛО. Поразили не столько просторы и красота окружающей кратер природы, но и то, что на месте, как бы геологи и исследователи ни «ломали копыя», озадачившись вопросом: здесь ли происходят аномальные явления в Верховажском районе Вологодской области, испытываешь благоговейный трепет. Постояв в эпицентре «кратера» в течение 15 минут, человек ощущает необъяснимую тревогу и головную боль. Кроме того, по основаниям тревожности вполне уместно допустить наличие импульсов инфранизкой частоты. По координатам 60,6522 с. ш., 41,84993 в. д. представлено это место вблизи н. п. Боровичиха, очередной базы исследований, о которых рассказано в [6].



Рис. 11. Аномальный кратер Коробовой ямы



Рис. 12. Приборы учёта и контроля для исследования кратера Коробовой ямы в 2023 году

Однако с помощью приборов сейсмической активности, инфразвуковых тестеров, а также датчиков, фиксирующих СВЧ-излучение и радиационную обстановку, удалось выяснить, что по состоянию на май 2023 года никаких отклонений, включая радиационную составляющую, в кратере не обнаружено, несмотря на различные мнения и результаты ранее проведённых исследований. Возможно, в аномальном месте необходимо более детальное обследование с помощью приборов профессионального класса. Однако кроме прочих исследователей и мы застолбили право ими заниматься в том числе с помощью виброметров и волнометрических датчиков. На рис. 12 представлен вид разных приборов контроля.

Особенность измерений инфразвука на местах ещё и в том, что до проведения измерений исследователь лишь предполагает инфразвук по наличию возможного источника. В движущемся с высокой скоростью автомобиле или поезде человек подвержен воздействию инфразвука. Однако если источник или характер функционирования ИНЧ непостоянен или неизвестен (типичная ситуация в приведённом выше примере с Коробовой ямой) – определение периодов воздействия инфразвука усложняется.

Выводы

Комбинированная система обнаружения возмущения атмосферы с использованием инфразвукометрического комплекса перспективна для определения угроз сейсмического и в целом техногенного характера. Совершенствование исследований и разработок в области фиксации импульсов ИНЧ в атмосфере и на земле позволит не только контролировать их, но и выработать защиту от инфразвуково-

го оружия, разработки которого с разным успехом ведутся в разных странах. Как и любое направление в науке и технике, результаты совершенствования устройств и приборов, работающих с инфразвуком, – как мирный и немирный атом – люди станут использовать по-разному. Мы показали, что метод контроля с помощью определения импульсов ИНЧ может быть перспективен как в атмосфере, так и на земле, и привести к неожиданным результатам там, где другие приборы контроля аномалии не определяют, а человек при этом чувствует недомогание. Мы показали, что при определённой частоте, связанной с электрическим резонансом, импульсами ИНЧ можно воздействовать на человека, его гармоничное состояние и активность, что может быть также для него опасно. Предупреждённый – защищён. Очевидно, что существует и много положительных перспектив. Польза воздействия инфразвуковыми волнами признана современной медицинской практикой, в частности для удаления опухолей при лечении рака, болезней рогаковицы (электронный инфразвуковой фонофорез) и др. случаях по медицинским показаниям. При этом человеческое ухо не воспринимает инфразвук, что не делает его менее опасным. Поэтому гигиенические нормативы допустимого уровня инфразвука установлены как для рабочих мест, так и для мест проживания (в быту).

Литература

1. Безродных И.П., Тютнев А.П., Семенов В.П. Радиационные эффекты в космосе. М.: ОАО «Корпорация ВНИИЭМ», 2014. 106 с.
2. Вознесенская К.В. и др. Электромагнитная акустическая система обнаружения грозозых разрядов // URL: <https://cyberleninka.ru/>

article/n/elektromagnitnaya-akusticheskaya-sistema-obnaruzheniya-grozovyh-razryadov.

3. Инфразвук. Особенности и влияние // URL: <https://electrosam.ru/glavnaja/jelektrotehnika/infrazvuk/>.
4. Инфразвуковые датчики // URL: <https://shamrin.ru/infrazvukovoy-datchik-printsip-raboty/>.
5. Кашкаров А.П. 500 схем для радиолюбителей. Электронные датчики. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Наука и Техника, 2007. 208 с.
6. Кашкаров А.П. Автономное электроснабжение частного дома своими руками. ВикиЧтение // URL: <https://hobby.wikireading.ru/17927>.
7. Коробко В.И. Безопасность жизнедеятельности: учеб. пособие для бакалавров. М.: АНО ВО «Институт непрерывного образования», 2016. 347 с.
8. Кравчук С.В., Соколов В.Н. и др. Ионизирующее излучение космического пространства и конструирование радиационно-стойких приборов для систем управления космическими аппаратами. Ч. 1 // Современная электроника. 2023. № 5. С. 35. URL: <https://www.soel.ru/online/ioniziruyushchee-izluchenie-kosmicheskogo-prostranstva-i-konstruirovanie-radiatsionno-stoykikh-pribo/>.
9. Система обнаружения ядерного взрыва // URL: https://dev.abcdef.wiki/wiki/Nuclear_detonation_detection_system.
10. Средства измерения инфразвука // URL: https://hygiene.octava.info/sredstva_izmereniya_infrazvuka.
11. Kase P.G. The radiation environments of outerplanet mission // IEEE Trans. 2022. Vol. NS-19, № 6. P. 141–146.
12. Science XXI. Необычные низкочастотные сигналы из стратосферы зафиксированы аэростатами // URL: https://sciencexxi.com/neobychnye-nizkochastotnye-signalny-iz-stratosfery-zafiksirovany-aerostatami/?utm_source=uxnews&utm_medium=desktop.

Современные кварцевые и рубидиевые генераторы

Юрий Иванов (компания МОРИОН)

В качестве источников опорной частоты в телекоммуникационной аппаратуре чаще всего используются рубидиевые или прецизионные кварцевые генераторы. Каждый из этих типов генераторов обладает своими достоинствами и недостатками, при этом их стабильности могут быть вполне сопоставимы в конечном итоге. Для начала давайте немного разберёмся в их внутреннем устройстве.

Сердцем кварцевого генератора является кварцевый резонатор. Это изготовленная особым образом пластина кварца, на которую с двух сторон нанесены электроды. Она является высокочастотным механическим резонатором, а благодаря пьезоэффекту его становится возможно связать с электрической схемой. В результате чего получается автогенератор. Кварцевый резонатор – высокостабильный компонент, однако с ужесточением требований, предъявляемых к стабильности частоты, становится необходимо принимать дополнительные меры стабилизации, направленные на увеличение стабильности генераторов к влиянию внешних воздействий.

Основу рубидиевого генератора составляет рубидиевая ячейка – стеклянная колба, заполненная парами

изотопа рубидия, которая находится внутри микроволновой камеры со стеклянными окнами с двух сторон. Она просвечивается рубидиевой лампой, а прошедший свет фиксируется фотоприёмником с другой стороны камеры. При этом на камеру подаётся модулированный сигнал от опорного источника (кварцевого генератора). Таким образом, можно точно совместить микроволновый сигнал с резонансной частотой рубидия, так как оптическое поглощение газа рубидия изменяется на резонансной частоте. Стабильность частоты при этом определяется стабильностью атомной линии рубидия.

Стабильность частоты

И для кварцевого, и для рубидиевого генератора основной параметр – стабильность частоты, она зависит от многих факторов. Чаще всего стабильность выражается в долях отклонения от номинальной (первоначальной) частоты. Так, относительное изменение частоты y выражается как

$$y = \frac{(f - f_0)}{f_0} = \frac{df}{f_0},$$

где f – измеренное значение частоты, f_0 – номинальное (или первоначальное) значение частоты.

Давайте посмотрим влияние некоторых внешних факторов на стабильность частоты для этих типов генераторов. Начнём с температурной стабильности.

Частота кварцевого резонатора даже с учётом применения специальных срезов (например, АТ) изменяется на десятки ppm (parts per million, 10^{-6}) при изменении температуры в широких интервалах. С целью повышения стабильности кварцевые генераторы могут включать электрические цепи, компенсирующие это изменение частоты – термокомпенсированные кварцевые генераторы (ТККГ, ТСХО). Либо же содержать в себе термостат, поддерживающий постоянную температуру, внутрь которого размещают резонатор и другие чувствительные к изменению температуры элементы – термостатированные кварцевые генераторы (ТСКГ, ОСХО). Термостатированные кварцевые генераторы могут обеспечить стабильность от единиц 10^{-9} до единиц 10^{-11} . Таким генераторам нужно время после включения для нагрева термостата и выхода на рабочий режим. В самых прецизионных генераторах применяется двойное термостатирование, что влечёт за собой увеличение их габаритов и потребления, зато на выходе получается практически нивелировать влияние температуры. При испытаниях таких генераторов приходится уже устранять влияние старения резонатора (о чём пойдёт речь ниже), проводя несколько циклов и вычитая линейный дрейф. На рис. 1 представлены типовые графики температурной стабильности в интервале температур.

стабильности рубидиевой ячейки также сильно зависит от изменения температуры. Для уменьшения влияния применяется термокомпенсация, что позволяет достичь единиц 10^{-10} и даже чуть ниже. При этом если для термостатированного кварцевого генератора справедливо, что при работе в более узком температурном интервале температурная нестабильность пропорционально уменьшается, то для термокомпенсированного рубидиевого генератора это не работает. На небольшом интервале вполне можно получить полное изменение частоты в рамках нормы во всём интервале. Для наглядности можно сравнить графики ТСКГ и ТККГ на рис. 1.

Следующим типом стабильности является долговременная, т.е. зависимость частоты времени при длительных интервалах наблюдения. Как уже упоминалось, в кварцевых генераторах происходят изменения частоты колебаний резонатора со временем. Частота колебаний резонатора напрямую связана с его толщиной –

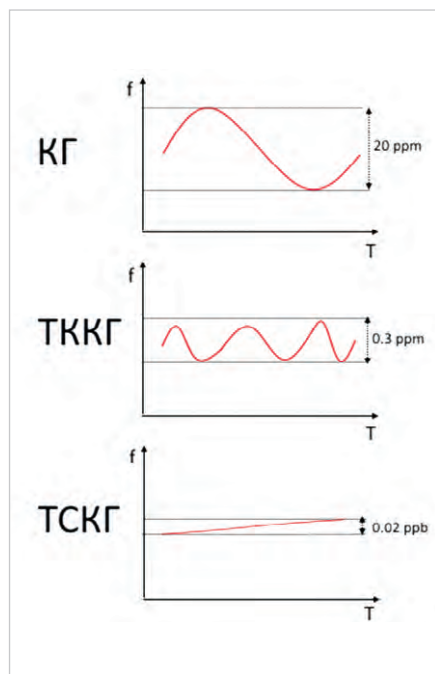


Рис. 1. Зависимость частоты от температуры для разных видов кварцевых генераторов.

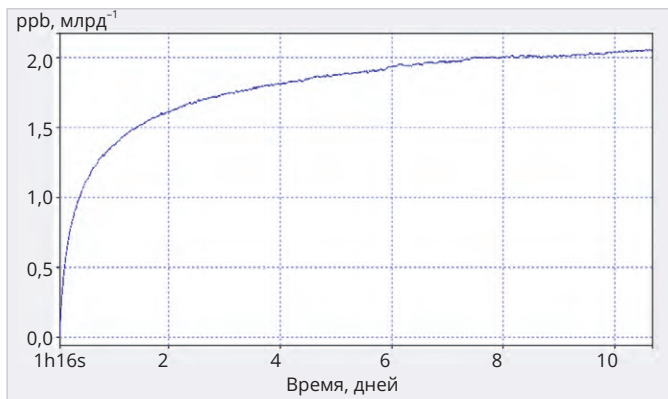


Рис. 2. Типовая зависимость частоты от времени для кварцевых генераторов

основной причиной старения является небольшое изменение толщины в связи с процессами абсорбции и десорбции. Кварцевая пластина содержит примерно 1 млн атомных слоёв, изменения толщины даже на 1 атомный слой достаточно, чтобы частота отклонилась на 1×10^{-6} . Помимо этого, все материалы, используемые в процессе изготовления резонатора, могут немного менять свои характеристики, например, клей, используемый для приклейки электродов, или сами электроды. Обычно частота кварцевого

резонатора изменяется по логарифмическому закону (рис. 2). Направление её изменения может быть произвольным.

Старение генератора зависит от частоты, так, для 10 МГц оно обычно составляет от нескольких единиц 10^{-10} до нескольких единиц 10^{-11} в день. Для 100 МГц примерно на 1 порядок больше – от единиц 10^{-9} до единиц 10^{-10} . Также оно зависит от того, сколько генератор находился во включённом состоянии. Наиболее часто в спецификациях на кварцевые генераторы ука-

зывается величина старения через 30 суток после включения. Если генератор выключается в процессе работы, ему снова требуется время, чтобы выйти на какой-то уровень старения. Так, например, на рис. 3 показаны типовые графики выхода прецизионных генераторов на 10 МГц на разные уровни стабильности в зависимости от длительности выключения.

Так, если генератор показывал старение 5×10^{-11} за сутки и был выключен на 5 суток, ему потребуется проработать 16 дней, чтобы снова выйти

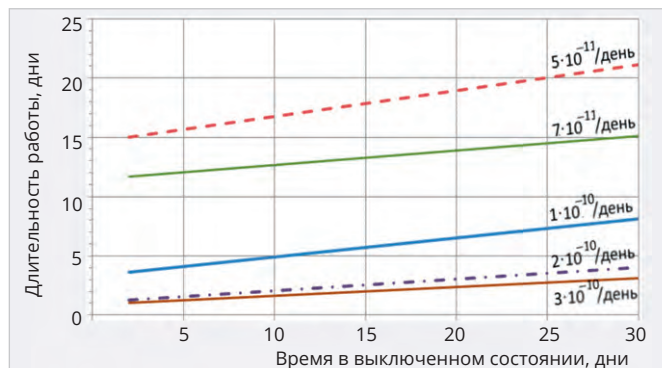


Рис. 3. Типовое время выхода прецизионных генераторов на разные нормы по суточному старению от времени в выключенном состоянии

КВАРЦЕВЫЕ И РУБИДИЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКОВ ОПОРНОЙ ЧАСТОТЫ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ



МОРИОН



RFS-M102

51x51x26 мм

100 нс
400 нс

±5x10⁻¹¹ при -40...+75°C

2x10⁻¹¹/сутки

Потребление:
при вкл. до 1,66 А
в уст. режиме до 0,5 А

девиация аллана на 1 с 2x10⁻¹¹



ГК360-TC

51x51x19 мм

400 нс

400 нс (с учетом компенсации старения)

±1x10⁻¹¹ при -40...+85°C

1x10⁻¹⁰/сутки

до 2 А
до 0,6 А

1x10⁻¹²

ГАБАРИТЫ

ВРЕМЕННАЯ ОШИБКА

ПРИ ПОСТ. t°

ПРИ ПЕРЕМЕН. t° (±5°C)

ТЕМПЕРАТУРНАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ

ПОТРЕБЛЕНИЕ

ПРИ ВКЛ.

В УСТ. РЕЖИМЕ

ДЕВИАЦИЯ АЛЛАНА НА 1 с

КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ • ФИЛЬТРЫ • РЕЗОНАТОРЫ • КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ • РУБИДИЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО • ИЗМЕРИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ПР. КИМА 13А, САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, 199155

WWW.MORION.COM.RU

Реклама

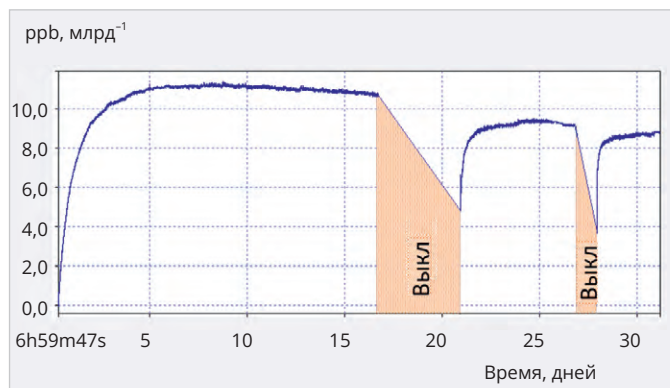


Рис. 4. Влияние выключения питания на частоту кварцевых генераторов

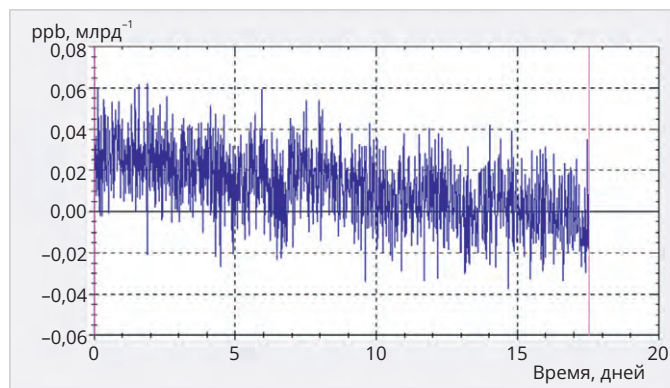


Рис. 5. Типовая зависимость частоты от времени для рубидиевых генераторов

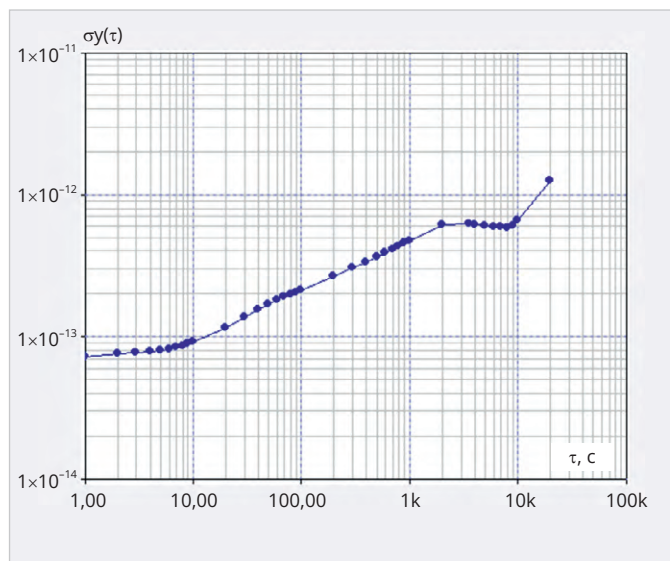


Рис. 6. Девиация Аллана для кварцевого генератора

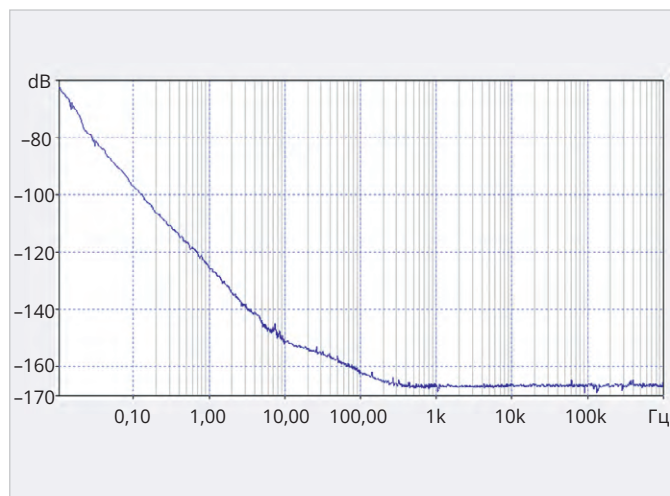


Рис. 7. Относительная спектральная плотность мощности фазовых шумов для ультрапрецизионного кварцевого генератора

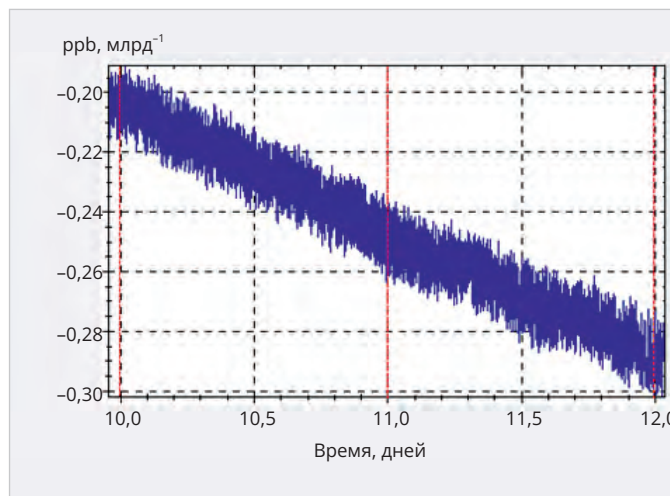
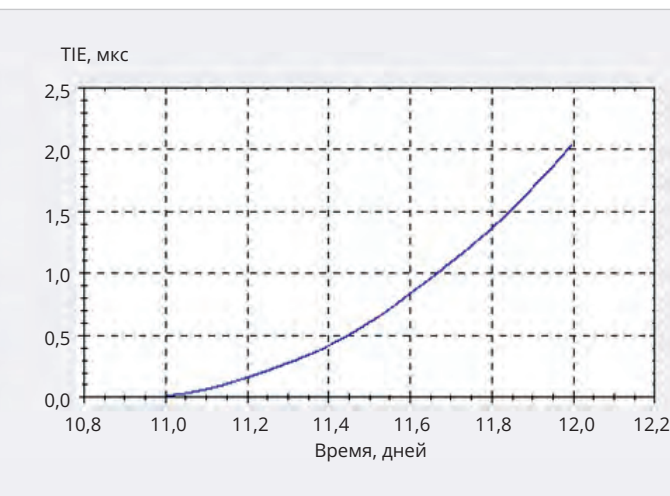


Рис. 8. Уход частоты (слева) и вызванная им временная ошибка (справа)



на уровень 5×10^{-11} . Поэтому всегда желательно обеспечивать постоянный режим работы кварцевого генератора в аппаратуре.

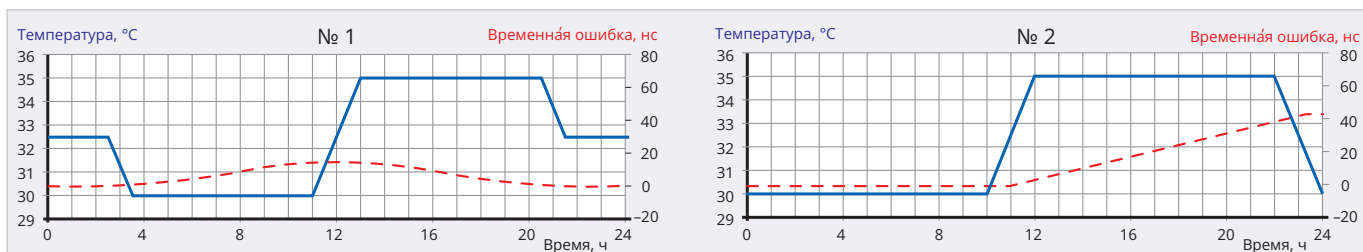
При выключении и последующем включении первоначальный выбег частоты повторяется в каких-то пропорциях. Также при выключе-

нии/включении может наблюдаться ретрейс, сдвиг частоты до 5×10^{-9} .

На рис. 4 показано характерное изменение частоты кварцевого генератора с двумя интервалами, на которых питание с него было снято.

В рубидиевом генераторе гораздо меньше компонентов, изменя-

ющих свои свойства со временем. В процессе работы состав и давление компонентов наполнения оптических элементов медленно изменяются (диффузия внутри стенок ячеек, натекание газов извне и т.п.), что приводит (в том числе за счёт изменения фильтрации излучения и через световой сдвиг) к



Примечание: Профиль 1 (слева) абсолютно симметричен в течение суток – максимум временной ошибки при таком профиле ~15 нс, при этом через 24 часа она равна 0. Профиль 2 (справа) несимметричен – максимум временной ошибки ~45 нс. Для оценки временной ошибки мы используем именно его

Рис. 9. Влияние температурного профиля на временную ошибку

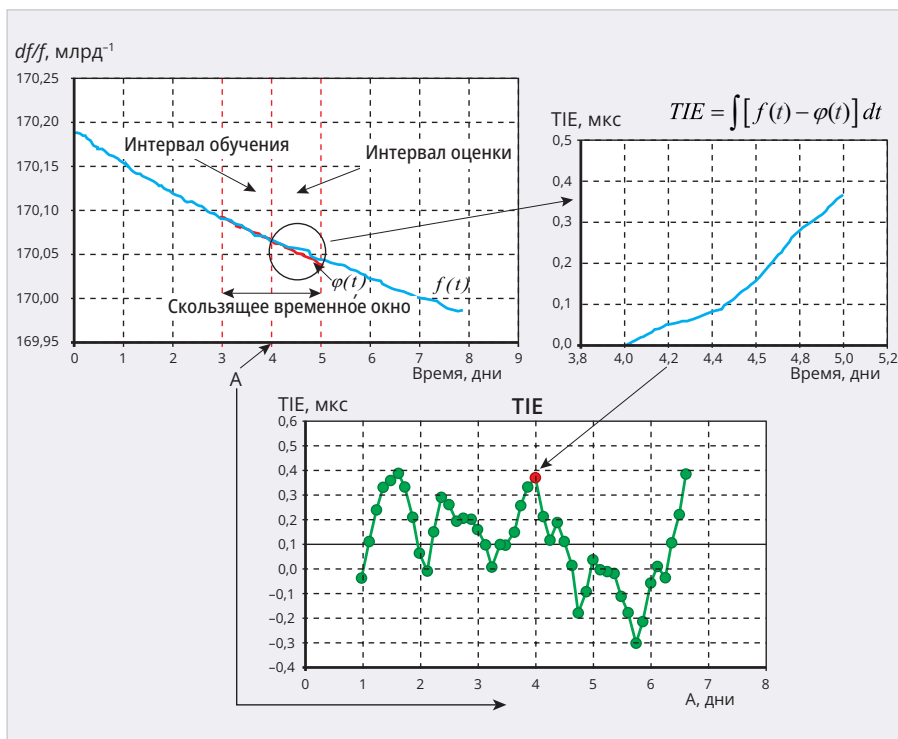


Рис. 10. Методика оценки временной ошибки

сдвигу частоты эталонного перехода. Значения данных параметров могут изменяться под влиянием изменений температуры окружающей среды и атмосферного давления, что также

приводит к периодическим уходам частоты эталонного перехода. В результате проявления описанных выше процессов в зависимости от конкретной модификации прибора может проис-

ходить относительное систематическое изменение частоты выходного сигнала. Но этот систематический дрейф довольно мал по сравнению со старением кварцевого генератора. Это позволяет говорить об очень малой долговременной нестабильности и, что немаловажно, очень быстром выходе на неё.

Типовая картина долговременной прописи частоты для рубидиевого генератора показана на рис. 5.

Обратите внимание, что представленный на рис. 5 график довольно шумный. Это следствие его относительно низкой стабильности на коротких временах, в частности за 1 с. Кратковременная стабильность зависит, в первую очередь, от электрических шумов компонентов, входящих в состав генератора. Её измерение возможно как во временной, так и в частотной области. Во временной области для этого в основном служит девиация Аллана, а в частотной – чаще всего выражается однополосным фазовым шумом $L(f)$.

Девиация Аллана, она же средне-квадратичное двухвыборочное отклонение (СКДО), вычисляется следующим образом:

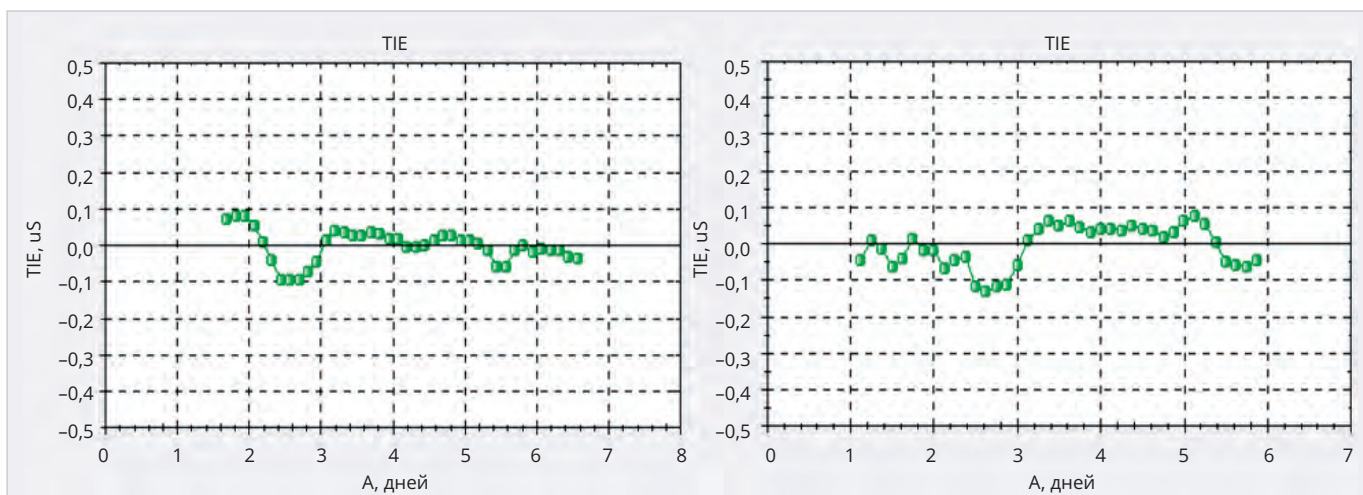


Рис. 11. Временная ошибка двух рубидиевых генераторов при постоянной температуре

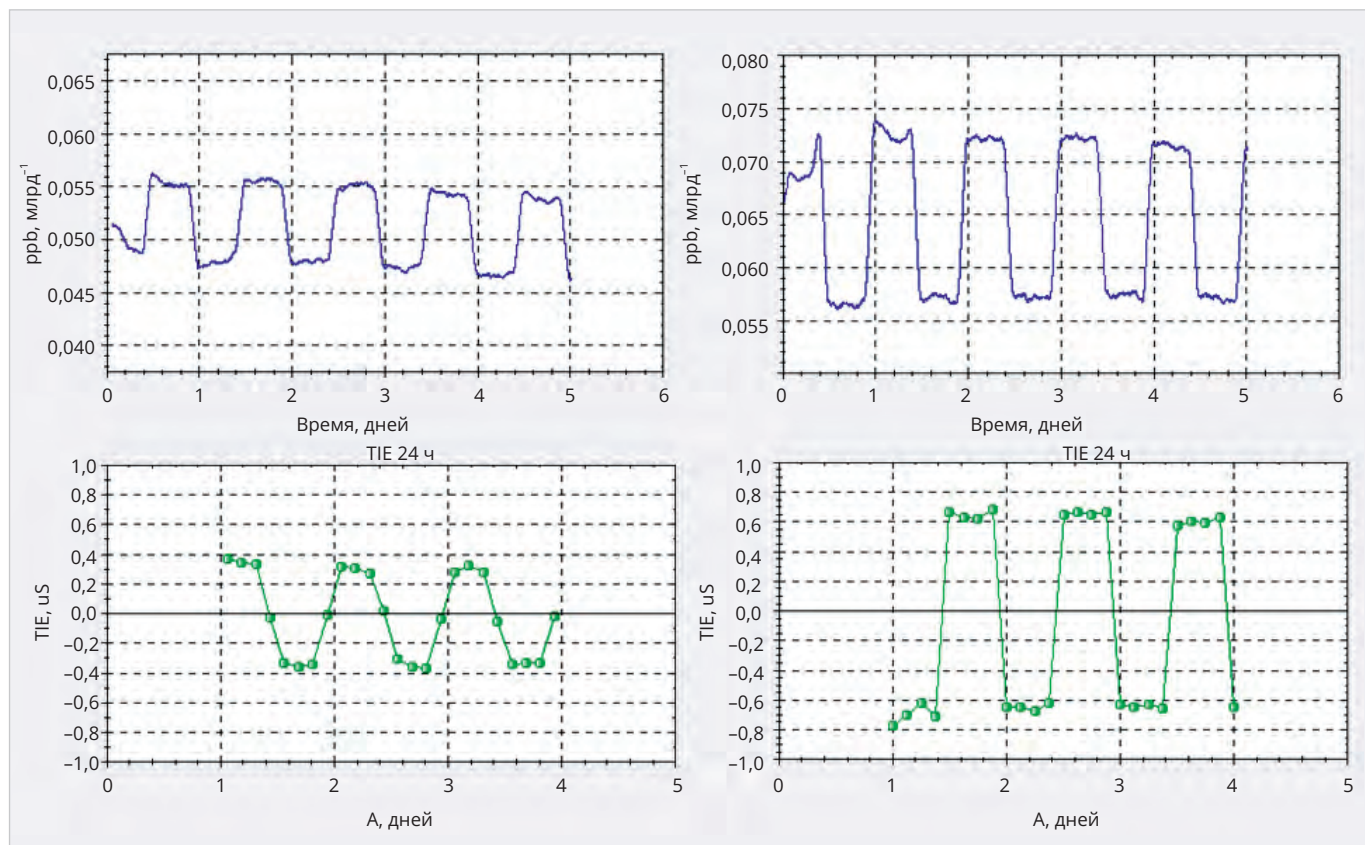


Рис. 12. Временная ошибка двух рубидиевых генераторов в условиях небольших ($\pm 5^\circ\text{C}$) изменений температуры

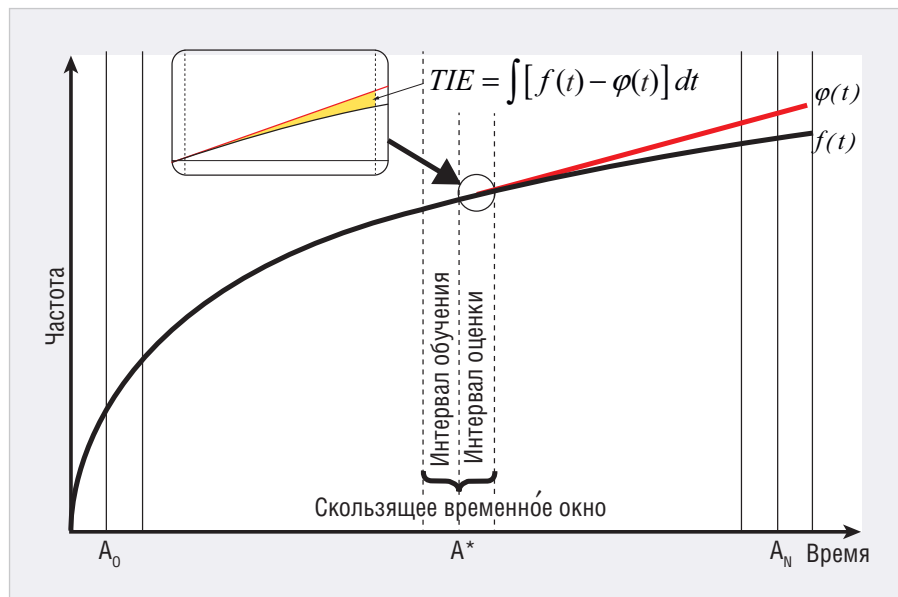


Рис. 13. Компенсация старения кварцевых генераторов

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M-1)} \sum_{k=1}^{M-1} (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2,$$

где M – количество усреднений, y – отсчёты частоты, усреднённые за время τ .

Для прецизионных кварцевых генераторов СКДО может достигать 7×10^{-14} и даже меньше при времени усреднения, равном 1 с. С увеличением времени усреднения всё больше начинает сказываться старение, и СКДО идёт вверх. Для качественной оценки на длительных интервалах усред-

нения кварцевый генератор должен быть непрерывно включён в течение длительного времени для выхода его старения на полку. Характерная кривая показана на рис. 6.

Рубидиевые генераторы обладают большим значением СКДО на малых временах усреднения (10^{-11} на 1 с), но при этом с увеличением времени это значение уменьшается.

Однополосный фазовый шум представляет собой отношение спектраль-

ной плотности мощности, измеренной на определённой частотной отстройке в полосе 1 Гц, к полной мощности сигнала на несущей (номинальной) частоте и выражается в дБн/Гц (децибелы относительно несущей в полосе 1 Гц). Спектральная плотность мощности является непрерывной функцией отстройки по частоте и представляет в виде графика.

На рис. 7 показан график фазовых шумов для ультрапрецизионного кварцевого генератора.

Временная ошибка

При использовании в телекоммуникационных системах чаще всего применяют интегральный показатель нестабильности – временную ошибку. Он показывает отклонение времени в режиме удержания (Holdover) и выражается в долях секунд за некоторый интервал времени (1 мкс за 24 часа, 3 мкс за 72 часа, 500 нс за 12 часов и т.п.).

Наибольший вклад во временную ошибку вносят долговременный уход и реакция на изменение температуры. Как было описано, рубидиевые генераторы обладают очень малым значением долговременного ухода, а прецизионные кварцевые генераторы могут обладать крайне малой температурной нестабильностью.

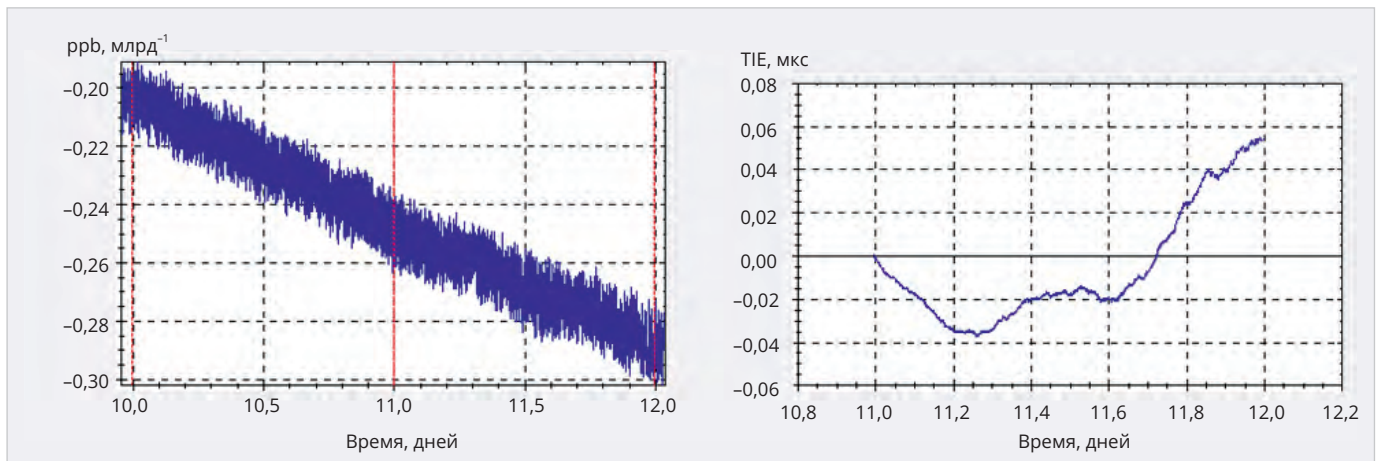


Рис. 14. Уход частоты (слева) и вызванная им временная ошибка (справа) с учётом линейной компенсации старения

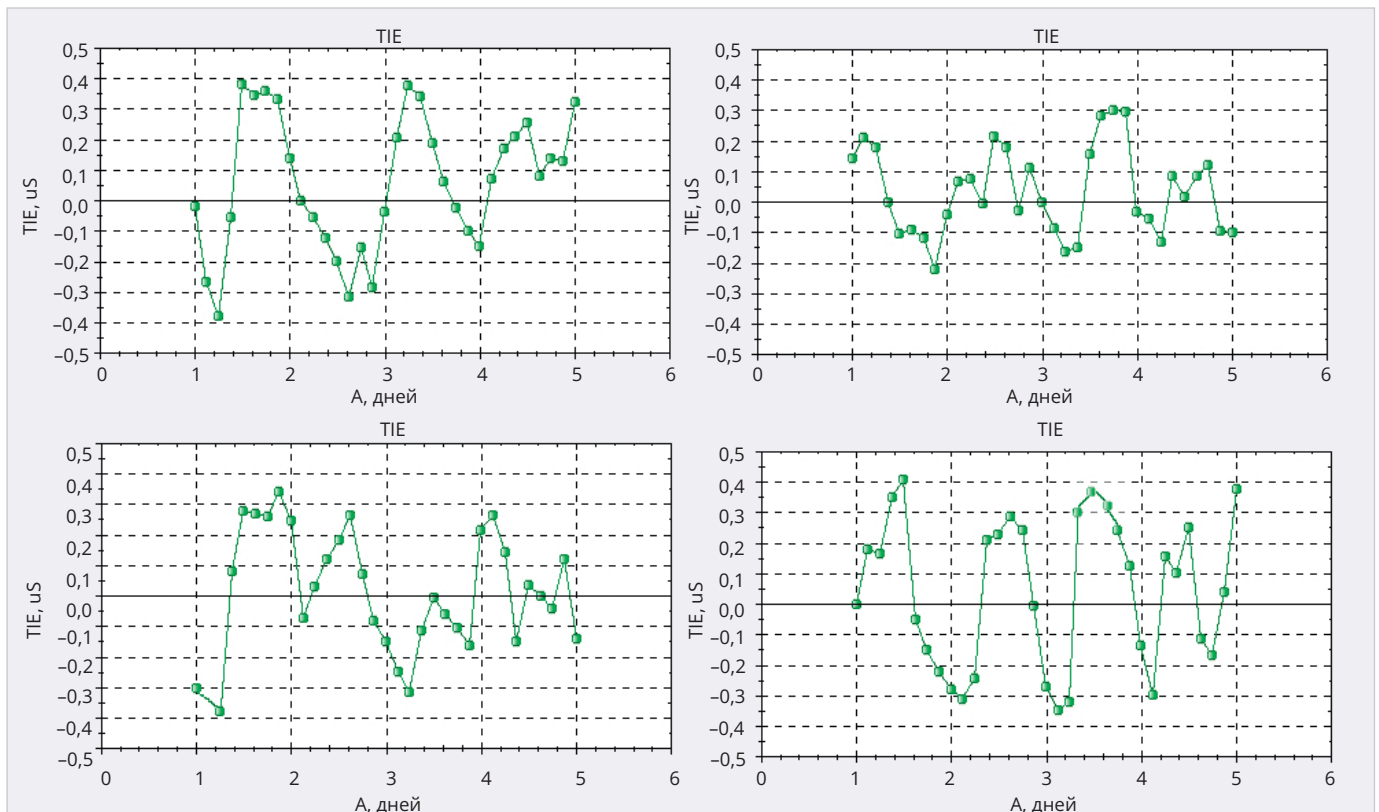


Рис. 15. Временная ошибка для 4 различных генераторов

Долговременный уход можно примерно выразить линейной функцией, что обычно справедливо на небольших временах (1...3 суток), с учётом того, что генератор находится во включённом состоянии длительное время к моменту оценки, что при интегрировании приводит к квадратичной функции временной ошибки (рис. 8).

Влияние температурной стабильности зависит от того, как именно будет меняться температура при эксплуатации и испытаниях аппаратуры. Для примера на рис. 9 показаны 2 профиля с изменением температуры в пределах 5°C в течение суток и временная ошибка, которая получается при изменении температуры по

этим профилям для генератора с идеальной линейной температурной зависимостью 2×10^{-13} на 1°C .

Профиль 1 (слева) абсолютно симметричен в течение суток – максимум временной ошибки при таком профиле ~ 15 нс, при этом через 24 часа она равна 0. Профиль 2 (справа) несимметричен – максимум временной ошибки ~ 45 нс. Для оценки временной ошибки мы используем именно его.

Для оценки временной ошибки удобно на данные длительной прописи частоты накладывать скользящее временное окно требуемой длительности. Схематичное изображение оценки временной ошибки представлено на рис. 10.

Так, для рубидиевых генераторов при постоянной температуре мы получаем примерно такие оценки временной ошибки за 24 часа (рис. 11).

Результаты вписываются в очень жёсткие рамки 100...150 нс за 24 часа. Но если эти же генераторы измерить в условиях небольших изменений температуры ($\pm 5^{\circ}\text{C}$), то становится видна чёткая зависимость от изменений температуры, и итоговый результат уже увеличивается до 400...600 нс (рис. 12).

Конечно, можно проводить компенсацию рубидиевых генераторов в более узком интервале, что позволит получать лучшие результаты по временной ошибке, но это не всегда приемлемо.

Таблица 1. Сравнение характеристик рубидиевого генератора RFS-M102 и кварцевого генератора (ГК360-ТС)

	RFS-M102	ГК360-ТС
Габаритные размеры	51×51×26 мм	51×51×19 мм
Временная ошибка	100 нс при постоянной температуре 400 нс при переменной температуре (±5°C)	400 нс при постоянной температуре 400 нс при переменной температуре (±5°C) с учётом компенсации старения
Температурная стабильность	±5×10 ⁻¹¹ в интервале -40...+75°C	±1×10 ⁻¹¹ в интервале -40...+85°C
Долговременная стабильность	2×10 ⁻¹¹ / сутки	1×10 ⁻¹⁰ / сутки
Потребление	До 1,66 А при вкл., до 0,5 А в уст. режиме	До 2 А при вкл., до 0,6 А в уст. режиме
Девияция Аллана на 1 с	2×10 ⁻¹¹	1×10 ⁻¹²

С кварцевыми генераторами можно, наоборот, получить очень хорошую стабильность в интервале, а определяющим временную ошибку станет долговременный уход. Сами по себе кварцевые генераторы показывают временную ошибку 1...2 мкс за 24 часа. Но их долговременный уход довольно хорошо прогнозируется, таким образом можно построить систему, компенсирующую старение. Суть подобной компенсации сводится к тому, чтобы по известному ранее поведению частоты генератора предсказать изменение частоты на следующий период. Первый период времени, за который происходит оценка старения генератора, называется периодом обучения, второй период – период определения временной ошибки. Процесс обучения представляет собой построение аппроксимирующей модели дрейфа частоты, которая позволит предсказать дрейф частоты генератора в последующий период времени. В итоге временная ошибка будет определяться уже разницей между прогнозируемым и реальным старением (рис. 13).

В качестве аппроксимирующей модели можно использовать линейную функцию аппроксимации. Однако при этом следует иметь в виду, что в первые дни после длительного выключения ошибка прогнозирования линей-

ной аппроксимацией будет чрезмерно высока.

Использование такой компенсации позволяет уменьшить временную ошибку, вносимую старением КГ в 3...5 раз. Таким образом, временная ошибка при использовании подобной компенсации может быть менее 400 нс за 24 часа. Для примера на рис. 14 представлен график временной ошибки для прописи частоты, показанной ранее на рис. 10, только уже с учётом линейной компенсации старения.

Используя такой подход, можно получить временную ошибку на уровне 400 нс за 24 часа в условиях небольшого изменения температуры (рис. 15).

Для кварцевых генераторов, использование которых предполагает компенсацию дрейфа частоты, мы накладываем дополнительные требования по обеспечению монотонности этого дрейфа. Это достигается специальными мерами при производстве резонаторов и конструкции самих генераторов. Для них вводится дополнительный параметр контроля – значение временной ошибки при компенсации дрейфа частоты, при оценке которого мы используем алгоритм, схожий с компенсацией старения, описанной выше. Он позволяет оценить прогнозируемость и возмож-

ность компенсации старения генератора.

Сравнение характеристик кварцевого и рубидиевого генераторов

Для дальнейшего сравнения будут использованы рубидиевый генератор RFS-M102 и прецизионный кварцевый генератор ГК360-ТС производства АО «Морион». Их основные параметры сведены в табл. 1.

Как видно, оба генератора очень похожи друг на друга по габаритам и потреблению. При этом оба готовы показывать временную ошибку до 400 нс в условиях переменной температуры. Для кварцевого ГК360 стоит учесть необходимость обеспечения компенсации старения генератора в аппаратуре, чтобы его температурная стабильность позволила получать такую ошибку в более широком окне. Перестройка у обоих генераторов может быть как аналоговой, так и цифровой. При правильном использовании и тот и другой тип генераторов позволяет добиться очень хороших результатов по требованиям временной ошибки.

Литература

1. *Kotyukov, Ivanov Y., Nikonov A.* Precise Frequency Sources Meeting the 5G Holdover Time Interval Error Requirement. *Microwave journal*, May 2018.
2. *Иванов Ю.А.* О подходе к оценке временной ошибки при применении прецизионных кварцевых генераторов (КГ) в новейших телекоммуникационных системах // Доклады VIII международного симпозиума «Метрология времени и пространства». Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. С. 30–35.
3. *Иванов Ю.А., Никонов А.Г., Котюков А.В.* Использование прецизионных генераторов в аппаратуре стандарта 5G // Современная электроника. 2019. № 3. С. 52–55.



НОВОСТИ МИРА

Cisco ликвидировала своё юрлицо в России

Производитель сетевого оборудования и программного обеспечения Cisco завершил процесс ликвидации одного из своих юридических лиц в России.

Согласно информации, опубликованной в Едином госреестре юридических лиц,

ликвидация юридического лица Cisco состоялась 15 декабря.

Речь идёт об ООО «Сиско системс», которое было ответственно за обслуживаемое оборудование. Важно отметить, что второе юридическое лицо компании, «Сиско солюшенз», продолжает свою деятельность в России.

Ранее сообщалось, что производитель сетевого оборудования и программных продуктов компания Cisco Systems в январе этого года «физически уничтожила» свои материально-производственные запасы в России на сумму 1,86 млрд рублей.

ixbt.com

НОВОСТИ МИРА

Всего за \$1000 Biometry превратит вашу ДНК в персональный флеш-накопитель

Французская компания Biometry анонсировала новую услугу по созданию долговечных хранилищ данных, в основе которых лежит молекула ДНК. Подобные разработки ведутся уже давно, но это первый случай, когда их результат стал доступен обычным пользователям. Новый проект ориентирован на широкую аудиторию, это полноценный коммерческий продукт.



Накопитель может хранить только текстовую информацию. От клиента требуется написать текст, затем буквы будут закодированы через последовательность четырёх нуклеотидов, из которых состоит ДНК. В лаборатории соберут фрагмент молекулы по предоставленному коду, затем вещество высушат для сохранности и запечатывают внутри стальной пластинки. Чтобы прочесть послание, придётся вскрыть хранилище, провести регидратацию ДНК, а затем и её секвенирование.

Ёмкость накопителя составляет символический 1 килобайт, но это обусловлено лишь сложностью и дороговизной процедуры. Создание фрагмента ДНК занимает до 8 часов. Заявлено, что в естественных условиях накопитель сохранит целостность не менее 100 лет, а если хранить его бережно – срок может измеряться и тысячами лет.

Стоимость услуги составляет 1000 евро.

Эта технология создана специально, чтобы подслушивать владельцев смартфонов для формирования рекламы. Разработка CMG называется Active Listening

В Сети можно найти очень много историй о том, как людям выпадает реклама того, о чём они недавно говорили, что якобы указывает на то, что смартфоны слушают своих пользователей и передают эти данные для формирования рекламы. Компании в этом, конечно, не признаются, но по факту теперь у нас есть доказательство того, что такие технологии существуют и они задействованы.

Компания Cox Media Group представи-



ла такой продукт под названием Active Listening. Это ПО именно для прослушивания пользователей посредством микрофонов в смартфонах, но не только. Также ПО можно использовать в умных телевизорах и многих других современных устройствах. Разработчики говорят, что их ПО может идентифицировать потенциальных клиентов «на основе случайных разговоров в реальном времени».

Сложно сказать, использует ли уже кто-то технологию CMG, но, с одной стороны, компания продвигает её как решение будущего, то есть это явно достаточно свежий продукт, а с другой, компания якобы предоставляет данные об окупаемости инвестиций, что косвенно может указывать на то, что клиенты у неё уже есть. В любом случае, CMG может быть далеко не первой компанией с такой разработкой.

industry-hunter.com

Среди производителей полупроводников растёт конкуренция за разработку 1-нм чипов

Растущая важность передовых процессов в производстве чипов очевидна, чему способствуют такие инновации, как искусственный интеллект и высокопроизводительные вычисления. В то время как 3-нм чипы вышли на потребительский рынок, на фабриках предпринимаются усилия по переходу на 2-нм чипы. Недавние отчёты свидетельствуют о прогрессе в производстве 1-нм чипов, что ещё больше усиливает конкуренцию среди производителей полупроводников.

2-нм чипы: премьера в 2025 году

Ожидаемая к 2025 году гонка за 2-нм чипами идёт полным ходом.

TSMC планирует внедрить транзисторы GAAFET по 2-нм техпроцессу к 2025 году, что обеспечит прирост скорости на 15% и снижение энергопотребления до 30% по сравнению с N3E, при этом увеличив плотность транзисторов на чипе более чем на 15%.

Samsung движется по аналогичной траектории, планируя представить свой 2-нм

техпроцесс к концу 2025 года. Как сообщили СМИ в октябре, Samsung Foundry заявила на выставке Semiconductor Expo 2023 в Южной Корее, что уже начала переговоры с крупными клиентами по поставке им 2-нм продукции.

Rapidus планирует начать пробное производство 2-нм чипов в 2025 году, а к 2027 году перейти к массовому производству. В сентябрьских сообщениях указывалось, что ASML планирует создать центр технической поддержки на Хоккайдо, Япония, в 2024 году. На продолжающееся строительство Rapidus 2-нм фабрики будет направлено около 50 инженеров, помогающих в настройке оборудования EUV-литографии на пробной производственной линии, а также обеспечивающих поддержку при запуске фабрики, техническом обслуживании и проверках.

Когда появится 1-нм чип?

Помимо 2-нм, внимание отрасли переключается на чипы по 1-нм техпроцессу. Согласно планам отрасли, массовое производство 1-нм чипов ожидается в период с 2027 по 2030 год. Nikkei недавно сообщила о сотрудничестве между японским производителем микросхем Rapidus, Токийским университетом и французской технологической исследовательской организацией Leti с целью разработки основополагающей технологии для проектирования 1-нм микросхем. Обмен талантами и техническим опытом планируется начать в 2024 году с целью создания системы производства 1-нм чипов, имеющих решающее значение для автономного вождения автомобилей и производительности искусственного интеллекта. С другой стороны, также рассматривается возможность сотрудничества с IBM в области 1-нм продуктов. Предполагается, что вычислительная производительность 1-нм продуктов, которые, как ожидается, станут массовыми в 2030-х годах, превысит 2-нм на 10–20%.

TSMC и Samsung также рассматривают возможность разработки 1-нм чипов. Первоначальный план TSMC по созданию завода по производству чипов с техпроцессом 1,4 нм на Тайване столкнулся с задержками после отказа от первоначального выбора места в октябре.

Samsung планирует запустить свой 1,4-нм техпроцесс к концу 2027 года с улучшенной производительностью и энергопотреблением за счёт увеличения количества нанолитов на транзистор, что обещает улучшенный контроль и снижение утечки мощности.

russianelectronics.ru

Контроллер стоп-сигнальных огней

Александр Одинец (г. Минск, Беларусь)



Иллюстрации в высоком разрешении доступны в электронной версии

Контроллер автомобильных стоп-сигнальных огней представляет собой светодинамическое устройство, формирующее в определённой последовательности несколько эффектов «бегущего огня» и «бегущей тени» и позволяющее управлять по четырём линиям последовательного интерфейса несколькими стоп-сигнальными огнями. Реализация светодинамических эффектов значительно лучше привлекает внимание и способствует повышению безопасности дорожного движения. Применение последовательного интерфейса позволяет ограничиться только одной платой контроллера, что позволяет управлять одновременно и синхронно несколькими стоп-сигнальными габаритными огнями.

Общие сведения

Контроллер реализован полностью на КМОП-микросхемах стандартной логики серии КР1564 и относится к светодинамическим устройствам с фиксированными алгоритмами. Полностью аппаратное решение исключает возможные зависания и сбои в работе устройства в широком диапазоне температур окружающей среды, что имеет большое значение при эксплуатации в автомобиле. Устройство аппаратно полностью совместимо с программируемым контроллером, рассмотренным в [1]. Возможно также применение в качестве управляющего блока контроллера с интегрированным (внутрисхемным) программатором [2], что предлагает возможность перепрограммирования последовательности светодинамических эффектов по желанию пользователя в автономном режиме.

Классическая архитектура светодинамического устройства предусматривает непосредственное подключение каждого светового элемента к основной плате контроллера с помощью отдельного сигнального проводника. Такие устройства [3], как правило, позволяют управлять лишь небольшим числом элементов, обычно не превышающим восьми. Нарастание их числа требует использования дополнительных микросхем памяти и соответствующего увеличения числа проводников, входящих в жгут. Это приводит к значительному усложнению как схемотехнической части, так и программного кода, необходимого для прошивки нескольких микросхем памяти. Кроме того, в таком варианте невозможно

управлять набором световых элементов, удалённых от основной платы контроллера на значительное расстояние.

Для управления большим числом световых элементов, расположенных на удалении от основной платы контроллера, можно использовать соединительную линию, представляющую собой последовательный интерфейс между основной платой и блоками выходных регистров, которые являются управляющими для матрицы из 128 световых элементов. В простейшем случае в системе может быть два стоп-сигнальных габаритных огня, каждый из которых представляет собой матрицу 8×16 из 128 сверхъярких красных светодиодов. Матрица светодиодов и управляющая плата выходных регистров устанавливается в корпус из ударопрочного полистирола с красным светофильтром. Применение сверхъярких светодиодов обеспечивает высокую яркость и хорошую видимость даже при прямом солнечном свете. Управляющие блоки выходных регистров подключаются к основной плате контроллера с помощью жгута из четырёх проводников, в состав которого входят: «Данные», «Синхронизация», «Разрешение» и «Общий». Проводник «Питание +12 В» в жгут не входит и выполняется отдельно многожильным проводом сечением не менее 1 мм^2 .

В такой светодинамической системе передача данных в выходные регистры производится в течение очень короткого промежутка времени с тактовой частотой около 12,5 кГц (при тактовой частоте ВЧ-генератора 100 кГц). Пакеты данных

следуют друг за другом с частотой около 10 Гц, что приводит к смене светодинамических комбинаций. Поскольку время обновления данных в регистрах очень мало: $80 \text{ мкс} \times 16 \text{ импульсов} = 1,28 \text{ мс}$, смена комбинаций происходит визуально незаметно, что и создаёт эффект их непрерывного воспроизведения. При длине от 10 до 100 метров сигнальные проводники («Данные», «Синхронизация», «Разрешение индикации») выполняются витыми парами, второй проводник которых заземляется с обеих сторон линии. При длине до 10 метров сигнальная линия выполняется жгутом из четырёх проводников, включая «общий».

Эффекты влияния длинных несогласованных линий начинают проявляться, когда времена задержек распространения сигнала вдоль линии и обратно начинают превосходить длительность фронтов нарастания и спада сигнала. Любые несоответствия между эквивалентным сопротивлением линии и входным сопротивлением логического элемента на приёмной стороне линии или выходного сопротивления драйвера на передающей стороне приводят к многократному отражению сигнала. Типовое значение времён нарастания и спада фронтов сигнала для микросхем серии КР1564 составляет менее 5 нс, поэтому эффекты влияния длинных несогласованных линий начинают проявляться при её длине в несколько десятков сантиметров.

Зная характеристики линии передачи, такие как полная входная ёмкость и удельная ёмкость на единицу длины, можно вычислить время задержки распространения сигнала по всей длине линии. Типовое значение времени задержки распространения сигнала обычно составляет 5...10 нс/м. Если длина соединительной линии достаточно велика и длительность фронтов нарастания и спада сигнала достаточно мала (т.е. высокая крутизна), несоответствие эквивалентного сопротивления линии и входного сопротивления логического элемента на приёмной стороне создаёт отражение сигнала, амплитуда которого зависит от мгновенного значения напряжения, приложенного ко входу элемента, и коэффициента отражения, который, в свою очередь, зависит от эквивалентного сопротивления линии и входного сопротивления входного логического элемента.

Поскольку входное сопротивление элементов КМОП-микросхем серии КР1564 многократно превосходит эквивалентное сопротивление линии, выполненной витой парой или экранированным проводником, отражённое напряжение на входе приёмника удваивается. Этот отражённый сигнал распространяется вдоль линии обратно к передатчику, где он вновь отражается, и процесс повторяется до полного затухания сигнала.

Преимущество микросхем структуры КМОП, благодаря их высокой нагрузочной способности (серия КР1554), заключается в возможности непосредственно управлять нагрузкой, имеющей ёмкостный характер. Сбалансированные (симметричные) вольтамперные передаточные характеристики элементов этих микросхем позволяют получить практически одинаковые времена фронтов нарастания и спада сигнала. Кроме того, для трансляции сигналов в линию и приёма можно использовать буферные элементы на основе триггеров Шмитта, которые восстанавливают строго прямоугольную форму искажённого сигнала и тем самым исключают ложное срабатывание регистров. Кроме того, наличие гистерезиса на передаточной характеристике (при напряжении питания 5 В для ИС КР1564ТЛ2 это значение составляет примерно 400 мВ) создаёт дополнительный запас помехоустойчивости [4]. В таком случае нет необходимости в применении специальных драйверов, уменьшающих крутизну фронтов импульсов транслируемого сигнала, что позволяет значительно упростить схемотехнические решения на передающей и приёмной сторонах несогласованной линии связи.

Основным функциональным блоком, реализующим алгоритм работы предлагаемого устройства, является микросхема многофункционального регистра КР1564ИР24 (74НС299). Микросхема представляет собой быстродействующий регистр сдвига/хранения, функционально полностью совместимый с приборами ТТЛШ-структуры серий КР1533 и К555. Восемь информационных входов/выходов представляют собой порт данных с высокой нагрузочной способностью и возможностью перевода в третье состояние. Для организации многоуровневых регистров микросхема имеет дополнительные входы последовательных данных «DR», «DL» для первого и восьмого разряда, а также соответствующие выходы «PL», «PR», не имеющие третьего состояния.

Рассмотрим принцип работы такого отдельно взятого регистра более подробно. Регистр может работать в четырёх синхронных режимах: параллельная загрузка, сдвиг вправо, сдвиг влево, хранение, – задаваемых состоянием двух входов выбора режима SR, SL, а также разрешения выходов E1, E2.

Если на оба входа E1 и E2 и хотя бы на один вход выбора SR или SL поданы напряжения низкого логического уровня, то все восемь выводов порта служат выходами. На них присутствует код, содержащийся в регистре (режим считывания).

Если на входах выбора SR, SL действует напряжение высокого уровня, то через все восемь выводов порта в регистр загружаются данные из шины системы (режим «загрузка»). Причём загрузка происходит синхронно с подачей положительного перепада тактового импульса на вход С.

Режим сдвига вправо устанавливается при подаче уровня логической единицы на вход SR, при этом на входе SL должен быть установлен уровень логического нуля.

Режим сдвига влево устанавливается при подаче уровня логической единицы на вход SL, при этом на входе SR должен быть установлен уровень логического нуля.

Если хотя бы на одном из входов E1, E2 будет напряжение высокого уровня, то выходы регистров окажутся в разомкнутом третьем состоянии, и порты могут работать только как входы для приёма внешних данных.

Входы выбора режима SR, SL, входы последовательных данных DR, DL, а также входы параллельных данных D1...D8 открываются синхронно с приходом положительного перепада тактового импульса на вход С, при этом на других входах необходимые уровни уже должны быть зафиксированы с учётом времени предустановки.

Вход сброса регистра R является асинхронным с активным низким уровнем. При подаче уровня «нуля» на этот вход все триггеры регистра устанавливаются в нулевое состояние, независимо от сигналов на других входах, следовательно, вход сброса имеет наибольший приоритет.

Разрядность регистра может быть увеличена за счёт последовательного включения однотипных микросхем. При этом выход PL соединяется со входом DL предшествующего регистра, а выход PR со входом DR последующего регистра.

Рециркуляция данных достигается за счёт соединения выхода PR последне-

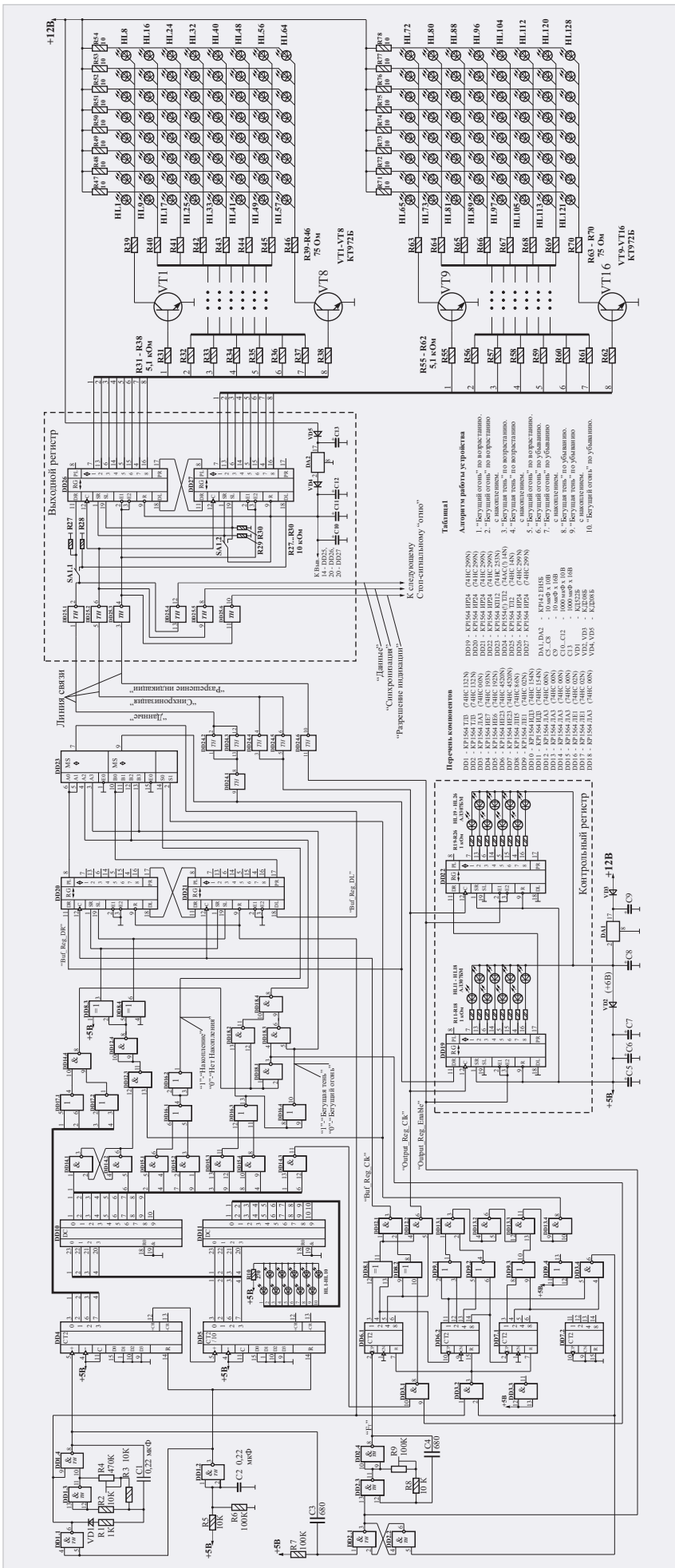
го в линейке регистра со входом DR первого.

Схема электрическая принципиальная

Устройство (рис. 1) содержит: цепь сброса по питанию (DD1.2, C2, R5, R6); низкочастотный (НЧ) генератор (DD1.3, DD1.4, R2...R4, C1); схему установки НЧ-генератора (DD1.1, VD1, R1); высокочастотный (ВЧ) генератор (DD2.3, DD2.4, R8, R9, C4); секвенсер-формирователь последовательности режимов, включающий: счётчик (DD5), дешифратор последовательности режимов (DD10), формирователи условий «Бегающий огонь / Бегающая тень» (DD15.3, DD15.4, DD16.3, DD16.4), «Накопление / Нет накопления» (DD15.1, DD15.2, DD16.1, DD16.2); мультиплексоры-формирователи сигналов данных буферного регистра (DD18.1... DD18.4, DD23); схему выбора режима работы буферного регистра «Сдвиг влево / Сдвиг вправо» (DD12.3, DD12.4, DD8.3, DD8.4); формирователь импульсов синхронизации регистров (DD6.1, DD8.1, DD8.2, DD12.1, DD12.2); формирователь длительности цикла (DD6.2, DD7.1, DD9.1...DD9.3, DD13.1...DD13.4) и схему сброса счётчиков (DD3.2, DD3.4); RS-триггер состояния «загрузка-индикация» (DD2.1, DD2.2) и схему индикации текущего режима (DD11, HL1...HL10).

Устройство содержит три регистра: буферный (DD20, DD21), контрольный (DD19, DD22) и выходной (DD26, DD27). Последние два из них включены параллельно и работают синхронно. Отличие заключается в том, что данные в выходной (удалённый) регистр передаются по линиям связи в инверсном коде, поскольку управляющим сигналом для ключевых транзисторов является логическая «единица», а не логический «ноль», как для контрольной линейки светодиодов на основной плате контроллера. К выходам микросхем контрольного регистра (DD19, DD22) подключены светодиоды, по которым производится визуальное наблюдение последовательности светодинамических комбинаций, транслируемых в линию. Включённому светодиоду соответствует именно уровень «нуля», появляющийся на соответствующем выходе регистра.

На схеме электрической (рис. 1) в явном виде показано подключение одного выходного регистра, состоящего из 3 микросхем, с помощью трёх сигнальных проводников соединительной линии. Таких выходных регистров, которые при включении по



R5, R6, C2) и установки НЧ-генератора (DD1.1, VD1, R1). Короткий положительный импульс с выхода элемента DD1.2 устанавливает в исходное нулевое состояние счётчики DD4, DD5, а после инвертирования элементом DD1.1 вызывает обнуление низким логическим уровнем микросхем буферного регистра (DD20, DD21). Этот же низкий логический уровень, инвертируясь элементом DD3.2, обнуляет счётчики DD6.1, DD6.2, DD7.1 и создаёт условие начальной установки состояния НЧ-генератора (DD1.3, DD1.4, R2...R4, C1). Уровень логического нуля, поступающий с выхода элемента DD1.1 через цепочку VD1, R1 на левую обкладку конденсатора C1 и через резистор R2 на входы элемента DD1.3, приводит к установке на выходе элемента DD1.4 уровня логической единицы.

Счётчик DD5 и дешифратор DD10, входящие в состав секвенсора, задают последовательность рабочих режимов посредством формирования уровня логического нуля на одном из выходов дешифратора. Поскольку счётчик DD5 в начальный момент времени находится в нулевом состоянии, уровень нуля с выхода первого разряда (вывод 1) дешифратора DD10 устанавливает RS-триггер (DD14.1-DD14.2) в исходное единичное состояние. Условимся считать «единичным» состоянием данного RS-триггера появление на выходе элемента DD14.1 уровня единицы, а на выходе DD14.2 – уровня нуля. Этот уровень логического нуля с выхода элемента DD14.2 приходит на один из входов элемента DD12.3 и, независимо от управляющего сигнала на другом его входе, устанавливает на выходе этого элемента уровень единицы. В свою очередь, этот логический уровень, инвертируясь элементом DD12.4, определяет режим работы элементов ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (DD8.3, DD8.4) как повторителей входных уровней. Напомним, что при подаче на один из входов такого элемента уровня логической единицы он будет выполнять инверсию сигнала по второму входу. Поскольку в данном случае элементы DD8.3, DD8.4 являются повторителями сигналов по второму входу, то они определяют режим работы микросхем буферного регистра (DD20, DD21) как «сдвиг вправо». Это происходит благодаря присутствию уровней логических единиц на входах SR (выводы 1) и уровней нулей на входах SL (выводы 19).

Бегущий огонь по возрастанию

Первый же отрицательный перепад с выхода НЧ-генератора, проходя через дифференцирующую цепочку C3-R7, приводит к установке RS-триггера (DD2.1, DD2.2) в условное единичное состояние. Уровень логической единицы с выхода элемента DD2.1 разрешает работу ВЧ-генератора с частотой около 100 кГц и одновременно переводит выходные каскады микросхем контрольного (DD19, DD22) и выходного (DD26, DD27) регистров в третье состояние, кратковременно выключая контрольную линейку светодиодов и матрицы стоп-сигнальных огней. Второе условие необходимо для исключения эффекта мерцания световых элементов. Учитывая, что время обновления комбинации очень мало и составляет всего 1,28 мс, не происходит мерцания даже малоинерционных светодиодов.

Прямоугольные импульсы положительной полярности поступают на счётный вход счётчика DD6.1, который совместно с элементами DD8.1, DD8.2, DD12.1, DD12.2 формирует импульсы синхронизации буферного («Buf_Reg_Clk») и контрольного («Output_Reg_Clk») регистров.

Поскольку буферный регистр (DD20, DD21) в течение первых пяти эффектов (табл. 1) работает только в режиме сдвига вправо, иметь значение будут только данные («Buf_Reg_DR»), приходящие на вход DR регистра DD20 с выхода (вывод 9) нижнего по схеме мультиплексора DD23. Одновременно этот сигнал является информационным также для контрольного и выходного регистров. Режим работы мультиплексоров [DD18.1...DD18.4] и [DD23] определяют сигналы «Накопление / Нет накопления» (с выхода элемента DD16.2) и «Бегущий огонь / Бегущая тень» (с выхода элементов DD16.3, DD16.4). В свою очередь, информационным сигналом для мультиплексора [DD18.1...DD18.4] является логический уровень нуля, формирующийся на выходе элемента DD14.4 в нулевом состоянии счётчика DD4, и уровень логической единицы во всех остальных его состояниях.

Как отмечено выше, в начальный момент времени буферный регистр (DD20, DD21) установлен в исходное нулевое состояние, поэтому первым, считая с момента включения питания, выполняется эффект «Бегущая

ть по возрастанию с накоплением», а не «Бегущий огонь по возрастанию». Такой режим работы лучше привлекает внимание, поскольку в момент включения питания загорается вся матрица светодиодов. Во втором и последующих циклах всегда первым по счёту выполняется эффект «Бегущий огонь по возрастанию» согласно табл. 1.

В начальный момент времени счётчики DD6.2, DD7.1 также установлены в исходное нулевое состояние, поэтому на выходе элемента DD13.4 формируется уровень логической единицы. Этот уровень поступает на вход S1 (вывод 2) мультиплексора DD23 и совместно с уровнем логического нуля, поступающим на его вход S0 (вывод 14) с выхода элемента DD16.1, вызывает прохождение на выходы мультиплексора данных с его соответствующих входов A2 (вывод 4) и B2 (вывод 12). Этот информационный сигнал формируется на выходе мультиплексора [DD18.1...DD18.4], режим работы которого, в свою очередь, определяется условием «Бегущий огонь / Бегущая тень».

Учитывая, что в момент включения питания счётчик DD4 находится в нулевом состоянии, с выхода элемента DD14.4 на выход мультиплексора [DD18.1...DD18.4] пройдёт уровень логического нуля, который поступит на выходы мультиплексора DD23 и определит входной сигнал «Buf_Reg_DR» для буферного регистра (DD20, DD21) как уровень логического нуля (см. временную диаграмму на рис. 2).

Первый же отрицательный импульс «Buf_Reg_Clk» своим задним фронтом (положительным перепадом) приведёт к записи бита данных в регистр DD20 по входу DR с одновременным сдвигом содержимого регистров DD20, DD21 на один разряд вправо. С приходом очередного счётного импульса на вход DD6.2 его состояние увеличивается на единицу, и на выходе элемента DD13.4 формируется уровень логического нуля, который подключает выходы мультиплексора DD23 к его соответствующим входам A0, B0. Теперь буферный регистр работает в режиме рециркуляции данных, поскольку выход PR старшего в линейке регистра DD21 соединён через нижний по схеме мультиплексор DD23 со входом «DR» первого регистра DD20.

Первый же отрицательный импульс синхронизации «Output_Reg_Clk» контрольного и выходного регистров своим задним фронтом

Бегущий огонь по возрастанию с накоплением

С приходом шестнадцатого отрицательного счётного импульса на выходе переноса +CR (вывод 12) счётчика DD4 формируется равный по длительности, но задержанный на время распространения сигнала отрицательный импульс. По его заднему фронту (положительному перепаду) состояние счётчика DD5 увеличивается на единицу, поэтому уровень логического нуля перемещается с выхода 0 (вывод 1) на выход 1 (вывод 2) дешифратора DD10 и, воздействуя на один из входов элемента DD15.1, приводит к появлению уровня логической единицы на выходе элемента DD16.2, что соответствует формированию условия «Накопление». Во втором режиме, считая с момента включения питания, «Бегущий огонь с накоплением» формируется благодаря записи в первый разряд буферного регистра (DD20) уровня логического нуля с одновременным сдвигом содержимого регистров DD20 и DD21 на один разряд вправо. При этом на адресный вход S0 (вывод 14) мультиплексора DD23 постоянно приходит уровень логической единицы, который одновременно с приходом такого же уровня на второй адресный вход S1 приводит к подключению выходов мультиплексора DD23 к его соответствующим входам A3, B3. Этот уровень формируется на выходе элемента DD13.4, пока счётчики DD6.2, DD7.1 находятся в «нулевом» состоянии. Поскольку на выходе элемента DD16.4 сформирован уровень логического нуля, то на выход нижнего мультиплексора DD23 проходит уровень логического нуля, формирующийся при условии «Бегущий огонь». По заднему фронту импульса (Buf_Reg_Clk) отрицательной полярности (положительному перепаду) в первый разряд регистра DD20 будет записан бит данных, поступающий с нижнего мультиплексора DD23 (вывод 9). По спаду счётного импульса на входе DD6.2 состояние этого счётчика увеличится на единицу, и на выходе элемента DD13.4 уровень логической единицы сменится уровнем нуля. Теперь выходы мультиплексора DD23 будут подключены к его соответствующим входам A1 и B1, поэтому буферный регистр (DD20, DD21) перейдёт в режим рециркуляции данных. Далее серия из 16 импульсов син-

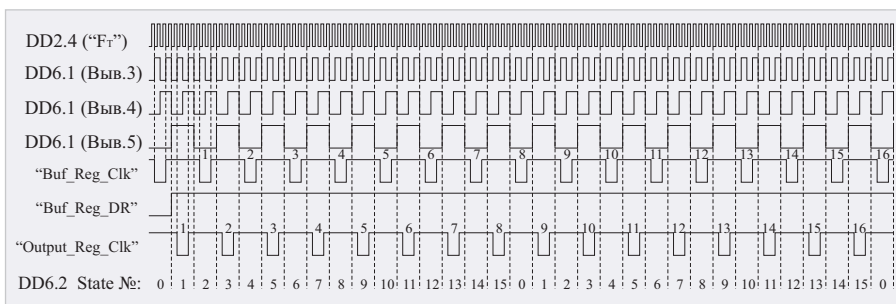


Рис. 2. Временная диаграмма

(положительным перепадом) приводит к записи данных в первый разряд контрольного DD19 и, в инверсном коде, в первый разряд выходного DD26 регистров с одновременным сдвигом содержимого этих регистров на один разряд вправо. Благодаря счётчикам DD6.2, DD7.1 формируется серия из 16 импульсов синхронизации буферного («Buf_Reg_Clk») и контрольного («Output_Reg_Clk») регистров. Но эти импульсы сдвинуты относительно друг друга на один такт счётчика DD6.2, что является необходимым условием для одновременного формирования текущего светодинамического эффекта и выдачи данных в линию в последовательном коде (рис. 2). После завершения серии из 16 импульсов синхронизации данные из буферного регистра будут переписаны в контрольный и, в инверсном коде, – в выходной регистры.

При достижении последовательно включёнными счётчиками DD6.2, DD7.1 тридцать третьего состояния на выходе элемента DD3.4 сформируется короткий отрицательный импульс, который установит RS-триггер DD2.1-DD2.2 в нулевое состояние и заблокирует работу ВЧ-генератора. Одновременно этот отрицательный импульс, инвертируясь элементом DD3.2, приведёт к обнулению счётчиков DD6.1, DD6.2, DD7.1, что вновь вызовет появление на выходе элемента DD13.4 уровня логической единицы. Таким образом, в разряды с первого по шестнадцатый контрольного и выходного регистров окажутся записанными уровни логических нулей, и произойдёт обновление состояния буферного регистра, поскольку он работает в режиме рециркуляции данных. Это условие соответствует завершению формирования первой комбинации первого эффекта, считая с момента включения питания.

Очередным отрицательным перепадом с выхода НЧ-генератора, проходящим через дифференцирующую цепочку C3-R7, произойдёт установка RS-триггера в единичное состояние и повторный запуск ВЧ-генератора. Учитывая, что счётчик DD4 теперь находится в первом состоянии, на выходе элемента DD14.4 формируется уровень логической единицы, который поступает на выход нижнего по схеме мультиплексора DD23 и определяет входной бит данных «Buf_Reg_DR» для буферного регистра как уровень логической единицы. Теперь по спаду первого импульса синхронизации буферного регистра (положительному перепаду) в его первый разряд записывается уровень логической единицы с одновременным сдвигом содержимого на один разряд вправо. По спаду очередного положительного импульса на входе счётчика DD6.2 высокий логический уровень на выходе элемента DD13.4 сменяется низким, и буферный регистр вновь переходит в режим рециркуляции данных.

Серия из шестнадцати импульсов синхронизации («Buf_Reg_Clk») буферного и контрольного («Output_Reg_Clk») регистров приводит к загрузке второй комбинации первого эффекта в контрольный и выходной регистры с одновременным обновлением буферного. Теперь в первые разряды регистров будут записаны уровни логических единиц, а со второго по шестнадцатый – логических нулей.

Каждый отрицательный перепад очередного счётного импульса с выхода НЧ-генератора будет вызывать установку RS-триггера DD2.1-DD2.2 в единичное состояние и повторение вышеописанной процедуры. Результатом работы контроллера будет воспроизведение эффекта «Бегущая тень по возрастанию с накоплением» на контрольной линейке светодиодов с одновременной трансляцией в линию в инверсном коде.

хронизации контрольного и выходного (Output_Reg_Clk), а также буферного (Buf_Reg_Clk) регистров приведёт к формированию первой комбинации второго светодинамического эффекта «Бегущий огонь по возрастанию с накоплением», считая с момента включения питания.

Каждый отрицательный перепад очередного счётного импульса с выхода НЧ-генератора будет вызывать установку RS-триггера DD2.1-DD2.2 в единичное состояние и повторение вышеописанной процедуры. Результатом работы контроллера будет воспроизведение указанного эффекта на контрольной линейке светодиодов с одновременной трансляцией в линию в инверсном коде.

Бегущая тень по возрастанию

При переходе счётчика DD5 в третье состояние на выходе 2 (вывод 3) дешифратора DD10 формируется уровень логического нуля, который, поступая на один из входов логического элемента DD15.3 и инвертируясь элементом DD16.3, приводит к появлению на выходе элемента DD16.4 уровня логической единицы, что соответствует условию «Бегущая тень». Теперь положительным перепадом первого импульса синхронизации буферного регистра Buf_Reg_Clk в первый разряд регистра DD20 производится запись логической единицы. Далее серия из 16 импульсов синхронизации контрольного и выходного (Output_Reg_Clk), а также буферного (Buf_Reg_Clk) регистров приведёт к формированию первой комбинации третьего светодинамического эффекта «Бегущая тень по возрастанию», считая с момента включения питания.

Каждый отрицательный перепад очередного счётного импульса с выхода НЧ-генератора будет вызывать установку RS-триггера DD2.1-DD2.2 в единичное состояние и повторение вышеописанной процедуры. Результатом работы контроллера будет воспроизведение указанного эффекта на контрольной линейке светодиодов с одновременной трансляцией в линию в инверсном коде.

Бегущая тень по возрастанию с накоплением

В отличие от предыдущего эффекта, уровень логического нуля на выходе элемента DD16.2 сменяется логической единицей, но на выходе элемента DD16.4 сигнал не меняется, поэто-

му положительным перепадом первого импульса синхронизации буферного регистра (Buf_Reg_Clk), одновременно со сдвигом содержимого регистров DD20, DD21 на один разряд вправо, в первый разряд DD20 производится запись уровня логической единицы.

Бегущий огонь по возрастанию

При установке счётчика DD5 в пятое состояние на выходе 4 (вывод 5) дешифратора DD10 формируется уровень логического нуля, соответственно, на выходе 3 (вывод 4) формируется уровень единицы, который поступает на вход элемента DD15.4 и совместно с таким же логическим уровнем, приходящим на второй его вход, приводит к формированию на выходе элемента DD16.4 условия «Бегущий огонь».

Бегущий огонь по убыванию

В режимах с шестого по десятый происходит изменение направления воспроизведения светодинамических эффектов на обратное. Это достигается благодаря установке RS-триггера DD14.1–DD14.2 в нулевое состояние и формированию на выходе элемента DD14.2 уровня логической единицы. Теперь два уровня логической единицы, приходящие на вход элемента DD12.3, приведут к появлению на его выходе уровня нуля, который, инвертируясь элементом DD12.4, кратковременно изменяет режим работы элементов ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (DD8.3, DD8.4) на инверсию входных сигналов. Таким образом, при установке счётчиков DD6.2 и DD7.1 в нулевое состояние режим работы буферного регистра будет изменяться на сдвиг информации влево. В таком режиме иметь значение будет только бит данных, приходящий на вход DL (вывод 18) регистра DD21. Первый же импульс синхронизации (Buf_Reg_Clk) буферного регистра DD21 будет производить запись данных по входу DL с одновременным сдвигом содержимого регистров DD20 и DD21 на один разряд влево. При установке счётчика DD6.2 в первое состояние уровень логической единицы на выходе элемента DD13.4 сменится нулевым, что приведёт к возвращению буферных регистров (DD20, DD21) в режим сдвига вправо. Поскольку на вход S1 (вывод 2) мультиплексора DD23 будет приходить уровень логического нуля, буферный регистр будет работать в режиме рециркуляции дан-

ных. Кроме того, уровень логического нуля, приходящий на один из входов элемента DD14.3, вызовет появление на его выходе уровня единицы, а на выходе DD3.1 – уровня нуля. Это приведёт к маскированию первого импульса синхронизации буферного регистра (DD20, DD21), что исключает «двойной» бегущий огонь при формировании первого и шестого эффектов, считая с момента включения питания.

Теперь серия из 16 импульсов синхронизации контрольного и выходного (Output_Reg_Clk), а также буферного (Buf_Reg_Clk) регистров приведёт к формированию первой комбинации шестого светодинамического эффекта «Бегущий огонь по убыванию», считая с момента включения питания. Далее каждый отрицательный перепад очередного счётного импульса с выхода НЧ-генератора будет вызывать установку RS-триггера DD2.1-DD2.2 в единичное состояние и повторение вышеописанной процедуры. Результатом работы контроллера будет воспроизведение указанного эффекта на контрольной линейке светодиодов с одновременной трансляцией в линию в инверсном коде.

Бегущий огонь по убыванию с накоплением и последующие эффекты формируются аналогично эффектам по возрастанию лишь с тем отличием, что буферный регистр (DD20, DD21) кратковременно переводится в режим сдвига информации влево, а затем возвращается обратно в режим сдвига вправо.

Конструкция и детали

Контроллер светодинамического устройства собран на печатной плате размерами 150×100 мм из двухстороннего стеклотекстолита толщиной 1,5 мм (рис. 3), выходные регистры – 200×60 мм (рис. 4), светодиодные матрицы – 190×100 мм (рис. 5). В устройстве применены постоянные резисторы типа МЛТ-0,125, подстроечные – СПЗ-38б, конденсаторы неполярные (C1 – C4) типа К10 – 17, электролитические (C5 – C13) – К50-35. На основной плате контроллера установлены сверхъяркие светодиоды диаметром 3 мм (HL1...HL10) и диаметром 5 мм (HL11...HL26), а в матрицах стоп-сигнальных огней – сверхъяркие красного цвета диаметром 10 мм. Шестивольтные стабилизаторы типа КР142ЕН5Б заменимы на пятивольтовые КР142ЕН5А, но для согласования уровней сигналов все они должны быть на одно и то же напряжение, как на основной плате

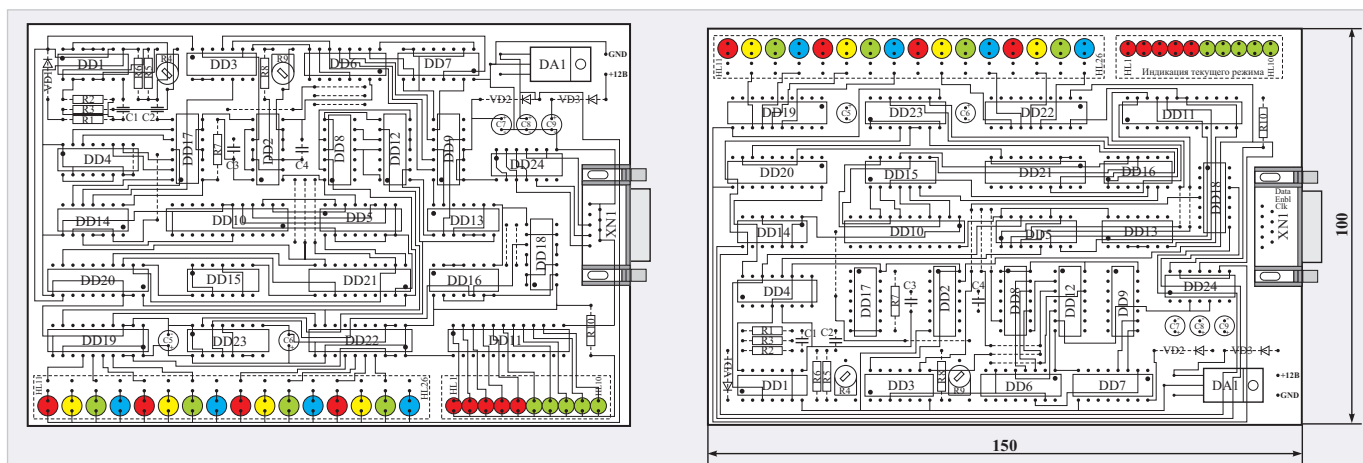


Рис. 3. Топология печатной платы

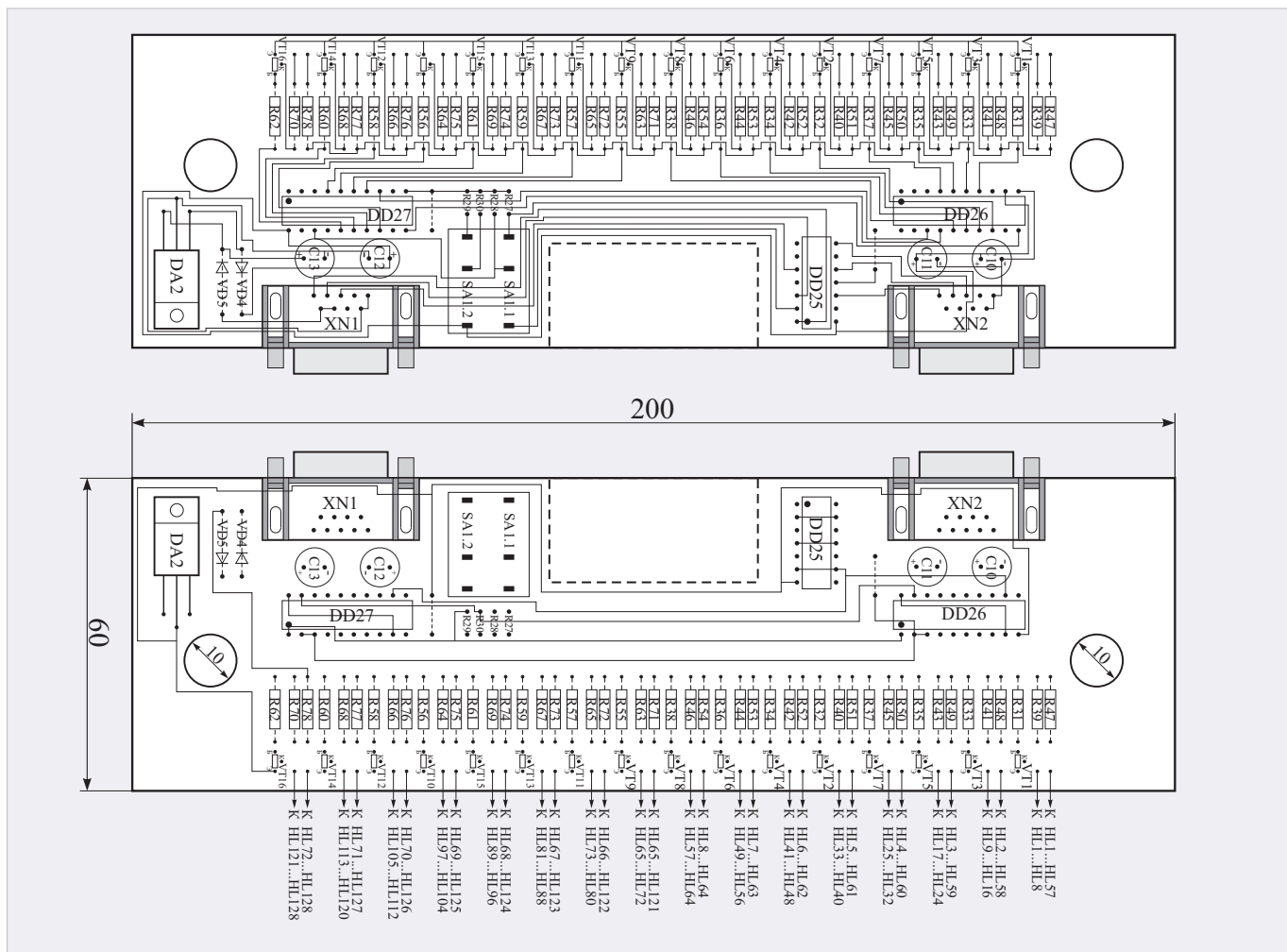


Рис. 4. Выходной регистр. Топология печатной платы

контроллера, так и на платах выходных регистров. Двухсекционный переключатель SA1 типа MT1-1 распаивается непосредственно на плате выходного регистра. Для него предусмотрены отверстия соответствующей конфигурации.

Соединительная линия выполняется жгутом из 4 многожильных проводников сечением 0,35 мм² (для сигнальных линий) и 1 мм² (общий провод) в изоляции и заканчивается 9-контактной

вилкой типа DB-9. На печатной плате установлен ответный разъем XN1 (на схеме не показан). Платы выходных регистров унифицированы и обеспечивают возможность параллельного подключения такой же платы через дополнительный разъем. Благодаря этому они могут подключаться к основной плате контроллера в любом порядке.

Регистры DD19, DD20, DD21, DD22 типа KP1564 IP24 (прямой аналог

74НС 299N), используемые на основной плате контроллера, можно заменить на KP1554 IP24 (74АС 299N), а также KP1533 IP24 (74ALS 299N). Поскольку микросхемы KP1533IP24 (74ALS 299N) ТТЛШ-структуры потребляют достаточно большой ток даже в статическом режиме (около 35 мА), в удалённых (выходных) регистрах рекомендуется использовать микросхемы именно КМОП-структуры типа KP1564IP24

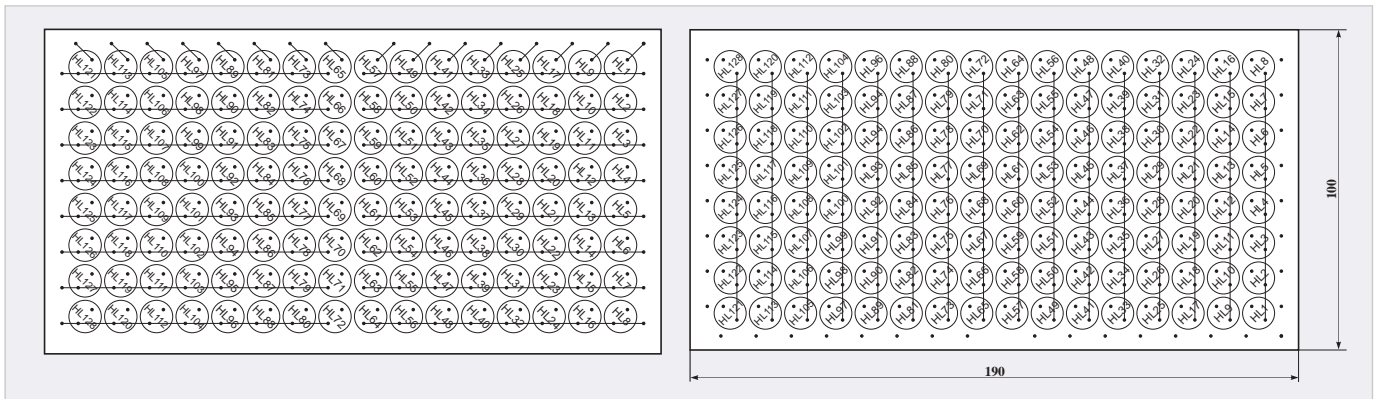


Рис. 5. Светодиодная матрица стоп-сигнального «огня». Топология печатной платы

(74НС299). На основной же плате контроллера возможно использование регистров любой из серий КР1554, КР1564 или КР1533. Поскольку каждая светодиодная матрица потребляет значительный ток (до 2,5 А, импульсное значение), силовой проводник необходимо выполнить многожильным проводом достаточного большого сечения (не менее 1 мм²).

Контроллер в настройке практически не нуждается. Частоту переключения светодинамических комбинаций можно изменять подстройкой резистора R4, а скорость загрузки комбинаций при

работе в условиях повышенного уровня помех – R9. При длине линии до 10 м необходимости в последней регулировке обычно не возникает, и частота импульсов ВЧ-генератора соответствует максимальному значению (100 кГц), поэтому движок резистора R9 устанавливается в положение, соответствующее минимальному сопротивлению.

По всем вопросам, касающимся реализации последовательного интерфейса в светодинамических устройствах, можно получить консультацию автора, направив запрос на адрес редакции.

Литература.

1. Одинец А.Л. СДУ с последовательным интерфейсом // РАДИОМИР. 2003. № 12. С. 16–19.
2. Одинец А.Л. Программируемое СДУ с последовательным интерфейсом // РАДИОМИР. 2006. № 2. С. 23–26; № 3. С. 13–17.
3. Слинченков А., Якушенко В. Устройство световых эффектов // РАДИО. 2000. № 1. С. 32–35.
4. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. Л.: Энергоатомиздат, 1986. С. 76–77.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭЛЕКОНД

**оксидно-электролитические
алюминиевые конденсаторы**
 К50-15, К50-17, К50-27, К50-29, К50-37, К50-68, К50-77,
 К50-80, К50-81, К50-83, К50-84, К50-85, К50-86, К50-87,
 К50-88, К50-89, К50-90, К50-91, К50-92, К50-93, К50-94,
 К50-95(чип), К50-96, К50-97(чип), К50-98, К50-99, К50-100,
 К50-101(чип), К50-102, К50-103, К50-104, К50-105, К50-106

объемно-пористые танталовые конденсаторы
 К52-1, К52-1М, К52-1БМ, К52-1Б, К52-9, К52-11,
 К52-17, К52-18, К52-19, К52-20, К52-21, К52-24,
 К52-26(чип), К52-27(чип), К52-28, К52-29, К52-30

**оксидно-полупроводниковые
танталовые конденсаторы**
 К53-1А, К53-7, К53-65(чип), К53-66,
 К53-68(чип), К53-69(чип), К53-71(чип),
 К53-72(чип), К53-74(чип), К53-77(чип),
 К53-78(чип), К53-79(чип), К53-80(чип), К53-82

ионисторы (суперконденсаторы)
 К58-26, К58-27, К58-28, К58-29, К58-30, К58-31

**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

Георадар: обзор решения для неразрушающего контроля бетонных конструкций

Михаил Осипов (ведущий инженер ООО «СИНЕКТА», группа компаний «ПЛАНАР»),
Константин Кравцов (инженер-программист ООО «СИНЕКТА», группа компаний «ПЛАНАР»)

Радиовидение – современный неразрушающий метод испытаний материалов, который позволяет обнаруживать и оценивать дефекты. Данный метод основан на использовании эффекта отражения и рассеяния радиоволн на границе раздела двух сред с разными электромагнитными свойствами. Технологии радиовидения активно используются в авиации, медицине, металлургии и строительстве. Компания «ПЛАНАР» – отечественный разработчик электронного оборудования – разработала прототип устройства «ГЕОРАДАР» на базе компактного векторного анализатора цепей, который позволяет значительно оптимизировать время и ресурсы при испытаниях бетонных конструкций.

Введение

Ключевую роль неразрушающий контроль играет в строительстве и ремонте зданий и сооружений. Использование георадара для контроля бетонных конструкций позволяет эффективно решать ряд проблем, связанных с их состоянием и надёжностью.

1. Обнаружение скрытых дефектов без разрушений: одной из основных проблем при работе с бетоном является то, что многие дефекты (трещины, включения, коррозия арматуры)

могут быть невидимыми. Георадар позволяет выявить эти проблемы, что позволяет принимать меры по их устранению до того, как они достигнут критического уровня.

2. Экономия ресурсов: использование георадара позволяет более точно определить объём ремонтных работ. Это существенно оптимизирует процесс ремонта и позволяет сократить затраты на ресурсы и время.
3. Повышение безопасности: георадар помогает выявить потенциаль-

ные опасности, связанные с дефектами бетона. Это особенно важно в случае инфраструктурных объектов, таких как мосты и тоннели, где безопасность играет критическую роль.

4. Оценка бетонных конструкций: при приобретении нового жилья георадар помогает оценить состояние бетонных конструкций.

В течение короткого времени инженеры компании «ПЛАНАР» создали макет георадара, разработали программное обеспечение (ПО) и приступили к его испытаниям (рис. 1).

В макете используется технология непрерывного излучения со ступенчато изменяемой частотой [2], что позволяет получить изображение бетона в двухмерных или трёхмерных измерениях с высоким пространственным разрешением на глубину до 80 см.

Для обработки и визуализации результатов исследования георадар подключается к ноутбуку по USB и работает с программным обеспечением RadioVision на операционной системе Windows.



Рис. 1. Тестовый стенд, состоящий из георадара (прототип), подключённого ноутбука с предустановленным ПО и экспериментального бетонного блока



Рис. 2. Конструкция георадара



ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ РАЗРАБОТЧИК и ПРОИЗВОДИТЕЛЬ
ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ МИРОВОГО УРОВНЯ

Компания «ПЛАНАР»
от души поздравляет Вас
с **НОВЫМ ГОДОМ**
и **РОЖДЕСТВОМ!**

Желаем, чтобы наступающий год
стал для Вас успешным
и щедрым на позитивные события.

Пусть все намеченные цели
будут достигнуты и пусть каждый
Ваш день будет наполнен
радостью побед.



planarchel.ru

8 800 222 12 11

Реклама

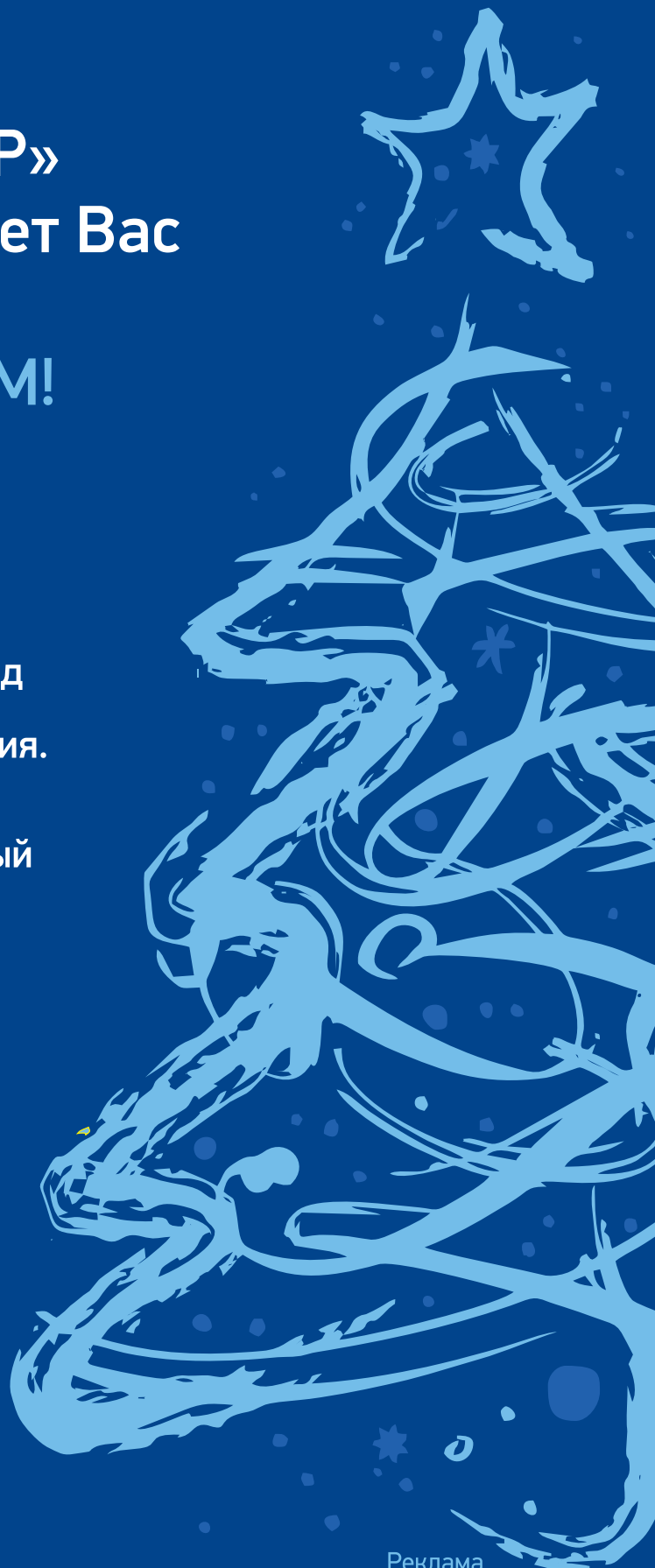




Рис. 3. Тепловой расчёт модели георадара

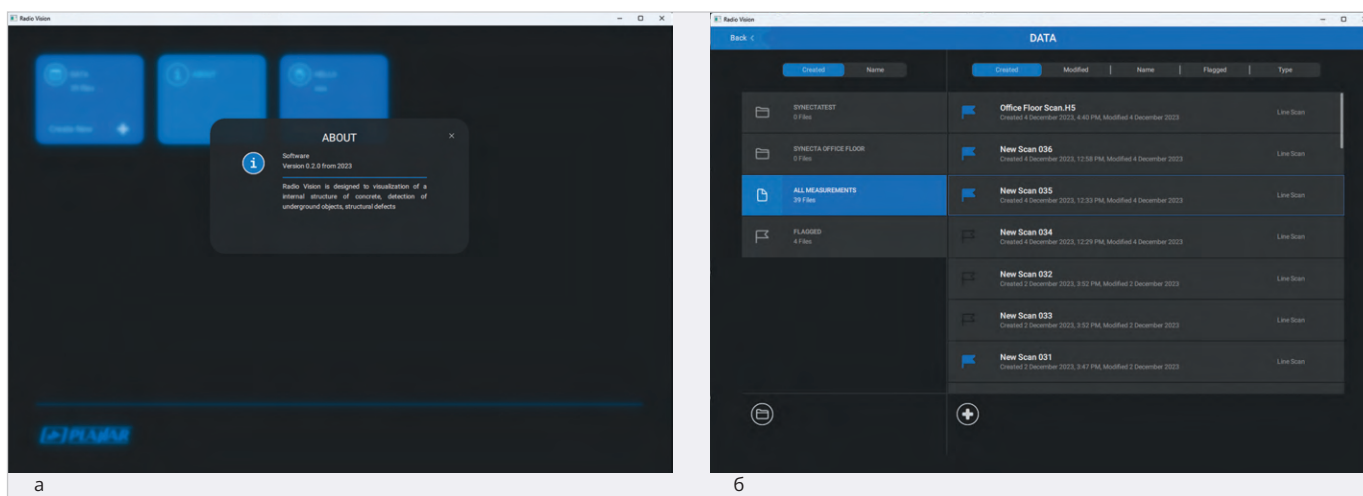


Рис. 4. Программное обеспечение RadioVision

Конструкция макета георадара

Конструктивно георадар представляет собой электронное устройство, оснащённое блоком антенн, радиомодулем RIM5055 VNA для формирования и приёма радиосигналов.

Георадар работает от аккумуляторной батареи, которая обеспечивает непрерывную работу в течение 3 часов. Аккумулятор имеет индикатор уровня заряда. По периметру георадара размещены лазерные направляющие (рис. 2).

Конструкция георадара обеспечивает необходимое расстояние от блока измерения до поверхности (0,8 см), а также надёжное сцепление с поверхностью сканируемого объекта для достижения лучшей точности измерения.

Корпус спроектирован с учётом требуемого температурного режима работы. Для этого был проведён тепловой расчёт модели (рис. 3).

Дизайн макета предполагает модульность для использования нескольких типов

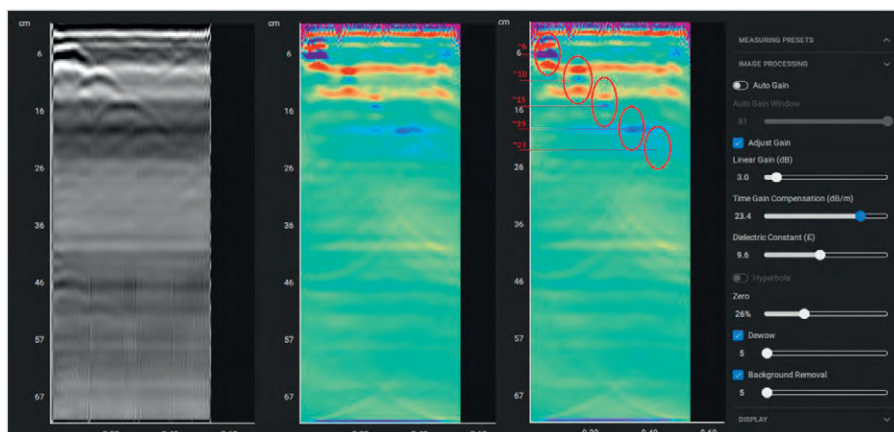


Рис. 5. Работа ПО RadioVision в линейном режиме сканирования

антенн. В дальнейшем размеры макета георадара будут уменьшены в 1,5–2 раза.

Программное обеспечение

Для анализа и визуализации данных, полученных с помощью георадара, разработано программное обеспечение под названием RadioVision (рис. 4).

На данный момент оно поддерживается операционной системой Windows.

Программное обеспечение позволяет проводить измерения в двух режимах сканирования: линейный и площадной [3].

Линейный режим сканирования (B-скан) позволяет получать изображения поперечного среза исследуемой среды (рис. 5).

Площадной режим сканирования (C-скан) позволяет получать изображения продольного среза исследуемой

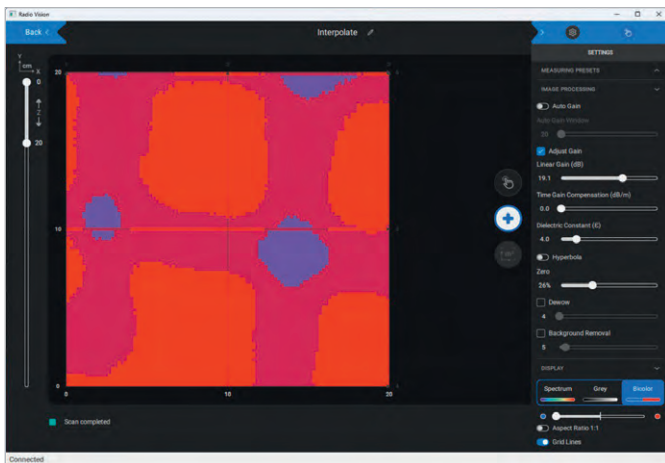


Рис. 6. Работа ПО RadioVision в площадном режиме сканирования

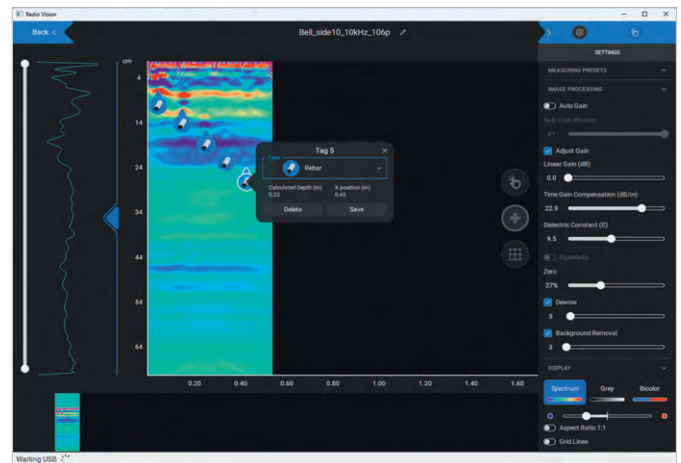


Рис. 7. Применение тегов в ПО RadioVision



Рис. 8. Экспериментальный образец бетона

среды, а также формировать трёхмерные изображения (рис. 6).

По полученному изображению можно точно определить местоположение объектов и их размеры. Для удобства визуального восприятия имеется возможность отметить объекты тегов, которые содержат информацию о типе объекта, координатах (рис. 7).

В программном обеспечении для улучшения качества изображения применяются следующие функциональные возможности [4, 5].

- Коррекция нулевого зазора (или нулевого отсчёта) позволяет уточнить начальные параметры измерения.
- Настройка шага сканирования позволяет выбирать оптимальный интервал для сбора данных.

- Применение линейных и нелинейных методов фильтрации позволяет улучшить качество и читаемость данных.
- Настройка контрастности изображения помогает выделить детали и особенности структуры объекта. Результаты сканирования могут быть сохранены для последующего анализа и сравнения результатов.

Результаты испытаний георадара

В процессе разработки георадара был проведён ряд экспериментов, в частности, сканирование плиты-перекрытия на определение арматуры (рис. 8, 9).

В результате линейного и площадного сканирования плиты-перекрытия офисного помещения обнаружена арматура, которую используют для армирования бетонных перекрытий.

Дополнительно проводились эксперименты на бетонных образцах с арматурой разного диаметра и материала (рис. 10, 11).

Компания «ПЛАНАР» продолжает работу над улучшением георадара и в скором времени планирует расширить его возможности для сканирования больших объектов и создания трёхмер-

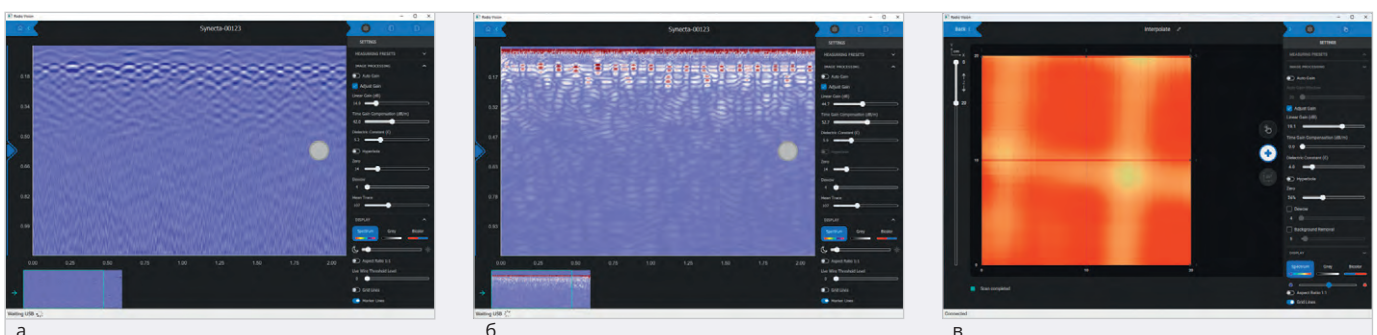


Рис. 9. Визуализация результатов испытаний георадара

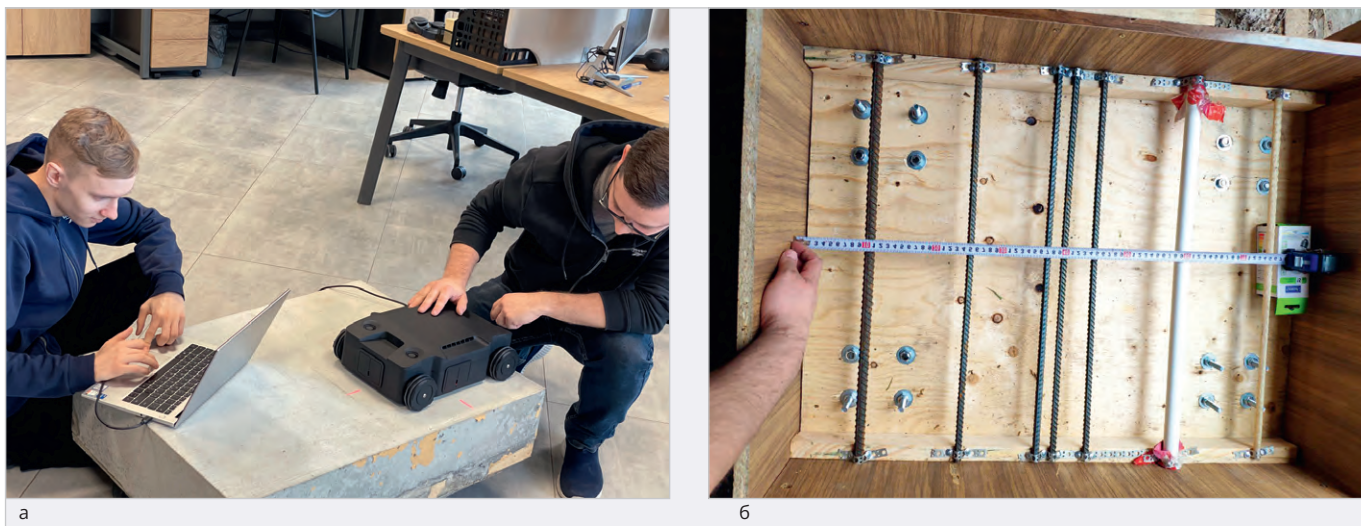


Рис. 10. Экспериментальные испытания бетонного образца с арматурой разного диаметра

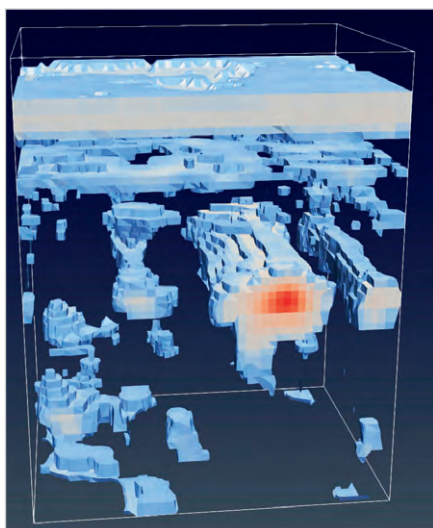


Рис. 11. 3D-изображение, синтезированное в результате обработки данных, полученных при обмере тестового бетонного блока

ной визуализации структуры. На данный момент инженеры разрабатывают фильтры и миграционные алгоритмы для обеспечения эффективного площадного сканирования.

Заключение

Подводя итог, с уверенностью хочется сказать, что георадар – это мощный инструмент для неразрушающего контроля бетонных конструкций, который обеспечивает высокую точность и достоверность полученных данных. Его применение позволяет экономить время и ресурсы, а также повышает качество и безопасность строительства и ремонтных работ.

Литература

1. Вопросы подповерхностной радиолокации. Коллективная монография / под

ред. А.Ю. Гринева. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.

2. Радиолокатор со ступенчатым изменением частоты для обнаружения и распознавания малогабаритных объектов под поверхностью земли // Институт радиофизики и электроники имени А.Я. Усикова НАН Украины.
3. *Smitha N., Ullas Bharadwaj D.R., Abilash S. et al.* Kirchhoff and F-K migration to focus ground penetrating radar images. *Geo-Engineering* 7, 4 (2016).
4. *Lindell David B. et al.* «Wave-based non-line-of-sight imaging using fast f-k migration» *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 38 (2019): 1–13.
5. *Rucka M., Wojtczak E., Zielińska M.* Interpolation methods in GPR tomographic imaging of linear and volume anomalies for cultural heritage diagnostics.



НОВОСТИ МИРА

Искусственный интеллект Gemini от Google превзошёл всех людей и нейросети в 57 науках

Компания Google представила новую версию искусственного интеллекта под названием Gemini. Она набрала 90,0% в тесте MMLU (понимание языка в условиях многозадачности) против 89,8% у людей и 86,4% у GPT-4 по набору из 57 прикладных и фундаментальных наук. В соревнованиях по программированию от Codeforces этот ИИ опередил 87% всех участников.

По заявлению создателей Gemini, ему подвластны любые задачи, которые люди решают при помощи мозга. ИИ построен по мультимодальной ар-

хитектуре, поэтому он не сводит все виды информации к общему коду, а воспринимает их со всеми характерными особенностями. Он не просто понимает слова и музыку из песни, но и может оценить их красоту, глубину творческой задумки, сложность исполнения. А потом постараться выразить всё это в ином формате.

Gemini работает со всеми видами данных, доступных человеку, а в перспективе и больше. Этот ИИ умеет разделять себя на части и делегировать им разные функции: одна творит, вторая её контролирует. Но в этом его главный минус: интуиция Gemini недоступна, поэтому для решения типовой задачи он создаёт от полу-

миллиона вариантов и больше, а потом скрупулезно выбирает из них лучший. Нетрудно представить, какой объём вычислительной мощности требуется для его работы.

В настоящее время можно поработать с модификацией Gemini Pro, но в урезанной версии. Вариант Gemini Nano устанавливается на мобильные устройства, он уже доступен на смартфоне Pixel 8 Pro. Наиболее производительная версия Gemini Ultra выйдет не ранее, чем её тщательно протестируют на ошибки и безопасность. Предполагается, что в недалёком будущем Gemini станет базовой опцией во всех продуктах Google.

techcult.ru

НОВОСТИ МИРА

Bosch окончательно уходит из России. Заводы по выпуску систем ABS и ESP уже проданы, на очереди заводы по производству бытовой техники

Как сообщает «Коммерсантъ», компания Bosch ведёт переговоры по продаже своих российских заводов по производству бытовой техники. Раньше в переговорах участвовала китайская Hisense, но, как сообщил источник «Коммерсанта», турецкий инвестиционный фонд Can Holding «предложил вдвое больше».

Предприятие «БСХ Бытовые приборы» работало в России с 1994 года и выпускало холодильники и стиральные машины. По данным источника «Коммерсанта», Can Holding планирует возобновить производство этой бытовой техники, но уже под своими брендами, также Can Holding может выступить контрактным производителем для других компаний. Интересно, что в контракте на продажу бизнеса нет пункта об обратном выкупе, так что Bosch уходит окончательно и бесповоротно. Напомним, ранее немецкая компания продала свои российские автозаводы, на которых выпускались системы ABS и ESP.

ixbt.com

Названо число пользователей российского смартфона Р-ФОН

Российскими смартфонами Р-ФОН в стране пользуются уже около 300 человек.

Об этом «Газете.Ru» рассказал генеральный директор НТЦ ИТ «Роса», разработавшего операционную систему «Роса Мобайл» для смартфонов Р-ФОН, Олег Карпицкий.

«На сегодняшний день смартфонами Р-ФОН пользуются несколько сотен человек, около 300. Все они – сотрудники нашей компании и наших подрядчиков. По сути, это наша большая группа бета-тестеров», – сказал Карпицкий.

hi-tech.mail.ru

Система Roadio позволит избежать столкновений среди двухколесного транспорта

Системы предупреждения о столкновениях, ставшие неотъемлемой частью многих современных автомобилей, увы, пока ещё не доступны для велосипедов и мопедов. Однако, благодаря разработкам калифорнийской компании Roadio, уже скоро всё может измениться к лучшему, тем более что в них

участвовали бывшие сотрудники Apple, Tesla и Uber.

Система с одноимённым названием состоит из трёх составляющих: двух камер переднего и заднего вида типа «рыбий глаз» с сектором обзора 210 градусов каждая и загруженного на смартфон водителя (установлен на руле) приложения RoadioSafety. HD-камеры обеспечивают круговой обзор дороги, обстановка на которой непрерывно анализируется компьютерным зрением, дополненным алгоритмами ИИ приложения.

При угрозе лобового столкновения примерно за 125 метров (или за 4–6 секунд) водитель получает предупреждение через приложение. Аналогичные предупреждения приходят при сближении на 60 метров с впереди идущим транспортным средством, при обгоне другим автомобилем, приблизившимся на расстояние 100 м (за это отвечает система Garmin Varia), или при угрозе быть «подрезанным» – за 30 метров. Дополнительный бонус приложения – возможность документирования (записи) момента столкновения.

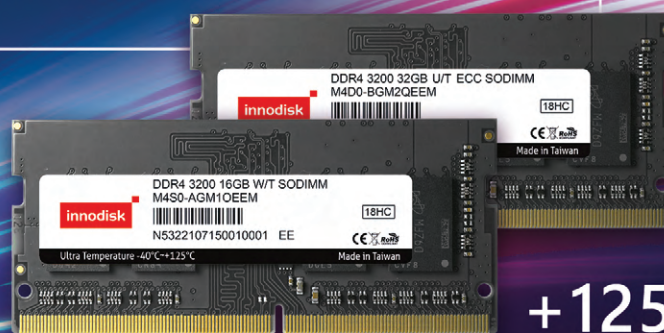
Первые велосипеды и мопеды, оснащённые системой Roadio, появятся в продаже в следующем году.

comnews24.ru

innodisk

Модули оперативной памяти с ультрасрасширенным диапазоном рабочей температуры – от -40° до $+125^{\circ}$ С

DDR4 SODIMM с рабочей частотой 3200 МГц, ёмкость до 32 Гбайт

 -40° С $+125^{\circ}$ С

PROSOFT®

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

+7 (495) 234-06-36
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU

Реклама

Восстановление тактового сигнала и построение глазковых диаграмм на осциллографах Rigol серии MSO8000

Николай Лемешко (д.т.н., нач. отдела АО «Корпорация «Комета»), **Михаил Горелкин** (менеджер по продукту ООО «РШ Тех»)

В статье рассматриваются возможности построения глазковых диаграмм с использованием современных цифровых осциллографов. Выполнен краткий обзор типовых схем CDR, сформулированы рекомендации по выбору битовых последовательностей для оценки качества реализации функции восстановления тактовой частоты в осциллографах для целей построения глазковых диаграмм. Проанализированы функциональные возможности и особенности опции MSO8000-JITTER осциллографов Rigol серии MSO8000 в части построения глазковых диаграмм. С использованием псевдослучайных битовых последовательностей оценено качество её функционирования. Для разных режимов и настроек алгоритмов восстановления тактового сигнала, реализованных в приборах Rigol серии MSO8000, представлены примеры построения глазковых диаграмм и автоматических измерений на их основе.

Введение

Современный этап развития цифровой электроники характеризуется широким применением высокоскоростных последовательных интерфейсов для информационного обмена с периферийным оборудованием. Переход от параллельных схем структурированной передачи данных к последовательным обусловлен не только достижениями в части повышения быстродействия компонентной базы, но больше проблемами, возникающими при групповой обработке бит при их параллельной передаче. К таковым можно отнести:

- ухудшение синхронности поступления бит в регистры приёмной части интерфейсов, обусловленное различиями условий распространения сигналов в линиях в пределах одного кабеля;
- ужесточение требований по джиттеру информационных сигналов и синхронизации из-за групповой их обработки в приёмной части интерфейсов;
- проблему изготовления многожильных интерфейсных кабелей с достаточной степенью развязки сигнальных линий.

Решение проблем такого рода для внутрисистемных компьютерных шин, например PCI Express 3.0, достигается в первую очередь за счёт тщательной выдержки заданного значения волнового сопротивления вдоль линий пере-

дачи, их одинаковой электрической длины, специальных топологических приёмов, т.е. таких мер, реализация которых в гибких кабельных подключениях серьёзно затруднена и потому не находит широкого применения. Как отмечается в [1], даже для внутренних высокоскоростных шин компьютерной техники с переходом к новым поколениям протоколов достижение стабильной работы печатных узлов при приемлемой для массового производства стоимости становится всё более сложной задачей. Зачастую её решение требует принятия таких специфических мер, как снижение шероховатости диэлектриков и механическая накатка фольги для проводников печатных узлов в целях минимизации потерь в проводниках.

Таким образом, широкое применение интерфейсов последовательного типа оказывается вполне оправданным. Все перспективные, но пока ещё не получившие массового распространения интерфейсы, такие как USB 3.2 (до 20 Гбит/с) [2], Thunderbolt (до 40 Гбит/с), DisplayPort (до 80 Гбит/с), имеют архитектуру, предусматривающую сочетание двух и более линий последовательной передачи данных, для которых предусматривается независимая синхронизация на каждой из приёмных сторон.

Перечисленные интерфейсы последовательной передачи данных отлича-

ются использованием сигналов с очень широкой полосой частот, минимальное значение которой можно оценить равным битовой скорости. Более того, для обеспечения качественной передачи сигналов полоса частот линии должна быть в три раза больше битовой скорости [3]. В такой полосе фазовый сдвиг должен быть пропорционален частоте, а энергетические потери должны быть постоянными и не слишком большими, что не выполняется даже для специальных материалов, предназначенных для изготовления печатных плат высокого быстродействия. Зависимость электрофизических свойств материалов приводит к дисперсионным явлениям, в результате которых спектральные составляющие цифровых сигналов достигают точки потребления в разное время и с разным ослаблением. Общеизвестными результатами проявления дисперсии являются:

- усиление джиттера, проявляющегося в дрожании фронтов и спадов цифрового сигнала;
- искажение формы сигнала, состоящее в сглаживании его фронта и спада вследствие увеличения потерь на высоких частотах;
- вариации битового интервала, т.е. времени передачи одного бита, из-за джиттера;
- уменьшение времени, отводимого на захват логического состояния приёмным устройством;
- уменьшение амплитуды цифрового сигнала.

К настоящему времени выработано общее для цифровой передачи данных положение, согласно которому для правильного захвата логического состояния приёмным устройством необходимо, чтобы размах сигнала и битовый интервал за вычетом времени, приходящегося на переход между битами и джиттер, были больше некоторых минимально допустимых значений. Проверка этого условия предусматривается при тестировании на соответствие стандартам высокоскоростных протоколов передачи данных, в частности, USB 3.2 [2]. Практика проектирования однозначно показала, что анализировать пере-

RIGOL

Possibilities and More

РШ
Технологии

Цифровой осциллограф

с полосой пропускания до 2 ГГц
для расширенного анализа цифровых
и аналоговых сигналов



ГРСИ № 82665-21

Серия MSO8000

- Лучшая в классе частота дискретизации 10 Гточек/с
- Глубина памяти до 500 млн. точек
- Высочайшая скорость сбора данных более 600 000 осц/с
- 7 встроенных измерительных приборов в одном
- Сенсорный ЖК-экран диагональю 10,1 дюйма с цветовой градацией и изменяемой интенсивностью свечения

Сервисный центр:
+7 495 981 35 67
SERVICE@RSH-TECH.RU

Отдел продаж:
+7 495 981 35 60
INFO@RSH-TECH.RU

ООО «РШ ТЕХНОЛОГИИ»
WWW.RSH-TECH.RU



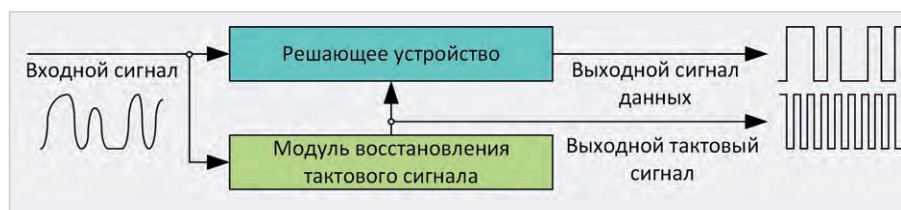


Рис. 1. Обобщённая функциональная схема CDR

численные последствия дисперсии по отдельности нецелесообразно из-за тесного и подчас трудно разделяемого переплетения причин и следствий.

В настоящее время основным способом анализа качеств цифровых сигналов является построение глазковых диаграмм (ГД), которые получают путём многократного наложения осциллограмм исследуемого сигнала друг на друга с использованием обоснованного сопряжения по временной оси. На основе ГД могут быть определены уровень логических единицы и нуля, минимальные битовый интервал и размах (амплитуда) сигнала, характеристики пересечения осциллограмм при многократном наложении, а также фактор качества. Также при помощи ГД можно на начальном уровне исследовать джиттер, например, оценивать долю занятого им битового интервала. Более глубокий, в том числе статистический анализ джиттера позволяет сделать выводы о причинах его возникновения [3, 4]. Такой анализ принято проводить с использованием специальных аппаратно-программных опций, реализуемых на базе современных осциллографов.

Таким образом, измерения с использованием ГД являются действенным способом оценки качества передачи информации в цифровом виде, и неудивительно, что он пользуется большим спросом у разработчиков цифровых быстродействующих устройств и ключевой компонентной базы для них.

Казалось бы, построение ГД может быть выполнено путём многократного наложения осциллограмм при классической синхронизации по фронту и спаду, когда порог запуска развёртки установлен на половину размаха сигнала. Такой подход может быть ограниченно применим только в том случае, если достоверно известна неизменность битового интервала цифрового сигнала для выбранного уровня синхронизации. Однако из-за потерь и сопутствующего джиттера это невыполнимо для любых цифровых сигналов с высокой скоростью следования бит, включая используемые в перечисленных выше последовательных интерфейсах.

Полноценно реализовать построение ГД и провести анализ качества цифровых сигналов на её основе можно только в том случае, если запуск развёртки в осциллографе выполняется при помощи специального внутреннего сигнала синхронизации, сформированного на основе анализа битовой последовательности. Выработка таких синхросигналов осуществляется специальными аппаратными или программными опциями современных осциллографов, причём от качества их формирования будет зависеть точность построения ГД и, соответственно, качество результатов измерений. При этом реализуются специальные алгоритмы слежения за фазой и частотой, которые совместно позволяют восстанавливать тактовый сигнал в широком диапазоне битовых скоростей. Ввиду этого вначале целесообразно рассмотреть подходы, применяемые для восстановления тактового сигнала (Clock and Data Recovery, CDR) и данных как в цифровых последовательных интерфейсах, так и в осциллографах для построения ГД.

Принципы и типовые схемы восстановления тактового сигнала на основе последовательности импульсов

Задача CDR в общем случае осложнена тем, что цифровой сигнал на входе приёмника оказывается асинхронным, имеет аддитивный шум и искажённую форму [4]. Причиной этого являются не только дисперсия в линии передачи, но и свойства передающего устройства. В этом смысле основной вклад вносит джиттер, проявляющийся в виде быстрых флуктуаций периода тактового сигнала и нестабильности положения фронтов на временной сетке. В большинстве случаев основным источником джиттера является фазовый шум задающего генератора. Дополнительными факторами, имеющими наибольшее значение для цифровых быстродействующих устройств, являются тепловой шум, нелинейность амплитудно-частотной и фазочастот-

ной характеристик линий передачи, перекрёстные помехи. Аналогичная нестабильность, но в существенно меньшей степени, проявляется и в выходных сигналах схем CDR, и она, очевидно, усиливается при снижении качества входного сигнала.

Общая схема системы CDR приведена на рис. 1. Принимаемый сигнал поступает одновременно на модуль восстановления тактового сигнала и решающее устройство. Выходной тактовый сигнал, который и будет представлять в дальнейшем особый интерес, должен соответствовать текущей скорости передачи бит и иметь такое фазовое отношение в сравнении со входным сигналом CDR, при котором обеспечивается устойчивая его обработка. К системе CDR могут предъявляться самые различные требования по порогу перестройки, скорости синхронизации, входной сигнал может быть непрерывным потоком данных или же только эпизодически присутствовать на линии.

При восстановлении тактового сигнала схема CDR всегда будет находиться в переходном процессе, частота генератора будет колебаться в некоторых пределах около необходимой. Для устойчивости формирования сигнала синхронизации необходимо, чтобы соблюдались требования по минимально достаточному количеству переходов между логическими состояниями, что обеспечивается различными методами кодирования информации [5], например, 8b/10b, 128b/132b и др. Это обязательно реализуется в схемах CDR, работающих в составе стандартных интерфейсов последовательной передачи данных. Основными характеристиками систем CDR являются возможный диапазон битовых скоростей, восприимчивость к джиттеру, фазовый шум восстановленного тактового сигнала, а также время вхождения в синхронизацию.

Архитектуры систем CDR принято классифицировать следующим образом [6, 7]:

- системы, построенные на слежении за фазой входного сигнала. Эта группа включает в себя устройства, основанные на фазовой автоподстройке частоты (ФАПЧ), управляемых линиях задержки, фазовой интерполяции, связанных генераторах. Как правило, для восстановления тактовой частоты в современных осциллографах при отсутствии априорной информации о битовой скорости используется именно ФАПЧ;
- системы, основанные на сверхдискретизации входного сигнала;

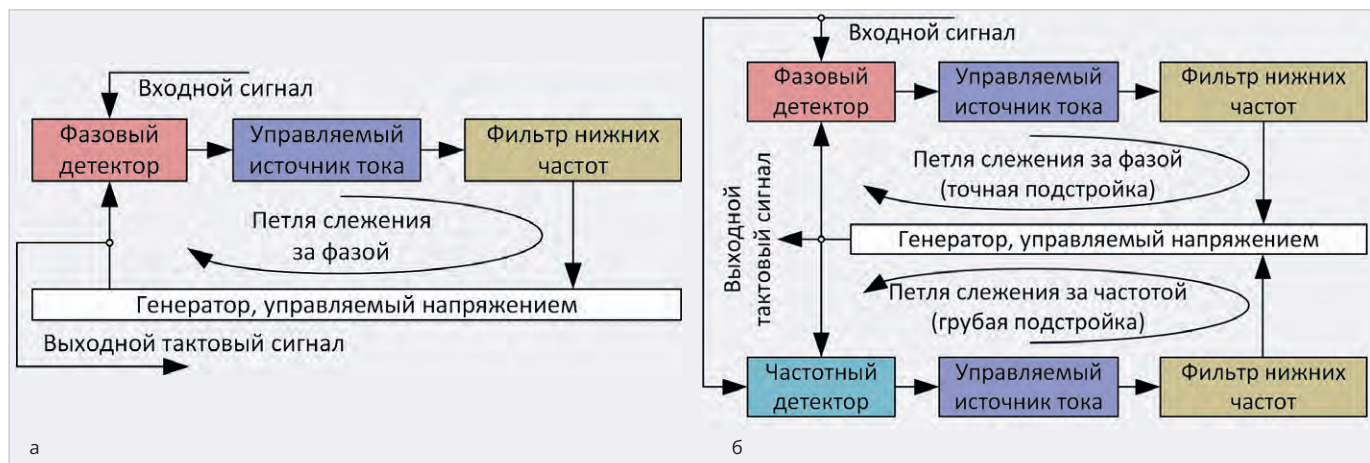


Рис. 2. Структура MBTC системы CDR на основе ФАПЧ: а) с одной петлёй обратной связи; б) с двумя петлями обратной связи

● системы с фазовым выравниванием, без слежения за фазой входного потока, включающие устройства, основанные на высокочастотных полосовых фильтрах и на инициируемом генераторе.

Каждая архитектура имеет свои особенности, достоинства и недостатки. Рассмотрим кратко принципы функционирования модулей восстановления тактового сигнала (MBTC) для некоторых систем CDR, что необходимо для выявления особенностей их тестирования.

1. Системы на основе ФАПЧ являются самыми распространёнными и способны работать в широком диапазоне скоростей входного потока данных, т.е. применяться в интерфейсах с переменной скоростью следования потока, например, в SATA. Их архитектура проявляет малую чувствительность к джиттеру, определяемую полосой фильтра в петле автоподстройки MBTC, которая включает фазовый детектор и управляемый источник тока, а также фильтр нижних частот (рис. 2а). Однако данные преимущества являются друг для друга конкурентными, поэтому чем выше скорость перестройки, тем, как правило, хуже подавление джиттера.

Для снижения времени подстройки и минимизации так называемого ложного захвата частоты внедряют второе кольцо ФАПЧ с более широкой полосой пропускания. В таком случае (рис. 2б) одно кольцо служит для грубой, частотной подстройки, а второе – для точной подстройки фазы. Из недостатков систем на основе ФАПЧ следует отметить длительное время синхронизации, сложность переноса на другой технологический процесс при аппаратной реализации, большую площадь, занимаемую фильтрами в составе системы CDR при её микроэлектронном исполнении.

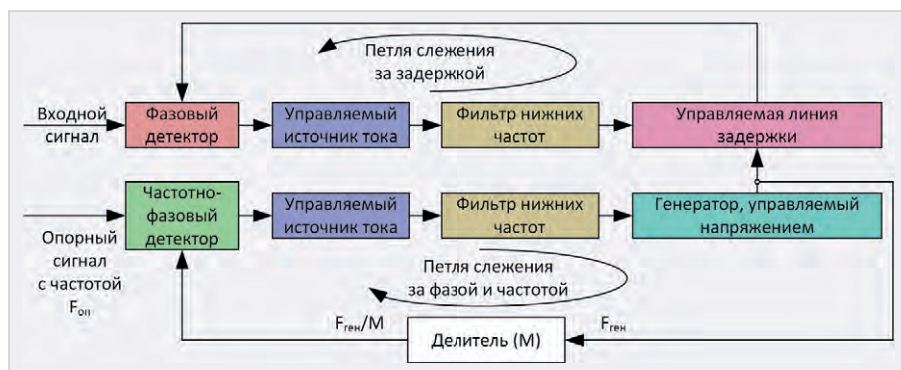


Рис. 3. Структура MBTC системы CDR на основе управляемой линии задержки

2. Системы на основе управляемой линии задержки пригодны для схем с постоянной частотой следования бит, из чего следует основной недостаток – невозможность подстройки частоты генератора, формирующего выходной тактовый сигнал. Такие решения применяются в схемах синхронной передачи данных с индивидуальной подстройкой фазы одновременно для нескольких каналов.

Структура MBTC, представленная на рис. 3, предполагает наличие двух петель обратной связи. Первая из них, основанная на использовании частотно-фазового детектора, обеспечивает слежение за частотой и фазой специально сформированного опорного сигнала и предназначена для формирования напряжения, управляющего длительностью задержки в линии. Этот же подход может быть реализован и при использовании входного напряжения вместо опорного сигнала, однако такое решение более склонно к проявлению связанных с джиттером проблем. Стабильность восстановления опорного сигнала будет зависеть от характеристик источника опорной частоты. Управляемая линия задержки функционирует в составе петли слежения за задержкой, на

выходе которой и формируется выходной тактовый сигнал. Недостатком такого технического решения являются ограничения по диапазону отстроек фазы, при которых сохраняется устойчивость её функционирования.

3. Системы на основе инициируемого генератора применяются в случаях, когда имеются ограничения по времени вхождения в синхронизацию [8]. В типовой схеме (рис. 4) входной сигнал поступает на линию задержки, которая вместе с детектором фронтов, построенном на логическом элементе «исключающее ИЛИ», формирует управляющий сигнал для генератора (1), у которого имеется возможность перестройки фазы в некотором диапазоне значений за счёт управляемой линии передачи. Для подстройки частоты и фазы выходного тактового сигнала используется напряжение, формируемое в петле слежения за фазой и частотой опорного источника, в которой имеется генератор (2). При обнаружении фронта генератор «сбрасывается», что обеспечивает выравнивание фазы входного сигнала и опорного генератора.

Достоинства такого подхода к восстановлению тактовой частоты состоят в отсутствии обратной связи, быстрой

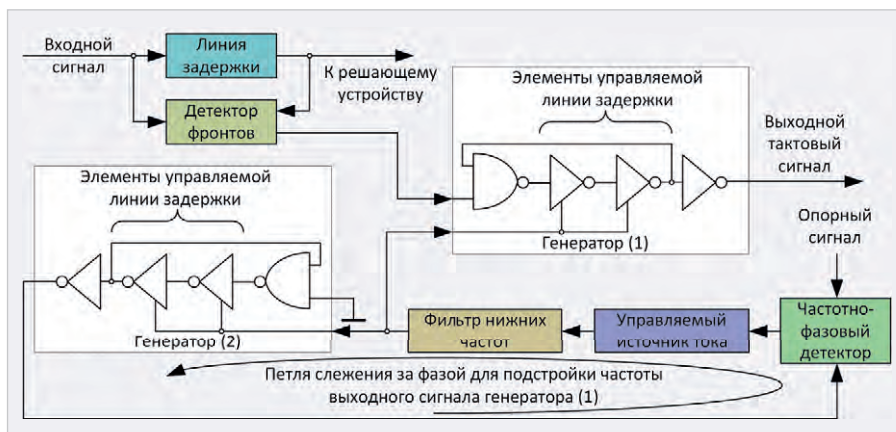


Рис. 4. Структура MBTC системы CDR на основе иницируемого генератора

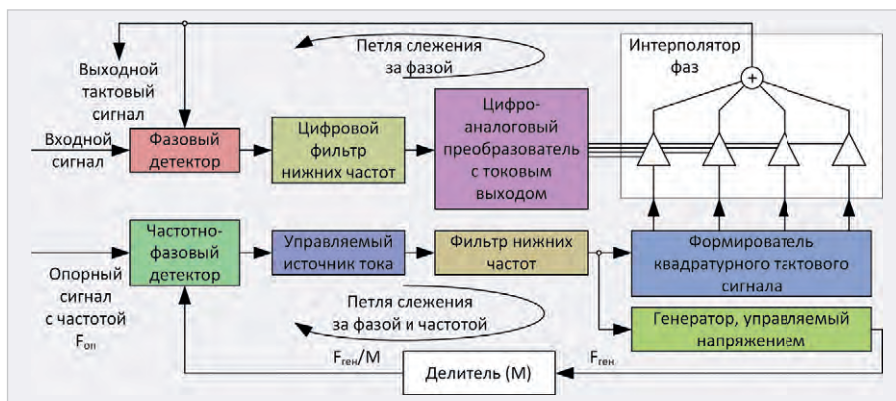


Рис. 5. Структура MBTC системы CDR на основе интерполяции фаз

синхронизации, небольшой площади при интегральной реализации, недостатки – высокая чувствительность к джиттеру и к искажениям. Быстродействующие последовательные интерфейсы, включая USB 2.0/3.2, обычно используют такие схемы, поскольку протоколы передачи данных обычно отводят минимальное количество бит на входение в синхронизацию с целью достижения максимальной эффективной скорости передачи. Существуют более сложные решения, в которых негативное влияние джиттера устраняется добавлением в схему на рис. 4 петли обратной связи для слежения за фазой, как это принято в архитектуре схем с ФАПЧ.

4. Системы, основанные на интерполяции фаз, по логике работы сходны со схемами на основе управляемой линии задержки, однако здесь управляемый источник тока и фильтр нижних частот заменены схемой, включающей цифровой эквивалент последнего и цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) с токовым выходом, а управляемая линия задержки – интерполятором фаз (рис. 5). На его вход поступает квадратурный тактовый сигнал, сформированный в формирователе равномер-

ным сдвигом на равные доли битового интервала. В такой схеме разрядность ЦАП определяет шаг подстройки фазы, а также джиттер выходного тактового сигнала. Выходной сигнал ЦАП управляет фазовым сдвигом, задаваемым интерполятором. Обычно решения на основе интерполяции фаз реализуются в приёмниках оптических сигналов, но при этом они оказываются намного сложнее, чем применение управляемой линии задержки. В отличие от других схем, она может применяться для синхронизации приёма сигналов в нескольких линиях, если не предъявляется жёстких требований по ограничению джиттера.

5. Системы на основе высокодобротных фильтров относятся к наиболее простым и дешёвым. В них используются высокодобротные полосовые фильтры, ширина полосы пропускания которых и определяет границы возможного изменения частоты выходного тактового сигнала. MBTC, построенные по такому принципу, имеют малое время синхронизации и применяются для интерфейсов с фиксированной битовой скоростью, проявляющих высокую устойчивость к джиттеру. Их схема включает в себя линию задерж-

ки, детектор фронтов и высокодобротный полосовой фильтр, который обычно строится в виде LC-контура либо основан на использовании поверхностных акустических волн. Применение данного технического решения ограничено сложностью реализации высокодобротных контуров на частотах сверх 1 ГГц, и предельная битовая скорость не превышает 5 Гбит/с.

Все рассмотренные структурные схемы MBTC имеют в своём составе петли слежения за частотой и/или фазой. Если на вход схемы поступает последовательность бит, характеризующаяся неизменной битовой скоростью и почти полным отсутствием джиттера, то корректирующие сигналы, формируемые петлями слежения, будут определяться случайными процессами. По этим же принципам работают модули восстановления тактового сигнала, необходимого для построения ГД в осциллографах.

Таким образом, настройки восстановления тактового сигнала будут оказывать прямое влияние на качество ГД. С одной стороны, установка более узких полос фильтров в схемах ФАПЧ повышает точность поддержания частоты формируемого тактового сигнала и повышает качество построения ГД, но с другой — увеличивает время входения в синхронизацию, повышает вероятность срыва восстановления тактового сигнала при сильном джиттере в исследуемой последовательности бит. В решении этого противоречия должен быть найден разумный компромисс.

Рекомендации по выбору битовых последовательностей для оценки качества построения глазковых диаграмм

Итак, качество построения ГД зависит от того, насколько хорошо в осциллографе реализованы функции восстановления тактового сигнала. Как правило, схемы CDR работают с битовыми последовательностями произвольного характера, однако здесь есть некоторые качественные ограничения. Как было показано, принципы работы MBTC таковы, что регуляризация фронтов и спадов улучшает условия восстановления тактового сигнала, способствуя снижению его джиттера и повышая качество построения ГД за счёт повторения условий синхронизации. Если приходится

ориентироваться на конкретный стандарт передачи данных, то следует учесть действующие для него ограничения по количеству следующих подряд единичных и нулевых бит. Например, стандарт USB 2.0 [9] предполагает отсутствие смены сигнала в дифференциальной паре для единичных бит и определяет применение битстаффинга – вставок нулевого бита на каждые шесть следующих подряд единичных бит во избежание потери синхронизации.

В произвольном случае для первичной работы с опциями, предназначенными для построения ГД, следует использовать битовые последовательности, в составе которых должны быть фрагменты, включающие не менее 4...7 следующих подряд единичных и нулевых бит. Сравнительно долгое отсутствие переходов между фиксированными уровнями цифрового сигнала снижает стабильность работы петель обратной связи в рассмотренных выше схемах и увеличивает окно поиска. Если схемы восстановления тактового сигнала работают некачественно, то наличие в тестовом сигнале указанных последовательностей приведёт к заметному ухудшению ГД и к усилению отображаемого джиттера без видимых для этого причин. При необходимости в тестовую последовательность можно вводить десятки и сотни следующих подряд нулевых и единичных бит, что легко позволяет делать генераторы сигналов на основе прямого цифрового синтеза.

Одним из лучших вариантов для проведения тестирования как MBTC, так и опций для построения ГД является использование битовых последовательностей с большим периодом корреляции. Такие последовательности имеют острую автокорреляционную функцию (АКФ) и период, который может исчисляться сотнями тысяч бит, и хорошо имитируют цифровой сигнал с неповторяющейся передаваемой информацией. Как показала практика, ручное формирование длинных последовательностей не только требует больших затрат времени, но и отличается значительно худшими фактическими результатами, чем заслуживающие внимания строгие алгоритмы.

Известно [10], что битовые последовательности с большим периодом используются в составе дальномерных кодов в системах спутниковой навигации. В системе GPS для обеспечения стандартной точности позицио-

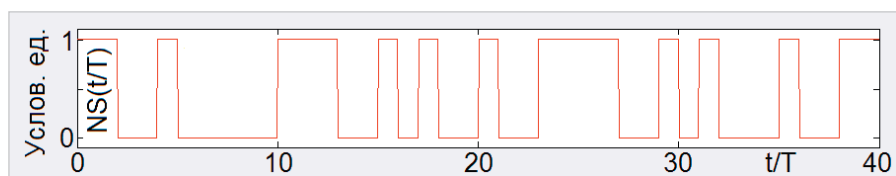


Рис. 6. График функции $NS(t/T)$ для кода Голда для GPS

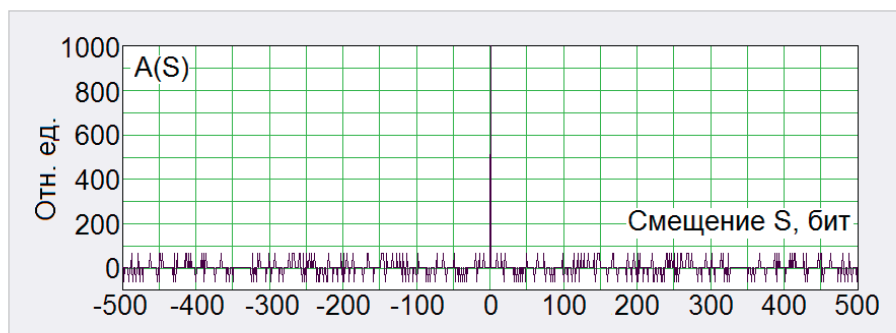


Рис. 7. График АКФ для кода Голда

нирования применяется код Голда, на основе которого наложением дополнительного кодирования формируется С/А-код, применяемый для модуляции навигационных сигналов. Принципы генерирования кода Голда для навигационных космических аппаратов с разными номерами широко освещены в литературе и стандарте GPS [11]. С/А-код является псевдослучайным, имеет периодичность 1023 бита и сравнительно легко поддается формированию с использованием математических пакетов, например, MatLAB. Далее он может быть воспроизведён с использованием генератора сигналов произвольной формы.

На рис. 6 в качестве примера приведён соответствующий коду Голда график нормированной функции $NS(t/T)$, где T — битовый интервал, построенный для космического аппарата системы GPS с первым номером и значений $t/T = 0...40$, т.е. для первых сорока бит.

На рис. 7 показан график АКФ кода Голда, построенный на основе замены единичных и нулевых бит на -1 и 1 соответственно. При битовом смещении $S = 0$ значение соответствующей функции $A(S)$ равно 1023, т.е. длине кода, а при смещениях $S = \pm 1$ оно составляет -1 . При $S \neq 0$ значение $A(S)$ лежит в пределах от -65 до 63 , что подтверждает псевдослучайный характер битовой последовательности. Острота АКФ кода Голда при нулевом смещении и большой период его корреляции, а также некоторые другие свойства и позволяют рекомендовать его в качестве одного из лучших вариантов для отладки MBTC-систем и про-

верки опций восстановления тактовой частоты при построении ГД. При необходимости такая битовая последовательность может быть дополнена вставкой из необходимого количества последовательных нулей и единиц.

Особенности восстановления тактовой частоты и построения глазковых диаграмм на осциллографах Rigol серии MSO8000

Описываемые ниже результаты измерений были получены с использованием осциллографа Rigol серии MSO8000. Это классические приборы лабораторного класса с полосой пропускания до 2 ГГц. Особенностью этого семейства являются сочетание высокой частоты дискретизации до 10 Гвыб/с, большой глубины памяти 500 млн выборок на канал, высокой скорости сбора данных до 600 тыс. осциллограмм в секунду и удобного интерфейса пользователя. Все эти особенности смогли быть реализованы в этой серии за счёт применения собственных разработок компании Rigol: уникальной архитектуры UltraVision II и ASIC Phoenix. Именно применение такой архитектуры и специальных интегральных плат и позволило реализовать в этой серии осциллографов дополнительные функции по восстановлению тактового сигнала в режиме реального времени, построению глазковых диаграмм и анализу джиттера. Эти особенности делают осциллографы Rigol серии MSO8000 отличным инструментом для анализа высоко-

скоростных интерфейсов передачи данных.

Как указано выше, в осциллографах Rigol серии MSO8000 измерения на основе ГД реализуются на основе восстановленного тактового сигнала, а сами приборы отличаются высокой скоростью захвата осциллограмм, что обеспечивает возможность обнаружения редко повторяющихся аномалий в сигнале, проявляющихся на ГД. Построение глазковых диаграмм и проведение измерений по ним на осциллографах рассматриваемой серии реализуется после установки опции MSO8000-JITTER, которая также открывает и функцию анализа джиттера, для реализации которой также необходим восстановленный сигнал внутреннего тактирования.

Рассматриваемая опция позволяет строить ГД для сигналов, подаваемых на любой из каналов осциллографа. Основной настройкой для построения ГД являются нижний, средний и верхний пороговые уровни, по которым осуществляется выработка тактового сигнала. Наиболее важные настройки относятся к восстановлению тактовой частоты. При этом осциллографы Rigol MSO8000 поддерживают несколько способов тактирования для построения ГД, включая использование постоянной тактовой частоты на основе номинальной битовой скорости, фазовой автоподстройки частоты и внешнего тактирования.

Если пользователь выбрал первый из перечисленных способов, то он далее должен выбрать один из трёх режимов его реализации. Ручной режим определяет, что тактовый сигнал для построения ГД будет формироваться строго по заданному пользователем значению битовой скорости без учёта вариаций фронтов и спадов сигнала во времени. Этот режим можно рекомендовать для исследования сигналов высокоскоростных последовательных интерфейсов, отличающихся практически постоянной скоростью передачи в связи с необходимостью восстановления тактовой частоты на стороне хоста и на стороне устройства. Полуавтоматический режим отличается тем, что также требует задания пользователем битовой скорости, однако фактическая частота тактирования будет находиться в окрестности этого значения, подстраиваясь по фактическому положению фронтов и спадов цифрового сигнала. Наконец, автоматический режим

характеризуется отсутствием потребности в пользовательской информации о битовой скорости. При его использовании частота тактового сигнала формируется путём оценки минимального интервала времени между смежными фронтами и спадами.

Для восстановления тактового сигнала с использованием ФАПЧ необходимо ввести значение битовой скорости, а также провести специальные настройки для петель обратной связи. Осциллографы Rigol MSO8000 поддерживают работу ФАПЧ первого и второго порядка, причём этот показатель определяет порядок фильтров в петлях обратной связи. Для случая использования ФАПЧ необходимо задать частоту среза фильтра, которая определяет окно возможного варьирования восстановленного тактового сигнала в окрестности определённого в рамках ФАПЧ среднего значения. Согласно рекомендациям Rigol, частота среза фильтра должна составлять не более 1% от битовой скорости. Опция имеет принудительное ограничение на значение максимума этого параметра на уровне 10% от битовой скорости.

Для фильтра второго порядка необходимо также задать коэффициент демпфирования, который определяет поведение фильтра при импульсном изменении напряжения на их входе. В руководстве по эксплуатации [12] отмечается, что типичные его значения составляют 1,0 и 0,707. В [13] показано, что для колебательных систем, в частности стрелочных и модельно аналоговых им приборов, единичное значение коэффициента демпфирования соответствует критическому режиму, при котором в системе не формируется колебательный процесс, и сходжение к новому показанию достигается за наименьшее время. Для измерений с использованием ФАПЧ второго порядка можно рекомендовать именно такое значение коэффициента демпфирования. При меньшем его значении в системе будет наблюдаться колебательный процесс, но считается, что при значении выше 0,5 он будет вырожден в аperiодический процесс.

Использование внешнего сигнала для тактирования при построении ГД реализуется его подачей на один из свободных каналов осциллографа. В этом случае необходимо обратить внимание на своевременное его поступление в прибор и учесть задержку распространения в линиях передачи.

Следует отметить, что осциллографы Rigol серии MSO8000 за счёт сенсорного экрана и интуитивно понятного интерфейса отличаются простотой управления, а все базовые функции управления развёрткой реализуются по привычным для пользователей современных осциллографов принципам.

На основе результатов построения ГД осциллографы Rigol серии MSO8000 в автоматическом режиме измеряют средние напряжения высокого и низкого уровня для цифрового сигнала, ширину и высоту ГД для прямого сопоставления с их минимально допустимыми значениями, амплитуду ГД. Также прибор определяет средний процент от вертикального раскрытия ГД, на котором в среднем наблюдаются пересечения многократно наложенных осциллограмм, и Q-фактор. Согласно определению, последний равен отношению амплитуды ГД к суммарной дисперсии напряжения высокого и низкого уровней в месте максимального раскрытия ГД.

Основное ограничение функциональности опции MSO8000-JITTER состоит в том, что ГД может быть построена при временной развёртке 100 нс/дел и менее. По-видимому, это связано с особенностью алгоритмов восстановления тактовых сигналов, которые, как это следует из приведённых выше схем, не могут работать с сигналами, имеющими произвольную скорость следования бит. Действительно, все составные части МВТС, делители, фильтры и т.д. всегда настраиваются на некоторый диапазон битовых скоростей. Слишком низкие её значения приводят к нестабильной работе петель обратной связи, в результате чего формируемый тактовый сигнал вначале претерпевает усиление джиттера, т.е. теряет должное качество, а при дальнейшем снижении битовой скорости его генерация полностью срывается. Однако здесь важно помнить, что сами измерения по ГД, да и анализ джиттера, обычно проводятся для скоростей более 1 Мбит/с, что делает рассматриваемое ограничение малозначимым для практических приложений.

Примеры построения глазковых диаграмм с использованием осциллографов Rigol серии MSO8104

Схема и средства измерений, используемые сигналы. Для выпол-

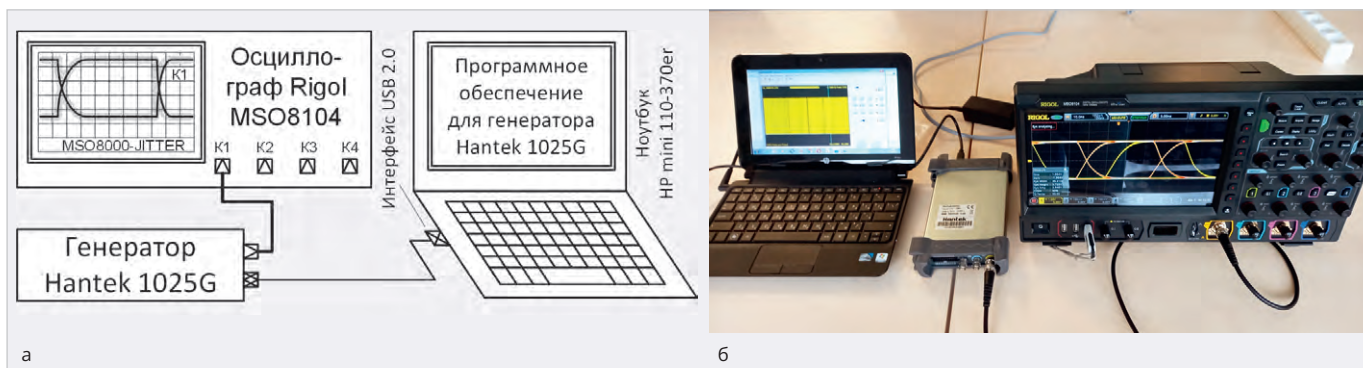


Рис. 8. Измерительная установка: а) схема; б) фотография

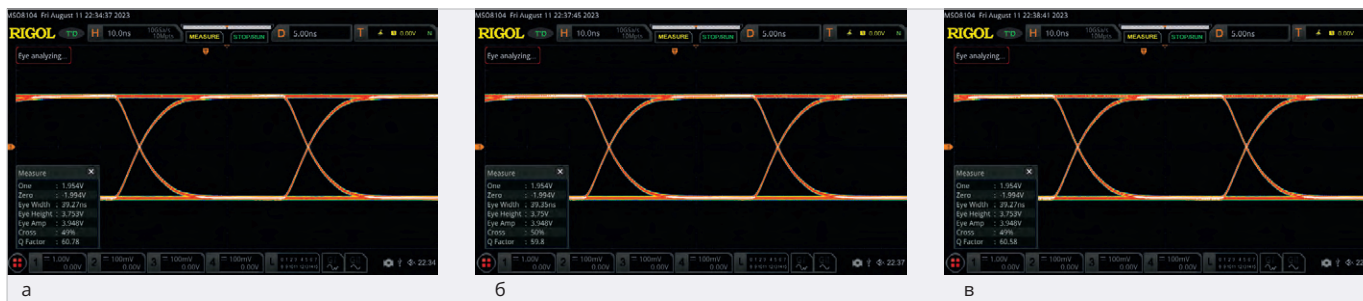


Рис. 9. Результаты измерений, полученные при построении ГД по заданной битовой скорости: а) в ручном режиме; б) в полуавтоматическом режиме; в) в автоматическом режиме

нения измерений использовалась схема, представленная на рис. 8а, б. В её состав входил осциллограф Rigol MSO8104, имеющий четыре канала и полосу рабочих частот 1 ГГц. Формирование цифровых сигналов для построения ГД выполнялось при помощи генератора сигналов Hantek 1025G. Сигналы, необходимые для проведения измерений, загружались в него посредством интерфейса USB 2.0 через программное обеспечение генератора, установленное на ноутбуке HP mini 110-370er. Сформированные сигналы подавались в осциллограф посредством коаксиальной линии, входное сопротивление канала осциллографа равнялось 1 МОм. Режимы осуществления измерений настраивались загрузкой необходимых данных в генератор и выбором настроек, влияющих на восстановление тактового сигнала для построения ГД. Порог запуска развёртки устанавливался автоматически.

Для проведения измерений использовались синтезированные цифровые сигналы с уровнем нуля и единицы –2 и 2 В соответственно и с битовой скоростью 25 Мбит/с. Они представляли собой выборку из первых 1000 бит C/A-кода. Для некоторых типов измерений битовый состав либо структура сигналов изменялись в соответствии с приводимым ниже описанием. Каж-

дый бит соответствовал четырём точкам выборки.

Результаты измерений, полученные при построении ГД по заданной битовой скорости, приведены на рис. 9. Для ручного режима, полуавтоматического и автоматического режимов измерения по ГД дают практически одинаковые результаты. Отличие состоит в том, что в автоматическом режиме, когда битовая скорость определяется измерением времени между фронтами и спадами, ГД едва заметно утолщается в области наложения фронтов и спадов. Это связано с тем, что битовая скорость выходного сигнала генератора несколько варьируется из-за его внутренней нестабильности. Для всех режимов уровни логических единицы и нуля составляют 1,954 и –1,994 В соответственно, горизонтальный и вертикальный раскрыв ГД имеет значения около 39,3 нс и 3,75 В, амплитуда вертикального раскрыва ГД 3,94 В. Точка пересечения фронтов и спадов находится на уровне 50% от вертикального раскрыва ГД, Q-фактор составляет около 60%. При таких результатах измерений можно гарантировать, что битовая последовательность будет гарантированно правильно принята на приёмной стороне. Перечисленные значения характеристик можно рассматривать как отправную точку для сопоставления с аналогичными

для измерений, в которых используется ФАПЧ.

Результаты измерений, полученные при построении ГД с использованием ФАПЧ первого порядка. При полосе пропускания фильтра в петле обратной связи, равной 250 кГц, построенная ГД (рис. 10а) практически совпадает с представленными на рис. 9. Горизонтальный раскрыв ГД составляет 39,25 нс, положение точки пересечения фронтов и спадов — 49%. Увеличение полосы пропускания до 2 МГц приводит к тому, что цепи ФАПЧ приобретают большее окно слежения. Ввиду этого область наложения фронтов и спадов при неизменном характере сигналов расширяется (рис. 10б), а указанные параметры приобретают значения 36,49 нс и 40%, что не соответствует их фактическому значению. Если теперь перейти к предельно допустимому для битовой скорости 25 Мбит/с значению полосы пропускания, равной 2,5 МГц, то рассматриваемые параметры приобретут значения 31,27 нс и 43%. Во всех трёх случаях остальные характеристики, измеренные по ГД, соответствовали верным значениям.

Таким образом, при выборе полосы пропускания фильтра ФАПЧ для построения ГД целесообразно следовать рекомендации, согласно которой полоса пропускания должна быть не выше 1% от битовой скорости. Этот

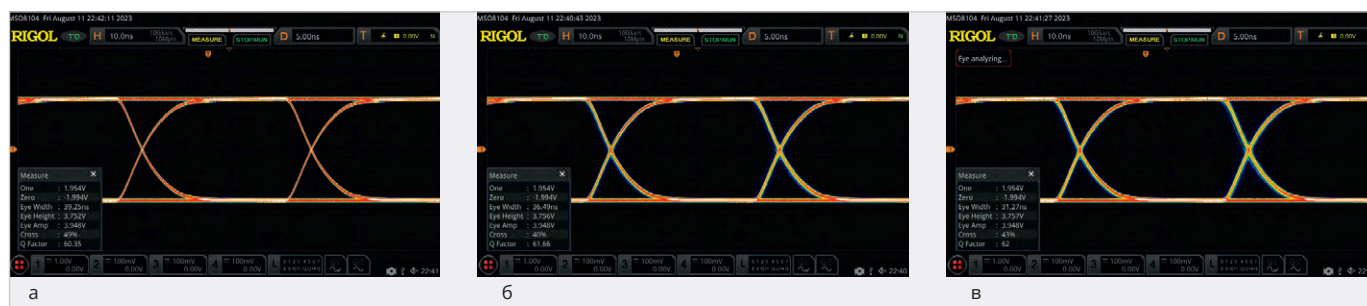


Рис. 10. Результаты измерений, полученные при построении ГД с использованием ФАПЧ первого порядка и полосе пропускания фильтра: а) 250 кГц (рекомендованное значение); б) 2 МГц; в) 2,5 МГц (допустимый максимум)

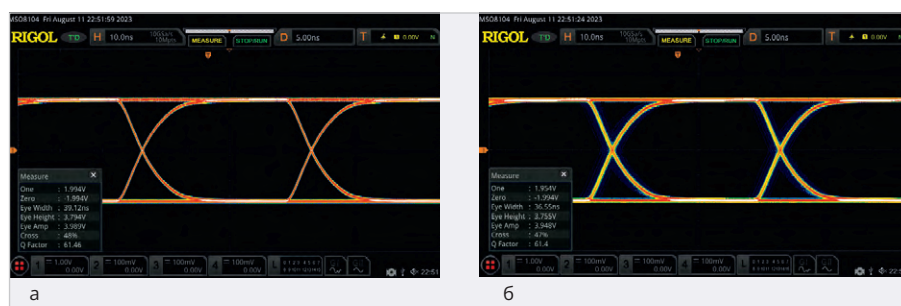


Рис. 11. Результаты измерений, полученные при построении ГД с использованием ФАПЧ второго порядка, при полосе пропускания фильтра 250 кГц и коэффициенте демпфирования: а) 1,0; б) 0,1



Рис. 13. Срыв формирования тактового сигнала при построении ГД при чрезмерно малом коэффициенте демпфирования и слишком широкой полосе пропускания фильтра ФАПЧ

вывод следует распространить и на ФАПЧ второго порядка при любом значении коэффициента демпфирования.

Результаты измерений, полученные при построении ГД с использованием ФАПЧ второго порядка при частоте среза фильтра, равной 250 кГц, представлены на рис. 11. Как отмечалось выше, при значении коэффициента демпфирования менее 0,5 в системе, как подобной стрелочному прибору, так и ФАПЧ второго порядка, будет наблюдаться колебательный отклик на ступенчатое изменение входного воздействия. Ввиду этого можно ожидать, что для малого значения коэффициента демпфирования области наложения фронтов и спадов будут расширяться, причём это расширение ограничено только частотой среза фильтра.

Этот вывод подтверждается результатами измерений, полученными для значений коэффициента демпфирования 1 и 0,1. Если в настройках ФАПЧ указано первое из значений (рис. 11а), то горизонтальный раскрыт ГД и её амплитуда составляют 39,12 нс и 3,99 В соответственно. Во втором случае (рис. 11б) эти значения составляют 36,55 нс и 3,95 В. Остальные характеристики, измеренные по ГД, в целом определены верно.

Таким образом, чрезмерное уменьшение коэффициента демпфирования способно приводить к расширению области наложения фронтов и спадов и усиливать видимый на ГД джиттер. Результаты измерений, полученные при малом коэффициенте демпфирования и большой полосе пропускания фильтра. Ситуация, показанная на рис. 11б, является не самой худшей, поскольку малая полоса фильтра в петле ФАПЧ всё же позволяет построить ГД, хотя и приводит к уменьшению горизонтального её раскрытия на 6,5%. На рис. 12 показаны результаты построения ГД и измерений по ней, полученные при коэффициенте демпфирования 0,1 и полосе пропускания фильтра ФАПЧ, равной 2 МГц. В этом случае ширина горизонтального раскрытия ГД уменьшилась до 25,92 нс при норме в 39,1 нс, т.е. на 33,7%. Результаты таких измерений

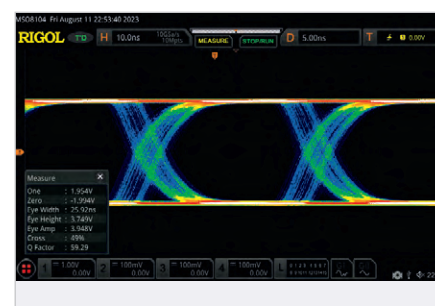


Рис. 12. Результаты измерений, полученные при построении ГД с использованием ФАПЧ второго порядка, при полосе пропускания фильтра 2 МГц и коэффициенте демпфирования 0,1

следует признать несостоятельными, а выбор параметров ФАПЧ — грубой, недопустимой ошибкой. Дальнейшее увеличение полосы пропускания приводит к срыву формирования тактового сигнала (рис. 13) и переходу системы ФАПЧ в режим поиска.

Таким образом, расширение полосы пропускания фильтра в настройках ФАПЧ сверх минимально рекомендованного значения должно быть обоснованным и целесообразно только тогда, когда битовая скорость неизвестна или может меняться в ходе измерений по каким-либо причинам.

Оценка стабильности формирования тактового сигнала и построения ГД при длительном отсутствии переходов между единичными и нулевыми битами. Как отмечалось выше, системы CDR весьма чувствительны к длительному отсутствию переходов между высоким и низким уровнями, поскольку в этом случае схемы ФАПЧ, не имея повторений условий синхронизации, обычно расширяют полосы фильтров, реализующих слежение за фазой. Это проявляется в увеличении джиттера выходного тактового сигнала и способно привести к появлению в нём грубых ошибок, которые отображаются на ГД в виде появления фронтов и спадов в её

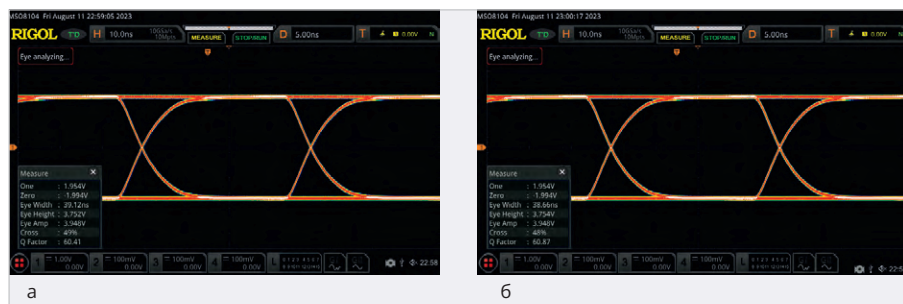


Рис. 14. Построение ГД для псевдослучайной битовой последовательности длиной 1000 бит с фрагментом из 50 нулевых бит при частоте среза фильтра 250 кГц и использовании ФАПЧ: а) первого порядка; б) второго порядка при коэффициенте демпфирования 1,0

центральной части либо, по крайней мере, в расширении областей наложения фронтов и спадов.

Для оценки сохранения стабильности построения ГД в таких условиях в битовой последовательности 50 бит были заменены на нулевые. Результат измерений и построения ГД представлен на рис. 14 для частоты среза фильтра 250 кГц при использовании ФАПЧ первого порядка, а также второго порядка при коэффициенте демпфирования, равном 1,0. Как видно из представленных рисунков, длительное отсутствие фронтов и спадов не влияет на качество построения ГД, а измерения по ней в целом дают верные результаты.

Обнаружение аномалий в сигнале при помощи ГД является отдельным и весьма интересным направлением измерений в сфере цифровой электроники. Эффективность реализации такого поиска во многом определяется быстродействием аппаратной платформы осциллографа. Редкие аномалии, например, появляющиеся один раз на 1 млрд бит, требуют огромной скорости захвата осциллограмм, если результат анализа нужно получить в обозримое время. Сами же аномалии на ГД проявляются в виде отдельных кривых, явно не укладывающихся в области, очерченные типовыми, сопрягаемыми посредством внутреннего тактирования, осциллограммами.

Каждый бит последовательности, использовавшейся для построения рассмотренных выше ГД, описывался четырьмя точками с уровнями напряжения 2 либо -2 В. Для демонстрации возможности обнаружения аномалий описание одного из единичных бит было заменено на последовательность 2; -2; 2; 2 В, т.е. в одном из единичных бит был сформирован провал, который явно попадает в раскрыв ГД.

Это и отображено на рис. 15. Важно обратить внимание, что при наличии такого рода искажений в сигнале его характеристики, измеренные по ГД, скорее всего, будут определены неправильно.

Таким образом, при реализации глазковой диаграммой диагностической функции и обнаружении искажений, подобных продемонстрированным, следует отказаться от использования полученных по ней результатов измерений характеристик цифрового сигнала.

Заключение

Полноценное построение глазковых диаграмм, а также проведение измерений характеристик качества цифровых сигналов на их основе возможно только с использованием осциллографов, реализующих функцию восстановления тактовой частоты. Как мы смогли убедиться, осциллографы Rigol серии MSO8000 вполне подходят для решения такой задачи. Проведённое исследование продемонстрировало их способность качественно восстанавливать тактовый сигнал как по заданной битовой скорости, так и при использовании ФАПЧ. В последнем случае актуально соблюдение рекомендаций по выбору настроек опции MSO8000-JITTER с тем, чтобы погрешности формирования тактового сигнала не находили видимого отражения на ГД. Ещё одним назначением опции MSO8000-JITTER является анализ джиттера, который также широко используется при тестировании цифровых систем. Совместный анализ джиттера и глазковых диаграмм при качественной его реализации позволяет установить причины недостаточной стабильности цифровых систем, предпринять меры к их устранению и повысить, если только это возможно, пределы быстродей-

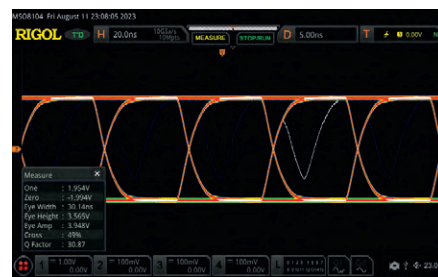


Рис. 15. Пример обнаружения аномалии в сигнале посредством ГД

ствия, что особо актуально для высокоскоростных цифровых устройств.

Литература

1. Кечиев Л.Н. Электрофизические основы конструирования электронной аппаратуры. Инженерное пособие. М.: Грифон, 2020. 480 с.
2. Universal Serial Bus 3.2 Specification. Rev.1, 22.09.2017 // URL: <http://www.usb.org> (дата обращения: 10.03.2020).
3. Кечиев Л.Н. Печатные платы и узлы гигабитной электроники. М.: Грифон, 2017. 424 с.
4. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 616 с.
5. D6.2 Russian Translation of SpaceWire-RT Standard / пер. с англ. // URL: http://spacewire-rt.org/Data/Docs/SpWRT_D6-2_v1-00.pdf (дата обращения: 05.09.2020).
6. Razavi B. Monolithic Phase-Locked Loops and Clock Recovery Circuits. McGraw-Hill Companies, Inc, 1996.
7. Mingta H. Architectures For Multi-gigabit Wire-linked Clock and Data Recovery. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2008. Pp. 45–57.
8. Beraud-Sudreau Q. SiGe Clock And Data Recovery System Based on Injection-Locked Oscillator for 100Gbit/s Serial Data Link. IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 49, No.9, 2014. Pp. 1895–1914.
9. Universal Serial Bus Specification // URL: http://www.usb.org/developers/docs/usb20_docs/#usb20spec (дата обращения: 07.08.2023).
10. Шахтарин Б.И., Сизых В.В., Сидоркина Ю.А. и др. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации / под ред. В.В. Сизых. М.: Горячая линия-Телеком, 2011. 278 с.
11. Спецификация GPS. Документ IRN-IS-200J-001 // URL: <https://www.gps.gov> (дата обращения: 08.08.2023).
12. Цифровой осциллограф серии MSO8000. Руководство по эксплуатации. Rigol, 2019. 136 с.
13. Лемешко Н.В. Теоретические основы моделирования сертификационных испытаний радиоэлектронных средств по эмиссии излучаемых радиопомех. М.: МИЭМ, 2012. 196 с.

Современный способ изготовления двусторонних печатных плат с высоким разрешением своими силами.

Часть 3

Алексей Кузьминов

В статье приводится описание технологии изготовления печатных плат с высоким разрешением своими силами. Показано, что получение высококачественного фотшаблона с помощью лазерного принтера и использование новых светочувствительных материалов и новых источников ультрафиолетового излучения, взамен традиционных, существенно экономит время и материальные средства при изготовлении печатных плат. Описанная технология позволит разработчикам электронных устройств на современной элементной базе кардинально снизить время разработки и её стоимость благодаря оперативности и существенному удешевлению изготовления печатных плат.

Распайка компонентов

Готовую к распайке компонентов плату вначале следует облудить, а затем уже приступить к распайке всех компонентов. Но прежде чем описывать эти процессы, необходимо упомянуть о требуемых для этого инструментах и дополнительных компонентах.

Вначале о паяльниках, которые использовал автор. Для распайки самых миниатюрных пассивных компонентов (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и т.п. в корпусах 0603), микросхем для поверхностного монтажа в корпусах SSOP, QFN с мелким шагом (до 0,4 мм), активных компонент в корпусах SC70, SOT23 и других автор использовал микропаяльник Ersa minor-S (6 В, 5 Вт) – рис. 36. Однако этот паяльник нуждается в некотором усовершенствовании. Дело в том, что «вечное» жало паяльника сделано из достаточно твёрдого и хорошо проводящего тепло сплава. Однако этот сплав, по сравнению с более мягкой медью, из которой сделаны обычные жала для паяльников, обладает существенным недостатком. Припой

плохо прилипает к такому сплаву. Медное же жало очень хорошо залуживается, поэтому из него и делают жала для паяльников – желательнее заменить «вечное» жало паяльника медным. Для этого жало удаляется и заменяется: из отрезка медного провода диаметром 1 мм делается новое жало, которое прикручивается вместо старого. Процедура, конечно, не из простых, однако полученным жалом паять намного надёжнее и удобнее. Но это ещё не всё. Дело в том, что сам нагревательный элемент с жалом закреплён не на конце ручки, а где-то на расстоянии около 2–3 см от её конца внутри ручки. Это сделано по понятной причине – чтобы конец ручки не нагревался и не жёг пальцы. Однако закреплённый таким образом нагревательный элемент представляет собой довольно длинную и тонкую консоль, которая сильно пружинит. Для того чтобы длину такой консоли значительно укоротить и тем придать ей большую жесткость, нужно сделать следующее. На нагревательный элемент надевается с натягом фторопластовый кембрик соответствующего размера, на него также с натягом

надевается фторопластовый наконечник, использующийся в приспособлении для отсоса олова, а на него, в свою очередь, надевается кольцо, выточенное из пробкового дерева (обыкновенная пробка от бутылки из-под вина или шампанского).

Для изготовления такого пробкового кольца в пробке сверлится отверстие (вдоль). Затем пробка насаживается на винт, зажимается двумя шайбами и гайкой, и винт с пробкой зажимается в патроне обычной ручной дрели. Далее дрель включается, устанавливается высокая скорость и с помощью грубой, а затем мелкой наждачной шкурки пробковому кольцу придаётся нужная форма. Консоль значительно укорачивается, жало паяльника становится более жёстко закреплено (что позволяет значительно легче его позиционировать), а наличие такой тепловой защиты (фторопласт и пробка) позволяют легко держать паяльник в руке, не боясь обжечься, так как пробка абсолютно не нагревается (рис. 36, рис. 37).

Для распайки более крупных микросхем для поверхностного монтажа и электронных компонентов (резисторы, конденсаторы, диоды) с типоразмерами 0805 и больше (и для других целей) необходим мини-паяльник чуть большей мощности. Для этих целей с успехом подходит автомобильный паяльник на напряжение 12 В мощностью 8 Вт (рис. 38). Его жало должно быть также из меди, поэтому покрытие насадки «вечного» жала необходимо спилить напильником до самой меди, из которой оно изготовлено.



Рис. 36. Микропаяльник Ersa minor-S (6 В, 5 Вт)

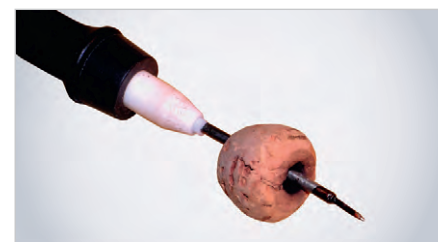


Рис. 37. Конструкция ручки микропаяльника



Рис. 38. Мини-паяльник 12 В, 8 Вт



Рис. 40. Паяльник 220 В, 20 Вт



Рис. 41. Паяльник-«кисточка» 220 В, 40 Вт



Рис. 42. Необходимые компоненты для пайки



Рис. 43. Инструменты для пайки

Для питания микропаяльника (рис. 36) и мини-паяльника (рис. 38) автор приобрёл ИБП Robiton со ступенчатой регулировкой выходного напряжения от 3 до 12 вольт с током в 1,2 А. Этот ИБП автор тоже несколько усовершенствовал. Во-первых, два отдельных выходных диода Шоттки были заменены более мощными в одном кор-

пусе ТО-220. Во-вторых, для получения дополнительного напряжения в 14 В (помимо 12 В) для мини-паяльника был установлен дополнительный резистор и переключатель, позволяющий переключать напряжение с 12 В на 14 В. Это сделано для того, чтобы температуру жала можно было регулировать в зависимости от размеров



Рис. 39. Блок питания для микро- и мини-паяльников

микросхем и других компонентов для поверхностного монтажа (рис. 39).

Для лужения обратной стороны платы, где в основном расположен земляной контур и цепи питания, а также для лужения больших полигонов на стороне платы с расположением компонентов для поверхностного монтажа необходим паяльник мощностью около 20 Вт (рис. 40).

Для лужения стороны платы с расположением компонентов для поверхностного монтажа необходим паяльник мощностью около 40 Вт. Лужение проще всего осуществить медной лужёной оплёткой (экраном), снятой с экранированного провода. Кусочек оплётки приматывают к жалу паяльника обычным медным одножильным проводом диаметром 0,5–0,6 мм, оставляя свободным конец оплётки длиной 5–7 мм, как у обычной кисточки (рис. 41).

Необходимыми атрибутами для распайки компонентов являются также флюс ЛТИ-120 во флаконе с кисточкой, припой (ПОС-61) с канифолью и зубочистки (рис. 42).

В качестве инструментов необходим антимагнитный пинцет с острыми губками и иголка, зажатая в ручных тисках для удерживания мелких предметов (рис. 43).

Теперь по поводу лужения. На взгляд автора, наиболее простым способом, отличающимся достаточно качественным, быстрым и не требующим больших усилий лужением, является следующий. После того как с платы удалён защитный лак, она очищается от остатков бумаги и ворса жёсткой кистью из щетины и покрывается флюсом. Для этого плата зажимается обычным пинцетом и кисточкой, обмакнутой во флюс, проводят по всей её поверхности. Процедуру желательно проводить непосредственно после снятия защитного лака, чтобы медное покрытие не

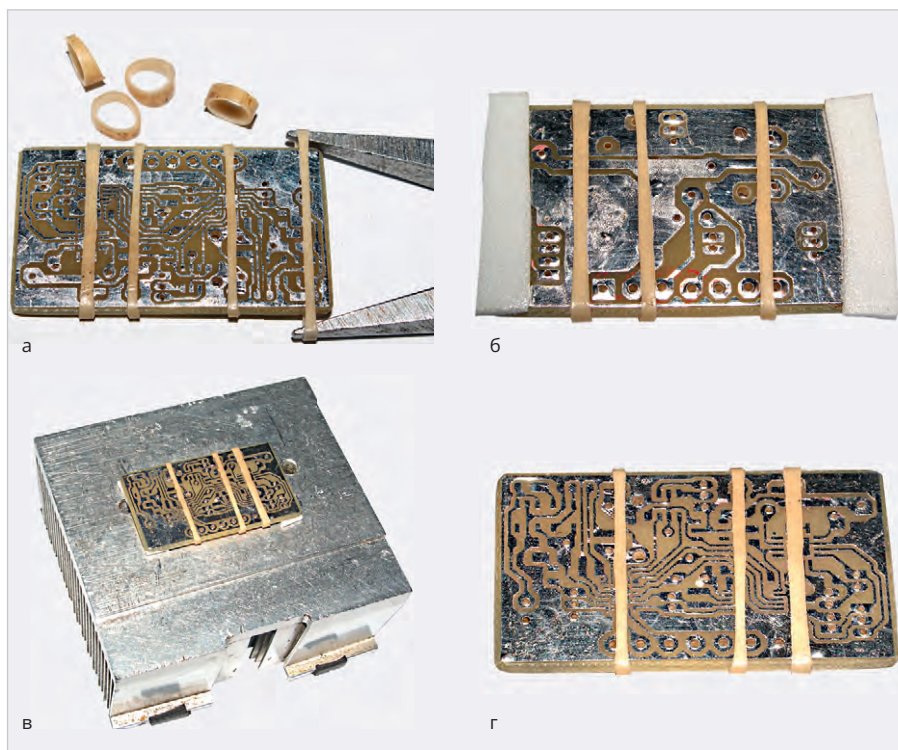


Рис. 44. Подготовка платы к распайке: а – надевание кембрика на плату, б – приклейка пористой ленты, в – расположение платы на столике, г – плата крупно

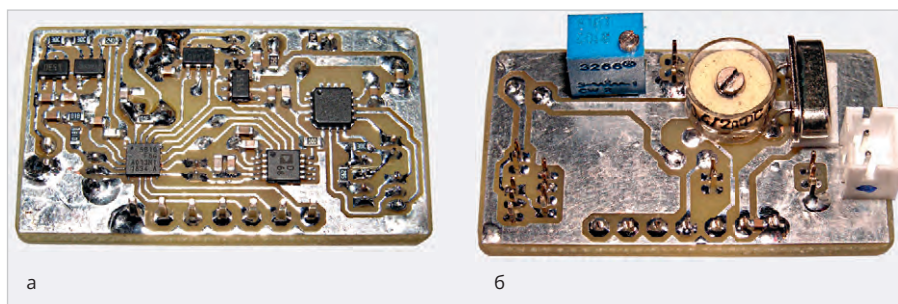


Рис. 45. Пример готовой платы: а – вид со стороны расположения SMD-компонентов, б – вид с обратной стороны

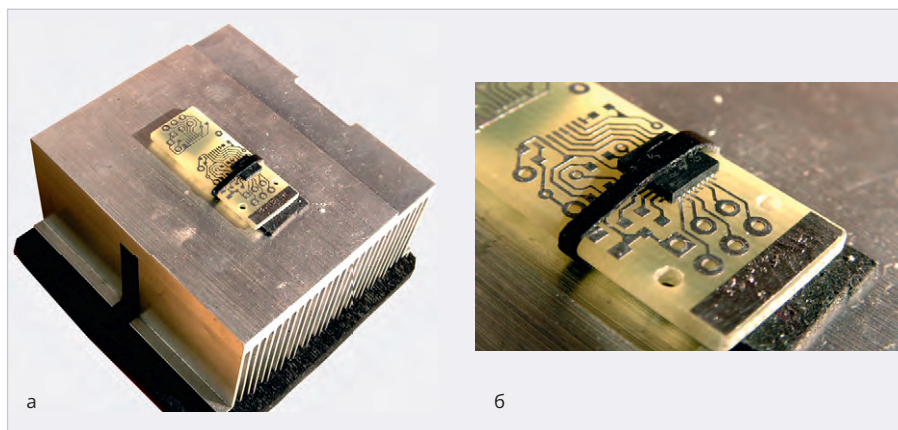


Рис. 46. Укрепление платы на поверхности радиатора: а – общий вид, б – укрупнённая фотография

окислилось. Вначале облуживается обратная сторона платы паяльником 20 Вт (рис. 40), затем паяльником-кисточкой (рис. 41) – сторона платы с расположением SMD-компонентов.

Когда паяльник разогреется, обмакивают эту «кисточку» в канифоль и расплавляют в ней немного припоя. После этого такой «кисточкой» проводят по дорожкам платы, залуживая

их. Эта процедура не отнимает много времени, а дорожки оказываются покрытыми тонким, достаточно равномерным слоем припоя. Поскольку у такой «кисточки» «ворс» достаточно мягкий, даже самые узкие дорожки (шириной до 0,2 мм) не повреждаются и не отслаиваются.

После того как плата залужена, её необходимо тщательно промыть в ацетоне. Плата к распайке компонентов готова.

Теперь по поводу распайки компонентов. Прежде всего, на плату с помощью плоскогубцев с узкими губками необходимо надеть несколько растянутых кембриков, которые следует предварительно нарезать ножницами (рис. 44а). Далее на обратную сторону платы необходимо приклеить две полоски пористой ленты с двусторонним липким слоем (рис. 44б). Затем плату необходимо закрепить на каком-либо тяжёлом предмете, как на столике (автор использовал ненужный радиатор от кулера компьютера), – рис. 44в, г. Далее можно уже приступить к распайке компонентов.

Вначале микропаяльником (рис. 36) с использованием пинцета с острыми губками (рис. 43), паяльных очков (рис. 10) и лупы ×10 распайваются все SMD-компоненты: первыми идут микросхемы и активные компоненты, затем – пассивные (резисторы, конденсаторы и т.п.). После этого вся плата обильно покрывается флюсом и мини-паяльником (рис. 38) ещё раз пропаиваются все активные и пассивные компоненты, кроме микросхем в QFN-корпусах. Далее плата снимается со столика и тщательно промывается в ацетоне (рис. 45а). После всего мини-паяльником распайваются компоненты навесного монтажа (рис. 45б). Здесь у читателя, возможно, возникнет вопрос: а зачем на плату надеваются кембрики (рис. 44)? Ответ на него – в следующем разделе статьи.

Распайка компонентов в QFN-корпусах

Наибольшие трудности и вопросы возникают в том, как же распаять микросхемы в QFN-корпусах с очень мелким шагом, например, 0,5 мм и даже 0,4 мм? На самом деле не всё так страшно. После того, как плата с надетым кембриком укреплена на столике, иглой, зажатой в ручных тисках для удерживания мелких предметов (рис. 43), пользуясь паяльными очка-

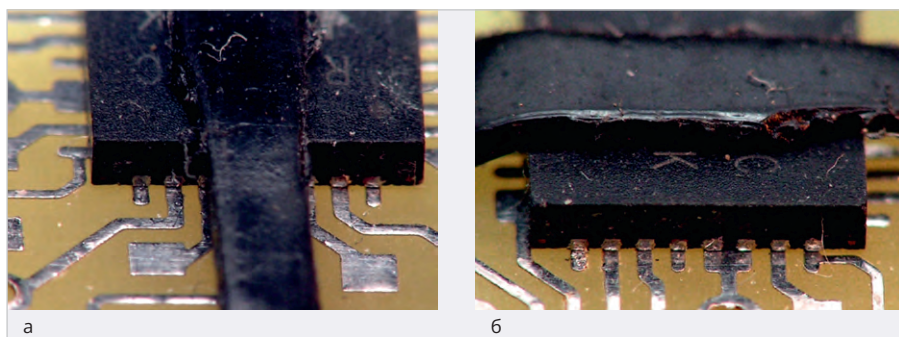


Рис. 47. Позиционирование микросхемы перед пайкой: а – вид вдоль кембрика, б – вид поперёк кембрика

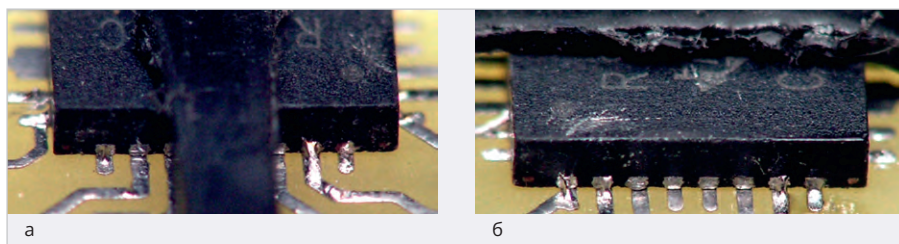


Рис. 48. «Наживление» микросхемы: а – вид вдоль кембрика, б – вид поперек кембрика

ми, подцепляют и приподнимают кембрик, затем пинцетом с острыми губками (рис. 43) подсовывают под него микросхему в QFN-корпусе (рис. 46). Далее, пользуясь лупой $\times 10$ и пинцетом, тщательно позиционируют микросхему так, чтобы все контактные площадки микросхемы со всех 4 сторон совпали с контактными площадками на плате (рис. 47). После этого с помощью зубочистки, обмакнутой во флюс, взяв её за самый конец, чтобы не сдвинуть микросхему, аккуратно проводят по местам пайки. Далее микросхему «наживляют» по углам, касаясь микропаяльником исключительно только дорожек и не прикасаясь к самой микросхеме, чтобы её не сдвинуть (рис. 48). После того как микросхема «наживлена», кембрик раскусывают кусачками (рис. 49) и удаляют. Далее зубочисткой покрывают флюсом все контактные площадки микросхемы и примыкающие к ней дорожки со всех 4 сторон. После этого окончательно пропаивают все контактные площадки микросхемы (рис. 50, рис. 51). Эти процедуры проводят также с использованием лупы $\times 10$.

Для микросхем с двусторонним расположением выводов (рис. 52) также нужно использовать кембрик для их позиционирования, поэтому на плате их должно быть несколько (рис. 44) – вот и ответ на вышеприведённый вопрос.

Примеры распайки микросхем в QFN-корпусах (рис. 53) красноречиво

свидетельствуют о том, что вышеприведенная процедура распайки достаточно проста, а микросхемы идеально припаяны к плате. И ничего сверхсложного в этом нет.

Выпаивание микросхем и компонентов в «неудобных» корпусах

Часто требуется извлечь микросхему в корпусе для поверхностного монтажа (SMD) из уже изготовленной платы. Если выпаивание таких микросхем с двусторонним расположением выводов (SOIC, SSOP и т.п.) не представляет особой проблемы, то с микросхемами в квадратных корпусах с четырёхсторонним расположением выводов, например, QFP (Quad Flat Package) и особенно «безногих» QFN (Quad Flat No-leads package), у которых в качестве выводов используются контактные площадки, расположенные с каждой стороны микросхемы, на взгляд автора, могут возникнуть определённые трудности. Дело осложняется ещё тем, что в корпусах QFN со стороны контактных площадок имеется «земляная» пластина, расположенная в середине микросхемы и также припаянная к плате. В подавляющем большинстве случаев для выпаивания таких микросхем используется достаточно дорогой (от 2000 руб. и выше) паяльный фен, горячий воздух которого направляется на микросхему, и при разогреве её до температуры плавления припоя она уже легко снимается с платы. Однако

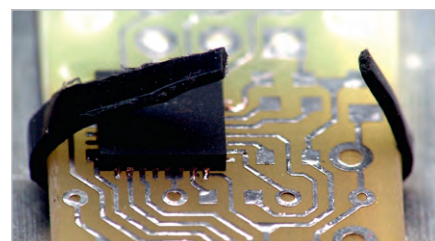


Рис. 49. Раскусывание кембрика

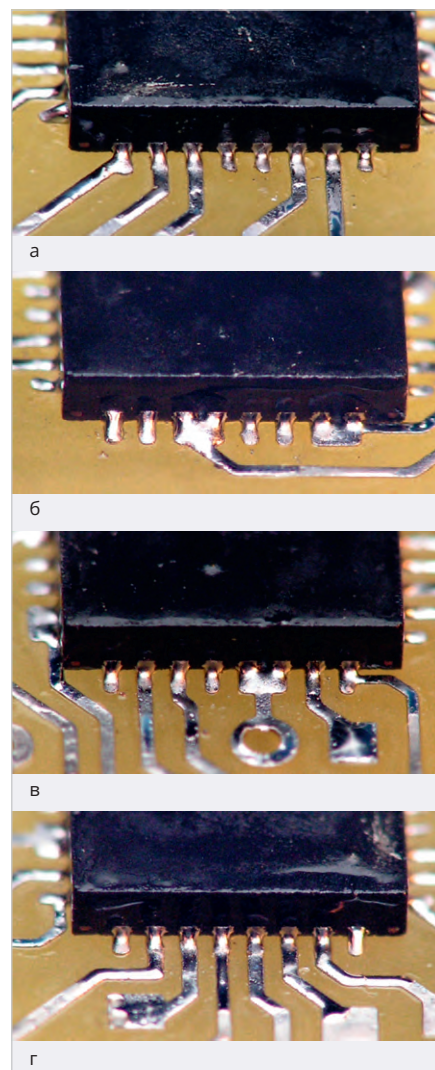


Рис. 50. Окончательная пропайка микросхемы: а, б, в, г – вид с 4-х сторон

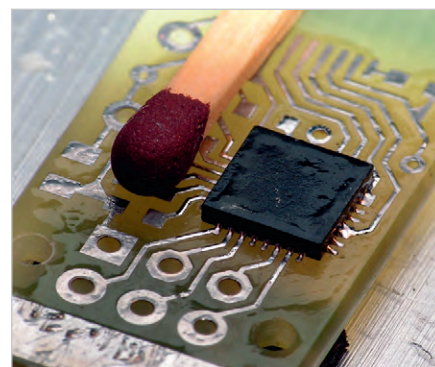


Рис. 51. Плата после распайки микросхемы (спичка – для оценки масштаба)

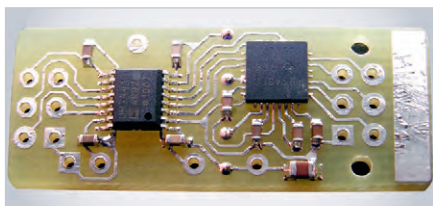


Рис. 52. Общий вид платы, промытой в ацетоне, после распайки SMD-компонентов



Рис. 54. 100-ваттная галогенная лампа с цоколем R7s с фарфоровыми изоляторами

такой способ имеет два недостатка. Во-первых, конечно, относительно высокая стоимость фена, во-вторых (и это главное), нагрев микросхемы до той температуры, которая позволяет расплавить припой, может привести к выходу из строя микросхемы. Особенно это касается микроконтроллеров с «защитой» программой, которую желательно сохранить. Можно, конечно, направить фен на обратную сторону платы для её разогрева, однако для получения приемлемой температуры расплавления припоя нагрев обратной стороны платы должен быть настолько интенсивным (для чего уже понадобится строительный фен), что стеклотекстолит (а это спрессованная стеклоткань, пропитанная эпоксидной – фенолформальдегидной смолой) начинает уже обугливаться и дымиться, выделяя настолько отвратительный запах фенола, что плату хочется побыстрее выбросить в окно.

Ниже приводится альтернативный способ нагревания обратной стороны платы инфракрасным излучением галогенной лампы. При этом обратная сторона платы не только не обугливается, но даже не особенно и нагревается, а припой со стороны микросхемы нагревается настолько интенсивно, что микросхема легко снимается с платы. Стоимость подобной галогенной лампы на порядок (а то и на два) меньше стоимости фена, а конструкция подобного «нагревателя» очень проста и поэтому достаточно дешева. Ниже будет

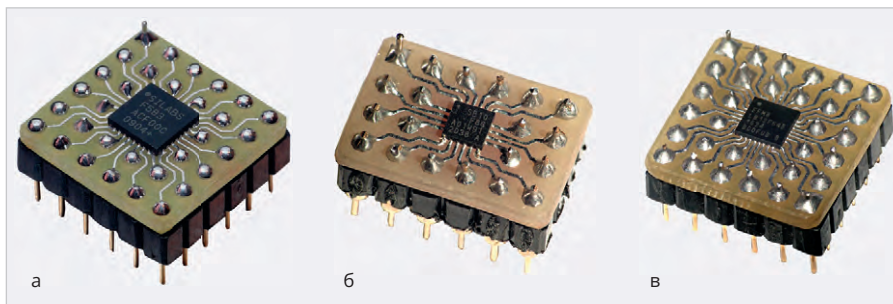


Рис. 53. Примеры распайки микросхем в QFN корпусах на платах-переходниках для МК: а – C8051F583 (QFN32), б – EFM8SB10 (QFN20), EFM8LB12 (QFN32)

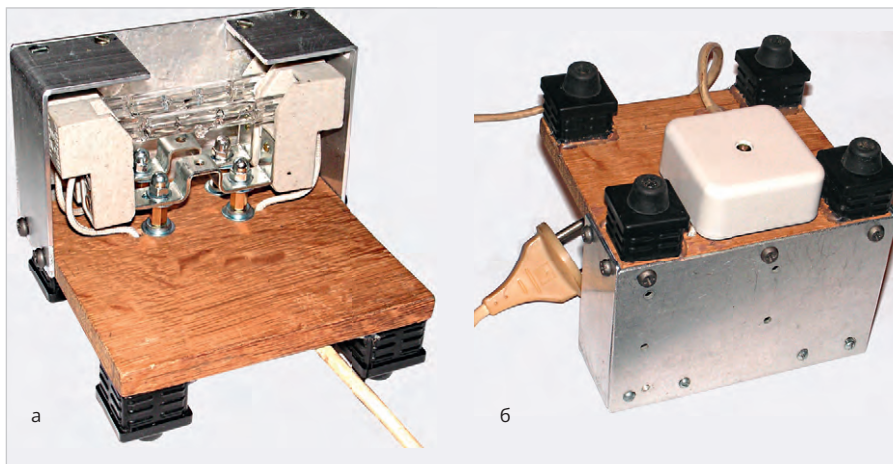


Рис. 55. Устройство для выпаивания микросхем: а – вид со стороны патронов, б – вид снизу

рассмотрена конструкция устройства, показаны принцип его работы и её результаты.

Для устройства автор использовал галогенные лампы с цоколем из фарфора, который не плавится от высокой температуры, и соответствующие патроны для них. Такие лампы, как правило, используются в прожекторах для освещения, которые могут работать часами, не выходя из строя. Это галогенные лампы, работающие от сетевого напряжения ~220 В с цоколем R7s, оснащённые фарфоровыми изоляторами. Самыми короткими из них являются лампы длиной 78 мм (рис. 54).

Для таких ламп имеются патроны, изоляторы которых также выполнены из фарфора, например, патрон LH39 (230V R7s J78), рассчитанный на максимальную мощность до 1500 Вт! Такой патрон, кроме того, оснащён специальными теплостойкими проводами длиной около 20 см с двойной изоляцией (внутренняя жила обмотана фторопластовой лентой, а поверх неё расположен ещё один изолирующий слой из термостойкой стеклоткани).

Стоят такие лампы и патроны для них не более 50 руб./шт. Если лампы с цоколем R7s длиной 78 мм купить лег-

ко, так как они достаточно распространены, то цоколь для них LH39 почему-то не так распространён, однако автору всё же удалось его найти. В крайнем случае, его можно приобрести на торговой интернет-площадке, правда, по цене в несколько раз более высокой (около 200–250 руб.).

На базе таких ламп и патронов для них и было сконструировано устройство для выпаивания микросхем. Основой устройства (рис. 55) послужила дубовая струганная доска шириной 10 см и толщиной 1 см, от которой был отрезан кусок длиной 11 см. Патроны для двух ламп закреплены с помощью двух шестигранных латунных стоек длиной 10 мм, оборудованных с одной стороны шпильками с резьбой М4, с другой – внутренней резьбой М4. К доске стойки достаточно прочно прикручены через просверленные отверстия с обратной стороны винтами М4 с использованием широких кузовных шайб. Патроны (их два) крепятся к стойкам двумя гайками М4 и обычными шайбами. Провода пропущены через отверстия в доске (рис. 55а) на обратную сторону, где скоммутированы с сетевым проводом (обе лампы включены параллельно).

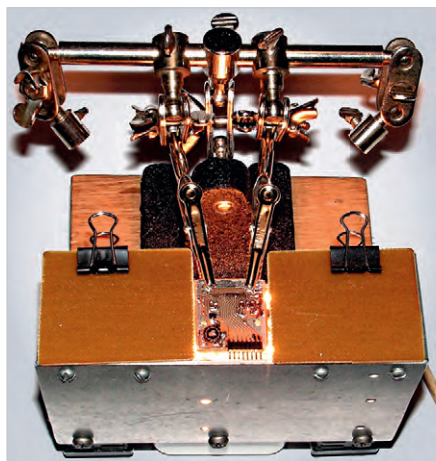


Рис. 56. Внешний вид включённого устройства с платой, зажатой в «крокодилах» «третьей руки»

Ввиду простоты схема не приводится. Коммутация осуществлена в распределительной коробке, прикрученной к доске двумя саморезами (она белого цвета на рис. 55б). Сетевой провод дополнительно приклеен к доске термоклеем. Для того чтобы устройство не скользило, по углам доски установлены мебельные пластмассовые подпятники, которые вместе с резиновыми ножками прикручены к доске саморезами и, чтобы не крутились, дополнительно укреплены термоклеем (рис. 55б). Чтобы невзначай не коснуться контактов патронов, находящихся под сетевым напряжением, и чтобы свет от ламп не слепил глаза, к доске с двух сторон двумя саморезами прикручены два уголка, согнутых под 90°, из алюминиевой полосы шириной 35 мм и толщиной 2 мм. К этим уголкам с помощью ещё двух алюминиевых уголков 10×10 мм толщиной 1,5 мм, в которых просверлены отверстия и нарезана резьба М3, винтами М3 прикручена алюминиевая пластина, которая дополнительно снизу прикручена к доске саморезами. Такая конструкция обладает достаточной жёсткостью и поэтому не подвергается какому-либо короблению от высокой температуры. Кстати, как показал опыт эксплуатации устройства, пластина и уголки даже особенно не нагреваются и к ним можно свободно прикасаться рукой (по ощущениям автора при работе ламп в течение 5 минут температура нагрева получившегося алюминиевого кожуха была не более 40°C). Далее автор оставил включенным устройство на полчаса. За это время ничего с устройством не произошло, а кожух нагрелся чуть больше, но не до такой температуры,

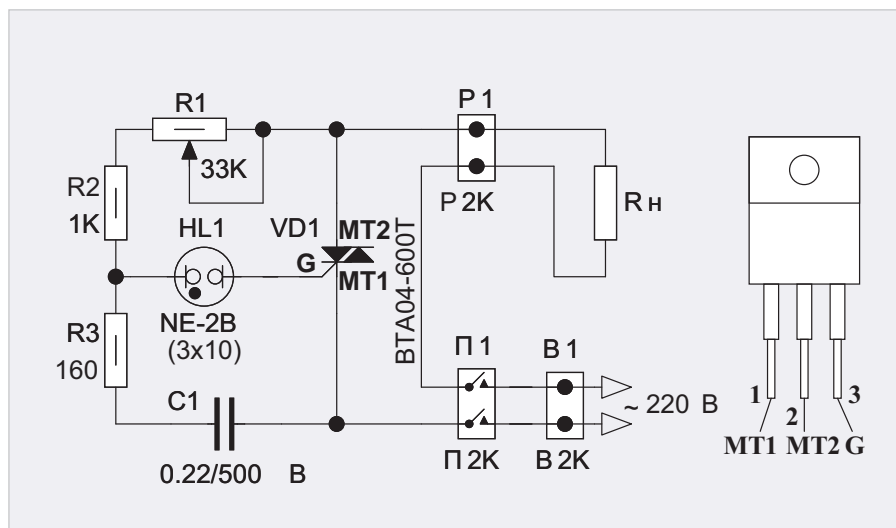


Рис. 57. Симисторный регулятор мощности с неоновой лампой

чтобы к нему нельзя было прикоснуться рукой (примерно до 50°C).

На свободное место доски установлено хорошо известное устройство «третья рука» (долгое время лежавшая без дела) с двумя зажимами типа «крокодил», которые достаточно прочно держат плату с выпаиваемой микросхемой на расстоянии около 20 мм от ламп (рис. 56). Для того чтобы свет от ламп не слепил глаза, с двух сторон платы были установлены две шторки из тонкого (1 мм) одностороннего стеклотекстолита, которые были прижаты к уголкам кожуха двумя канцелярскими зажимами медным слоем вниз. Расстояние между шторками легко регулируется и устанавливается в соответствии с размером платы. После 3–4 минут прогрева микросхема легко снимается обычным тонким пинцетом. При этом плата не выделяет никаких дополнительных запахов, поскольку сильно не нагревается, хотя благодаря инфракрасному излучению ламп, проникающему сквозь плату и нагревающему дорожки, припой плавится достаточно интенсивно.

Автор проверял работу устройства с лампами мощностью 60, 100 и 150 Вт. Как показал эксперимент, при использовании ламп мощностью 60 Вт даже при 10-минутной выдержке платы на расстоянии 20 мм от ламп припой не плавится, и такие лампы применять нецелесообразно. При применении ламп мощностью 150 Вт, во-первых, уже после 2 минут прогрева плата настолько интенсивно нагревается, что начинает дымиться, выделяя неприятный запах, во-вторых, эти лампы очень яркие и слепят глаза. При применении ламп мощностью 100 Вт устрой-

ство работает идеально, и, как указано выше, для выпаивания компонентов достаточно 3–4 минут прогрева. При этом никаких неприятных запахов плата не выделяет.

Здесь следует заметить, что есть некоторые нюансы использования описанного устройства. Во-первых, даже при применении 100-ваттных ламп бывают случаи, когда их мощность следует несколько снизить. Если с платы требуется удалить относительно большое количество компонентов (например, с десяток конденсаторов, нескольких резисторов, диодов или более простых микросхем), то после разогрева припоя на это требуется некоторое время (несколько минут). За это время интенсивный нагрев может привести к тому, что плата начнёт дымиться и выделять неприятный запах. Чтобы этого не произошло, интенсивность нагрева желательно уменьшить.

Во-вторых, для того чтобы использовать лампы мощностью 150 Вт, их интенсивность нагрева (как указано выше) также следует ограничить.

В-третьих, при включении ламп, когда их спирали ещё холодные, в связи с чем они имеют низкое сопротивление, начальный ток может достигать достаточно больших значений, что чревато выходом ламп из строя, т.е. они могут попросту перегореть (что довольно часто случается при использовании ламп накаливания). В связи с этим при включении ламп их мощность следует ограничить.

Снять все эти три проблемы позволяет достаточно простой симисторный регулятор мощности, описанный ниже.

Основой схемы регулятора мощности (рис. 57) послужила давняя раз-

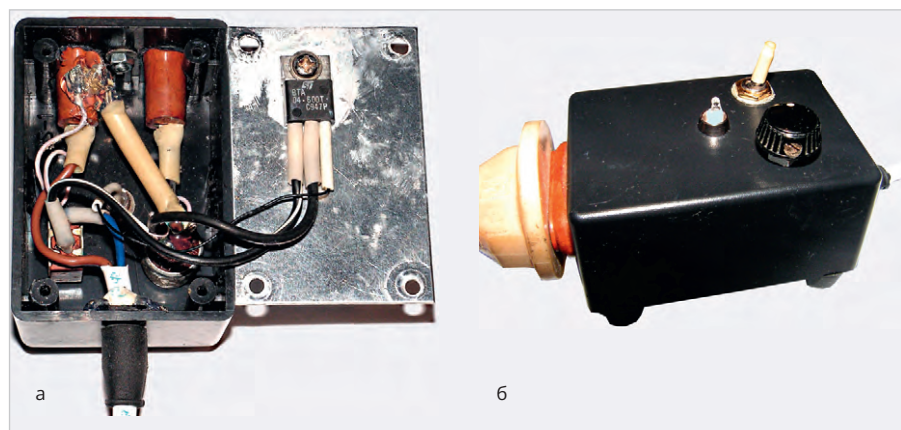


Рис. 58. Общий вид регулятора мощности: а – в открытом корпусе, б – в сборе, в работе

работка автора [7], где использован симистор МАС97А8 в корпусе ТО-92 с максимальным током 1 А и максимальным током включения (I_{CT}) 5 мА, подаваемым на управляющий электрод (G). Особенностью схемы является применение миниатюрной неоновой лампы NE-2В голубого цвета свечения размером всего 4×9 мм для управления симистором взамен динистора в хорошо известных подобных устройствах. Тройное преимущество неоновой лампы перед динистором заключается в следующем. Во-первых, два электрода такой лампы гальванически изолированы друг от друга, что не позволяет помехам сетевого напряжения, возникающим при переключениях симистора, проникнуть на его управляющий электрод. Во-вторых, достаточно слабый ток лампы (несколько мА), когда загорается газ неон, с одной стороны, не превышает максимальный ток управляющего электрода симистора, с другой – достаточен для его включения. Обе эти причины предохраняют симистор от выхода из строя, или, другими словами, не позволяют сжечь симистор большим током, подаваемым на управляющий электрод, что существенно повышает надёжность работы регулятора. И наконец, в-третьих, неоновая лампа является своеобразным индикатором, по свечению которого можно судить о мощности, пропускаемой симистором. Здесь, правда, связь обратная – чем слабее светится лампа, тем большую мощность пропускает симистор. Хотя, конечно, о мощности, в нашем случае, можно судить и по свечению самих галогенных ламп.

Как видно из схемы рис. 57, в ней используется симистор ВТА04-600Т (VD1) в корпусе ТО-220 с максимальным напряжением 600 В, максимальным током 4 А и максималь-

ным током включения I_{CT} в 5 мА (как и у МАС97А8), позволяющим управлять им с помощью неоновой лампы. Однако относительно большой ток симистора при работе при максимальной нагрузке, когда галогенные лампы работают на полную мощность, приводит к его разогреву. Поэтому для симистора необходимо предусмотреть небольшой радиатор. В качестве такового автор использовал алюминиевое днище корпуса, к которому прикручен симистор.

Здесь следует сделать некоторое отступление относительно корпусов симисторов. Симисторы с максимальным током в 4 А (и более) выпускаются в корпусах двух типов. Первый тип – это стандартный корпус ТО-220 с металлическим основанием, в котором имеется отверстие для его закрепления на радиаторе. В свою очередь, металлическое основание корпуса либо имеет контакт с центральным электродом симистора (MT2), либо изолировано от него. Второй тип – полностью изолированный пластмассовый корпус SOT186A (ТО-220F), который также оснащён отверстием для его закрепления на радиаторе. Для того чтобы исключить прикосание рукой к сетевому напряжению, если невзначай коснуться рукой днища корпуса, оно должно быть изолировано от этого высокого напряжения. Если симистор в корпусе ТО-220 имеет контакт металлического основания с центральным электродом, то для изоляции днища корпуса от высокого напряжения потребуется применить изоляционную прокладку, желательна керамическую, и специальную изоляционную втулку. Стоимость керамической прокладки довольно высока и достигает стоимости самого симистора, поэтому изоляцию такого типа применять нежела-

тельно. Теплопередача металлического основания корпуса ТО-220 несколько выше теплопередачи пластмассового корпуса SOT186A. Наиболее целесообразно применять симисторы в корпусе ТО-220 с изолированным металлическим основанием.

Кроме того, для того чтобы симистор управлялся малым током неоновой лампы NE-2В (HL1), его ток управления не должен превышать 5 мА. Такие симисторы ещё называют симисторами с управлением логическим уровнем (Logic Level Triac).

Резюмируя вышесказанное, наиболее целесообразно использовать симисторы в корпусе ТО-220 с изолированным металлическим основанием и с управлением логическим уровнем. Одним из представителей таких симисторов и является ВТА04-600Т (VD1), применённый в схеме рис. 57. Хороший результат показал также симистор ВТА208Х-1000С в полностью изолированном пластмассовом корпусе SOT186A.

Теперь о конструкции регулятора. Он собран в пластиковом корпусе G1031ВА размером 64×44×30 мм с алюминиевым днищем (рис. 58). Розетка P1 (РД1-1, рассчитанная на ток 6 А) из карболита, в которую вставляется вилка от устройства с галогенными лампами (условно обозначенная на схеме рис. 57 как Rн), расположена на узкой боковой поверхности корпуса, к которой она прикручена винтом М3 впотай и гайкой. Переменный резистор R1 (СП4 1 – 0,5 Вт), на шток которого надета ручка, и выключатель П1 (П1Т-1-1В, рассчитанный на ток 5 А) прикручены к верхней поверхности корпуса соответствующими гайками. Лампа (NE-2В размером 4×9 мм) вставлена в металлический держатель для светодиодов (RLL-3010), который также прикручен соответствующей гайкой к верхней поверхности корпуса. Внутренний диаметр трубки с резьбой этого держателя составляет 4,2 мм, так что лампа легко в него вставляется, а конусовидная полиэтиленовая пробка (поставляемая вместе с держателем) фиксирует лампу. Керамический конденсатор для поверхностного монтажа размером 2220 (5,6×5×1,8 мм) укреплен на одном из выступов розетки термоклеем. К одному из его контактов припаян резистор R3 (рис. 57), а к переменному резистору припаян резистор R2. Оба этих резистора спаяны между собой, и на них надет кембрик (трубка ПВХ),

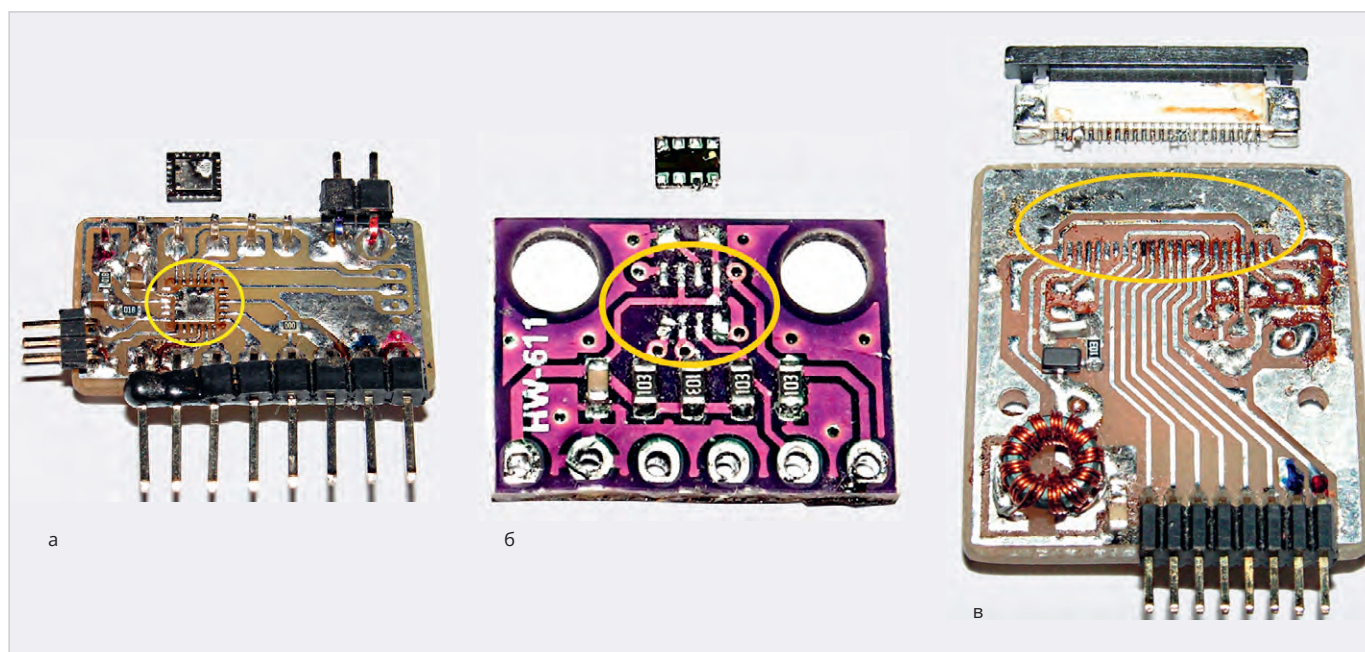


Рис. 59. Примеры выпайки компонентов с плат: а – микроконтроллер EFM8SB20 в корпусе QFN-24, б – датчик давления и температуры BMP280 в корпусе LGA-8, в – разъём для подключения шлейфа FPC24/0.5mm

разрезанный вдоль и укрепленный с двух сторон термоклеем. Сетевой провод с вилкой В1 на конце пропущен через резиновую втулку, расположенную на второй узкой боковой поверхности корпуса и дополнительно зафиксированную термоклеем. Симистор VD1 прикручен к внутренней поверхности днища корпуса винтом М3 и гайкой с использованием теплопроводной пасты КПТ-8. Таким образом, поскольку все компоненты закреплены на корпусе, для схемы не требуется печатной платы, и все соединения выполнены монтажным проводом сечением не менее 0,5–0,8 мм², кроме проводов для неоновой лампы, которые имеют сечение 0,05–0,1 мм². Для того чтобы корпус не скользил, на днище прикручены 4 резиновые ножки.

Автор проверял работу регулятора с лампами мощностью 150 Вт. Для приемлемого нагрева платы ручку резистора регулятора мощности следует установить приблизительно на 2/3 от максимального угла поворота, т.е. примерно на 200° (максимальный угол поворота резистора СП4 1 составляет 300°).

При работе с лампами 100 Вт угол поворота должен быть максимальным. При этом выходное напряжение регулятора приблизительно на 10 В ниже входного, т.е. если входное напряжение составляет 220 В, то максимальное выходное напряжение будет 210 В. Минимальное напряжение при полностью выведенной влево ручке перемен-

ного резистора составило около 35 В. Измерение напряжений производилось стрелочным тестером (ТЛ-4) на диапазоне «~300 В» (т.е. измерялось действующее значение напряжения переменного тока).

Здесь следует добавить, что подобный регулятор с симистором, рассчитанный на ток в 4 А, может использоваться и с другими устройствами, предназначенными для нагрева (паяльниками, электроплитками и т.п.), мощностью до 800 Вт, а с симистором с максимальным током 8 А мощность нагревателей может быть увеличена до 1,5 кВт.

Примеры работы устройства (рис. 59) достаточно красноречиво свидетельствуют о том, что с его помощью можно не только легко выпаять микросхему в корпусе QFN-24 – рис. 59а (хотя, конечно, и об этом), но также возможно выпаять микросхему в корпусе LGA-8 (рис. 59б), у которого контакты расположены на его дне и на достаточно приличном расстоянии от его краёв, и разогреть эти контакты обычным паяльником не представляется возможным, не повредив саму микросхему. Кроме того, для того чтобы выпаять 24-контактный разъём (для подключения шлейфа), у которого к плате припаяны не только сами контакты, но и крепёжные площадки, расположенные по бокам (рис. 59в), требуется одновременно разогреть паяльником каждый контакт разъёма и крепёжные площадки, что даже двумя паяльниками сделать невозможно.

С помощью описанного устройства после разогрева платы все компоненты (рис. 59) легко снимаются пинцетом.

Как можно заметить из рис. 59, все выпаянные компоненты имеют заусенцы в виде остатков припоя, а некоторые контакты разъёма даже спаяны вместе (рис. 59в), поэтому к повторному использованию непригодны. Чтобы снять эту проблему, требуется удалить все остатки припоя с компонентов.

Для этого компонент следует приклеить к небольшому расположенному на столике кусочку пористой ленты с двусторонним липким слоем (рис. 44в, рис. 46а). Далее покрыть компонент (микросхему или контакты разъёма) жидким флюсом с помощью кисточки (рис. 42).

Затем к насадке для мини-паяльника (рис. 38) следует примотать тонким одножильным проводом (диаметром 0,2–0,3 мм) порядка 30–40 тонких (0,05–0,1 мм в диаметре) медных посеребрённых нитей, которые можно извлечь, например, из провода МС16-13 сечением 0,03–0,05 мм². Эти нити следует предварительно скрутить, а после примотки к насадке расправить так, чтобы получилась своего рода насадка-кисточка (рис. 60). Далее, надев такую насадку на мини-паяльник, под лупой ×10 следует аккуратно снять все заусенцы с соответствующего компонента.

После тщательной промывки компонента в ацетоне он готов к дальнейшему использованию. Автор проверял работу программы микроконтроллера,



Рис. 60. Насадка-кисточка на паяльник 12 В (рис. 38)

выпаянного подобным образом. Как показала проверка, программа осталась работоспособной.

Заключение

В заключение хотелось бы отметить следующее. Хотя статья в некотором смысле и носит производственный характер, она в первую очередь предназначена именно для разработчиков электронных устройств, а отнюдь не для производителей печатных плат. Автору хорошо известно на личном опыте, какие колоссальные усилия, время и средства тратит разработчик устройств на то, чтобы получить печатную плату, заказанную в сторонней организации. Сколько тратится времени, чтобы по несколько раз проверять разводку и исправлять ошибки, сделанные разводчиком. Кроме

того, ошибки, сделанные разработчиком, автоматически переносятся на разводку разводчиком и, в конечном этапе, на саму плату. В лучшем случае на готовой плате эти ошибки могут быть исправлены разрезанием дорожек и распайкой новых перемычек, а в худшем – придётся заказывать новую плату и, естественно, за это платить (не только деньгами, но и дополнительными усилиями, временем).

Если же разработчик производит печатную плату своими силами, пусть даже не так идеально по разводке и по сверлению отверстий, как профессионал, то максимум, чем может похвастаться разработчик за свою ошибку, – шлепком самого себя по лбу. Зато никаких денег это не стоит. Вот для этого и написана эта статья.

Литература

1. Кузьминов А. Метод фоторепродуцирования для изготовления фотшаблона печатных плат в домашних условиях // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 5. С. 17–23; № 6. С. 10–15; № 7. С. 8–15.
2. Кузьминов А. Изготовление устройств на печатных платах с высоким разрешением в домашних условиях // Технологии в электронной промышленности. 2010. № 8. С. 18–25; 2011. № 1. С. 9–13; № 2. С. 18–25.
3. Кузьминов А. Технология изготовления печатных плат с высоким разрешением в домашних условиях // Радио. 2017. № 10. С. 24–28.
4. Кузьминов А. Как использовать фольгу односторонней печатной платы в качестве общего провода // Радио. 2019. № 2. С. 28–30.
5. Кузьминов А. Тиристорный регулятор скорости вращения коллекторных двигателей постоянного тока // Современная электроника. 2013. № 2. С. 50–53.
6. Кузьминов А. Усовершенствованное устройство для выпаивания микросхем в корпусах QFN/QFP // Радиолюцман. 2023. № 3–4. С. 60–66.
7. Кузьминов А. Регулятор мощности паяльника в сетевой вилке // Современная электроника. 2014. № 2. С. 48–49. ©

НОВОСТИ МИРА

НИИМА «Прогресс» разработал первый отечественный RISC-V микроконтроллер MIK32 AMUP

MIK32 AMUP – первый полностью отечественный микроконтроллер с ядром на открытой архитектуре RISC-V – предназначен для устройств промышленной автоматизации и интернета вещей, беспроводной периферии, интеллектуальных сетей, охранных систем, сигнализации, телеметрии, мониторинга, умного дома и управления климатом, освещением и других инфраструктурных систем.

Применение:

- системы автоматизации;
 - измерительные приборы;
 - инфраструктурная аппаратура;
 - бортовые устройства;
 - интернет вещей;
 - умный дом;
 - медицинская техника;
 - транспортная инфраструктура;
 - робототехника;
 - телекоммуникационное оборудование;
- Преимущества:
- полный цикл производства в России, единственный на рынке отечественный микроконтроллер 1-го уровня;

- рыночная цена по сравнению с импортными МК, минимальная стоимость среди российских аналогов;
 - стабильность поставок, независимость от ограничений на импорт высокотехнологичной продукции;
 - аппаратная безопасность, встроенная ГОСТ-криптозащита;
 - отладочная микроконтроллерная платформа на основе RISC-V;
 - отсутствие зарубежных проприетарных IP.
- Характеристики:

Ядро:

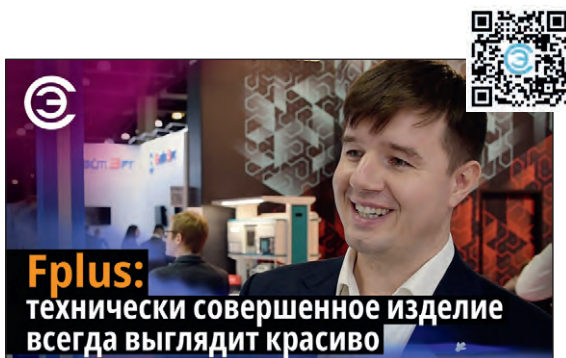
- RISC-V.
- Интерфейсы:
- SPI, I²C, UART, датчик температуры;
 - АЦП 12 бит, 8 каналов, частота дискретизации до 1 МГц;
 - ЦАП 12 бит, 4 канала, частота дискретизации до 1 МГц;
 - часы реального времени с поддержкой полного календаря;
 - поддерживаемые частоты опорного тактового сигнала 1–32 МГц;
 - watchdog.
- Память:
- ОПЗУ (Однократно программируемая ПЗУ) – 256 бит;



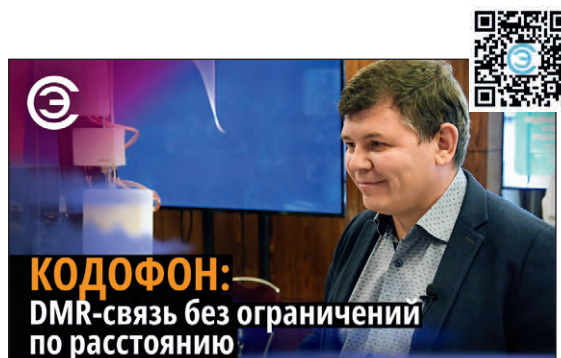
- ОЗУ – 16 КБ;
 - ПЗУ (EEPROM) – 8 КБ;
 - подключаемая внешняя память программ (QSPI Flash) – до 16 МБ;
 - кэш-память внешней шины памяти программ – 1 КБ.
- Таймеры:
- таймеры 16- и 32-разрядные с поддержкой ШИМ, захвата/сравнения сигналов.
- Особенности:
- аппаратная поддержка крипто-алгоритмов ГОСТ 34.12–2018 и AES128;
 - рабочие температуры –40...+85°C;
 - корпус QFN64.

rloman.ru

Смотрите на канале **СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**



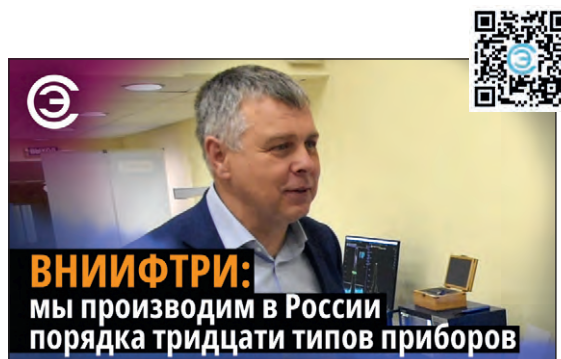
Интервью с Сергеем Трюханом –
коммерческим директором Fplus
на выставке «Электроника России»



Интервью с Александром Садыковым –
коммерческим директором Кодофон
на конференции ProfComm-2023



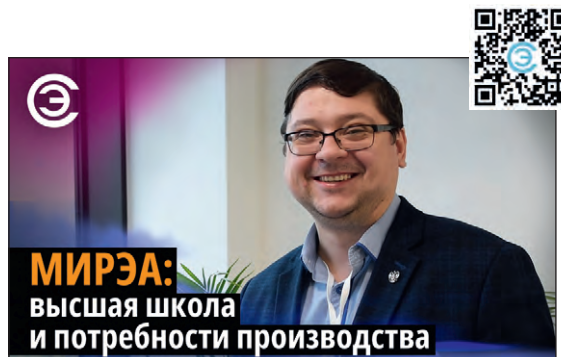
Интервью с Александром Шалумовым –
генеральным директором НИИ «АСОНИКА»,
председателем технического комитета
по стандартизации ТК 165 САПР электроники



Интервью с Иваном Михайловичем Малаем –
заместителем генерального директора
ФГУП «ВНИИФТРИ» по радиотехническим
и электромагнитным измерениям.

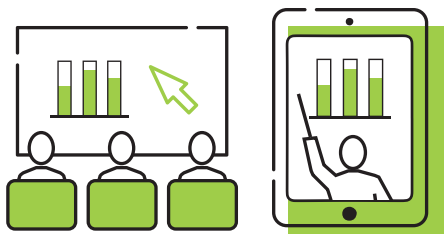


Интервью с Михаилом Нагорским –
техническим директором КОНЦЕРН ГУДВИН
(ГУДВИН ЕВРОПА)



Интервью с Дмитрием Воруничевым –
заместителем директора Института
радиоэлектроники и информатики, РТУ МИРЭА

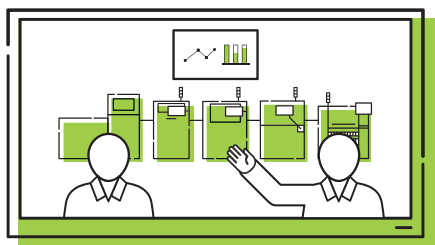
АКАДЕМИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ОСТЕК-СМТ



СЕМИНАРЫ
ОНЛАЙН И ОФЛАЙН



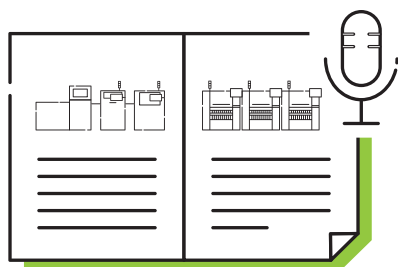
ПРОФИЛЬНЫЕ КАНАЛЫ
В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ



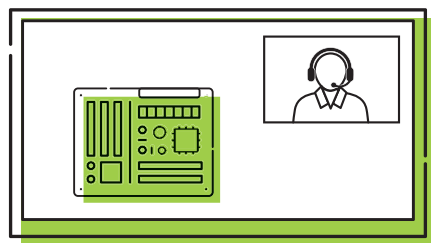
РЕПОРТАЖИ И КЕЙСЫ
С ПРОИЗВОДСТВ



ВИДЕООБЗОРЫ
РЕШЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЙ



ЭКСПЕРТНЫЕ
СТАТЬИ И ИНТЕРВЬЮ



ВИДЕОПРЕЗЕНТАЦИИ
И ЗАПИСИ ВЕБИНАРОВ

Реклама

