

В номере:

СДЕЛАНО НА ГЛАЗОК:
возможности
видеоконтроля
на производстве

**ТАБЛЕТКА
ОТ ВЫНОСА МОЗГА:**
нейростимуляторы
лечат от депрессии

**БАТАРЕЙКА ПО
НАСЛЕДСТВУ:**
современные изотопные
элементы питания

YouTube



Telegram



Измерительная система Кобальт FX

ОТЕЧЕСТВЕННАЯ СИСТЕМА
для измерения S-параметров
в расширенном
диапазоне до 178 ГГц



РОССИЙСКИЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬ
ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

PLANAR

planarchel.ru

8 800 222 12 11



РЕКЛАМА



22-31
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

Организатор



При поддержке



Под патронатом



В рамках





EXPO ELECTRONICA

26-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ

16–18 АПРЕЛЯ 2024
МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО



ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ,
МОДУЛИ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ



ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ
И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА
ЭЛЕКТРОНИКИ



ВСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ

NEW



РОБОТОТЕХНИКА

NEW



ИТ- И ЦИФРОВЫЕ
РЕШЕНИЯ



ОРГАНИЗАТОР
ORGANISER



ПОЛУЧИТЕ БЕСПЛАТНЫЙ БИЛЕТ
ПО QR КОДУ ИЛИ НА САЙТЕ
EXPOELECTRONICA.RU

ПО ПРОМОКОДУ
EEMAGAZINE24



Здравствуйтесь, уважаемые друзья!

В этом выпуске журнала мы расскажем вам о развитии нового направления в медицине – нейростимуляторах-имплантах, помогающих справиться с нервными расстройствами и депрессиями, ставшими буквально бичом современной цивилизации.

Когда требуется надёжное позиционирование в условиях недоступности сигналов спутниковых и иных систем навигации, МЭМС-гироскопы и акселерометры незаменимы. Наш рассказ будет об инерциальных датчиках, поставляемых в РФ под торговой маркой КТР.

«Эка невидаль – квазипиковый измеритель уровня звукового сигнала», – скажете вы. Однако сегодня мы подробно расскажем вам, как собрать ничем не уступающее лучшим образцам современное устройство на недорогой отечественной элементной базе.

Электронное обоняние, да ещё и в паре с искусственным интеллектом, поможет кардинально изменить многие сферы деятельности: электронный нос сможет лучше собачьего улавливать микроконцентрации вредных веществ, обнаруживать взрывчатые и прочие запрещённые вещества и даже анализировать «на лету» сложный химический состав газовых смесей... Но это всё в недалёком будущем, а сегодня мы поговорим о доступных на рынке решениях в этой области.

Хотите батарейку, которая проработает в вашем гаджете без замены, скажем, 50 лет кряду? А ведь такие уже есть, и называются они «изотопные элементы». О том, как они устроены, о перспективах и ограничениях их массового применения читайте в нашем журнале.

На каких кремниевых пластинах производство микроэлектроники малой степени интеграции более рентабельно – на 100- или 200-миллиметровых? Вот вам ответ прямо из первых рук – от компании «Микрон»!

В этом журнале вы сможете прочитать не только об этом, но и о многом другом. Приглашаем вас на наш обновлённый информационный портал www.cta.ru.

Спасибо, что 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
shop@cta.ru • www.cta.ru

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

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

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».
Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19,
бизнес-центр 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, 2024

ЧИТАЙТЕ
ЖУРНАЛ

В ЭЛЕКТРОННОЙ ВЕРСИИ
на сайте www.cta.ru
И
В ПЕЧАТНОЙ ВЕРСИИ
по подписке

СОДЕРЖАНИЕ 3/2024

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

Cvilux	35
Delta Design	4-я стр. обл.
Litemax	19
Raystar	64
МикроЛАБ Системс	5
Морион	6
Орбита	6, 15
ПЛАНАР	1-я стр. обл., 4
СВЯЗЬ-2024	2-я стр. обл.
Фаворит-ЭК	6, 37
ЭкспоЭлектроника-2024	1
Элеконд	17

Смотрите на канале
**СОВРЕМЕННАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА**

**Вместе
мы сила!**



Иван Покровский, АРПЭ



РЫНОК

4 Новости российского рынка

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

7 Электронные устройства DOT в медицинской технике

Андрей Кашкаров

16 Инновационные электронные и оптогенетические технологии в беспроводном управлении мозговой активностью через имплантат

Антти Суомалайнен

20 Ядерные батареи будущего

Андрей Ласорла

26 Преимущества переноса производства микросхем малой степени интеграции на кремниевые пластины большего диаметра

Карина Абагян, Андрей Денисов

28 Практические решения автоматизации производства, видеоидентификации и связи. Обзор и перспективы

Вадим Экземплярский

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

36 Точность и стабильность инерциальных датчиков КТР

Александр Бекмачев

42 На пути к электронному обонянию. Обзор электрохимических, оптических, инфракрасных, полупроводниковых, термокаталитических датчиков газа для контроля параметров разных сред

Надежда Любимая

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

52 Квазипиковый измеритель уровня звукового сигнала

Александр Одинец

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

55 Поиское проектирование минимально-фазовых цифровых фильтров

Владимир Бугров

Новости

ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Новые отечественные модули расширения частотного диапазона до 170 ГГц компании MWAVE доступны для заказа

С января 2024 года модули расширения частотного диапазона (МРЧД) ВЕКТОР компании MWAVE (ООО «МВЭЙВ») доступны для заказа в составе измерительной системы КобальтFX компании «ПЛАНАР», принявшей активное участие в разработке и испытаниях опытных образцов и являющейся эксклюзивным дилером МРЧД MWAVE на территории РФ.

Измерительная система КобальтFX предназначена для измерения S-параметров в диапазоне миллиметровых длин волн от 18 до 178 ГГц и может быть использована для проверки, настройки, исследования и разработки различных радиотехнических устройств, используемых в радиоэлектронике, связи, радиолокации, измерительной технике, в условиях промышленного производства и лабораторий, в том числе в составе автоматизированных измерительных стендов. Основу системы составляет высокопроизводительный векторный анализатор цепей (ВАЦ) серии КОБАЛЬТ С4xxx и модули расширения частотного диапазона.

Модули расширения частотного диапазона (МРЧД) серии ВЕКТОР работают совместно с ВАЦ серии КОБАЛЬТ, образуя измерительную систему комплексных коэффициентов передачи и отражения в расширенном диапазоне частот. Управление системой осуществляется программным обеспечением анализатора.

Модули представлены в трёх вариантах исполнения, различающихся по диапазону рабочих частот:

- ВЕКТОР 50–75 ГГц;
- ВЕКТОР 75–110 ГГц;
- ВЕКТОР 110–170 ГГц.

МРЧД могут применяться для измерения фильтров, в антенных измерениях и для измерений на зондовых станциях (on-wafer). Возможна работа с непрерывным сигналом и с модулированной несущей.



Модификации МРЧД со встроенным аттенюатором ВЕКТОР-А позволяют перестраивать выходную мощность в диапазоне до -40 дБ (тип. -50 дБ), что позволяет измерять параметры активных устройств (усилителей, МШУ), в том числе точку компрессии в автоматическом режиме. Готовится к производству модификация МРЧД для работы с прямоугольными волноводами российских стандартов от 53 до 178 ГГц.

Автономная работа модулей без подключения к анализатору цепей не предусмотрена.

В ходе производственных испытаний и сравнительного анализа было установлено, что технические параметры данных приборов несколько не уступают зарубежным аналогам. В ближайшем будущем модули будут внесены в Госреестр СИ.

О компании «ПЛАНАР»

Более 30 лет компания «ПЛАНАР» является одним из лидирующих предприятий России, специализирующихся на разработке и производстве высококачественного электронного оборудования. В настоящее время компания быстро развивается, наращивая свои производственные мощности для выпуска широкого спектра теле-

коммуникационных и контрольно-измерительных решений мирового уровня. «ПЛАНАР» обеспечивает не только гарантию на каждое своё изделие, но и предлагает постгарантийное обслуживание, консультации и техническое сопровождение. Более подробная информация о компании доступна на сайте: <https://www.planarchel.ru/>.

О компании «МВЭЙВ» (MWAVE)

ООО «МВЭЙВ» – ведущий отечественный производитель сверхвысокочастотной микроэлектроники, успешно конкурирующий с зарубежными компаниями. В компании реализован полный производственный цикл, начиная от собственной разработки топологий микросхем, микрофабрикации монолитных интегральных схем в условиях чистой зоны, корпусирования чипов, сборки на их основе СВЧ-модулей и заканчивая готовыми серийными изделиями. Сегодня «МВЭЙВ» насчитывает более 50 высококвалифицированных сотрудников, из которых 10 кандидатов и 3 доктора наук. Компания поставляет свою продукцию в более чем 20 стран мира. Более подробная информация доступна на сайте: <https://emwave.ru/>.

Модули тестирования и теплового анализа систем MicroTCA фирмы «МикроЛАБ Системс»

Российская фирма «МикроЛАБ Системс» (г. Москва) продолжает расширять номенклатуру инфраструктурных компонентов собственной разработки для высокопроизводительных систем ЦОС TORNADO-MTCA «классического» промышленного стандарта PICMG MicroTCA (MTCA.0). Новые модули T/AX-PLM и T/MX-PLM/MCH позволяют диагностировать источники питания и систему охлаждения шасси MicroTCA, а также моделировать различные сценарии распределения тепла внутри систем ЦОС TORNADO-MTCA с высокопроизводительными AdvancedMC (AMC) модулями ЦОС TORNADO-A с ПЦОС/ПЛИС, submodule FMC/FMC+ TORNADO-F с высокоскоростными АЦП/ЦАП и модулями коммутации и управления TORNADO-MCH, которые характеризуются высоким тепловыделением. Моделирование и тестирование производятся без установки дорогих модулей ЦОС и MCH в шасси MicroTCA для исключения риска их повреждения, но с моделированием различных режимов их функционирования. Это даёт возможность выбирать оптимальную топологию установки AMC модулей ЦОС в шасси MicroTCA и

конфигурировать систему ЦОС MicroTCA для обеспечения её надёжной работы в соответствии с реальными условиями эксплуатации.

Модули T/AX-PLM и T/MX-PLM/MCH могут быть как приобретены, так и арендованы заказчиком у фирмы «МикроЛАБ Системс» на время самостоятельного проведения установочных работ или очередного технического обслуживания аппаратуры непосредственно в местах её эксплуатации. На оба модуля распространяется стандартная пожизненная гарантия фирмы «МикроЛАБ Системс».

AMC-модуль T/AX-PLM устанавливается в AMC-слот шасси MicroTCA, содержит управляемые нагреватели мощностью до 120 Вт для термозон «I/O-A-B» (передняя панель) и «C-D» (backplane) модуля, восемь термосенсоров и может быть самостоятельно смонтирован пользователем в формате Mid-Size или Full-Size AMC в соответствии с требованиями конкретного приложения. Модуль конфигурируется и управляется как с передней панели модуля, так и дистанционно с помощью IPMI-команд. Расширяемая библиотека типовых термопрофилей позволяет моделировать как AMC-модули ЦОС TORNADO-A и submodule FMC/FMC+ TORNADO-F фирмы «МикроЛАБ Системс», так и AMC-модули других производителей.

Модуль T/MX-PLM/MCH предназначен для моделирования тепловыделения «классического» модуля MCH шасси MicroTCA. Он включает весь термофункционал AMC-модуля T/AX-PLM для термозон базовой платы № 1 модуля и «HUB-A» и «HUB-B» HUB-платы № 3 модуля, но при этом также функционирует как «классический» MCH-модуль по управлению источниками питания (PM) и модулями охлаждения (CU) шасси MicroTCA и активацией установленных AMC-модулей. Модуль конфигурируется и управляется как с передней панели, так и дистанционно с управляющего ПК через интерфейс LAN и может работать в длительном автономном режиме с периодической записью термопрофилей всех установленных компонентов MicroTCA во внутреннюю память модуля с последующим считыванием и просмотром на ПК. Расширяемая библиотека типовых термопрофилей позволяет моделировать как MCH-модули TORNADO-MCH фирмы «МикроЛАБ Системс», так и MCH-модули других производителей.

Вся продукция фирмы «МикроЛАБ Системс» разрабатывается и производится на территории РФ.



<http://www.mlabsys.ru>

info@mlabsys.ru

+7 (499) 900-6208



Комплексные Решения ЦОС

Системы ЦОС TORNADO-MTCA

Системы MicroTCA и модули AdvancedMC с ПЦОС-ARM-ПЛИС

- Телекоммуникация
- Радиомониторинг
- SDR, радиосвязь
- Радиолокация
- DPI, системы COPM
- Измерительные системы
- Запись РЧ-сигналов и потоков
- Интеллектуальные РЧ-джаммеры, РЭБ
- Обработка изображений и системы ИИ
- Распределенные системы ЦОС
- Промышленные и медицинские системы



TORNADO-MC/C6.1
Шасси MicroTCA
с 6-ю AMC модулями и
источником питания 650Вт

- Компактность
- Модульная архитектура
- Агрегативный трафик 1.5Tbps
- Масштабируемость
- “Горячая” замена модулей
- Изолированные подсети и трафик
- Удаленный контроль и мониторинг



TORNADO-A6678/FMC
AMC модуль ПЦОС+ПЛИС+FMC



TORNADO-AZU+/FMC+
AMC модуль ARM+ПЛИС+FMC+



TORNADO-AZ/FMC
AMC модуль ARM+ПЛИС+FMC



T/AX-DSFPX
AMC модуль SFP+ LAN/WAN



СДЕЛАНО В РОССИИ

TORNADO-M инфраструктура MicroTCA
TORNADO-A модули AdvancedMC
TORNADO-F модули FMC/FMC+

WWW.MLABSYS.RU

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

**АО «Морион»
(г. Санкт-Петербург)
сообщает о доработке
кварцевого генератора ГК336-ТС**

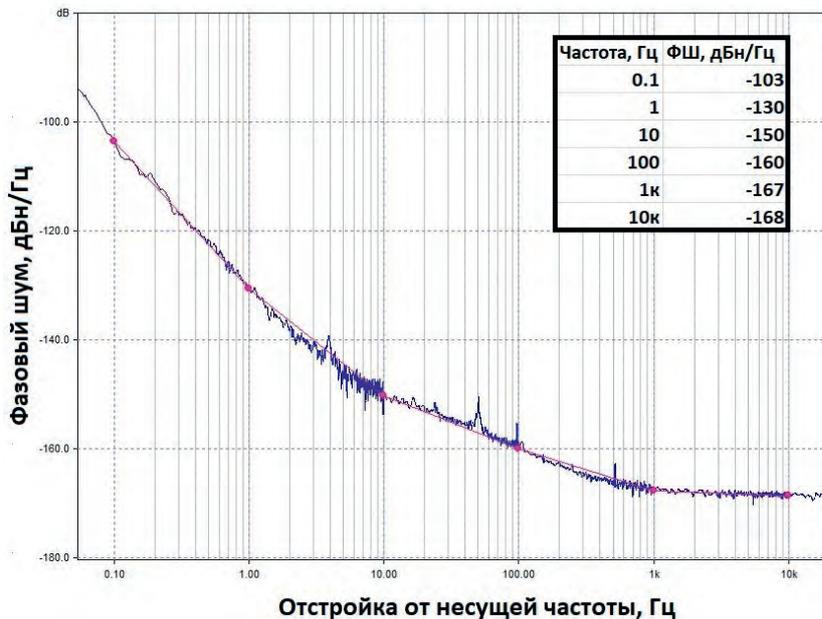
АО «Морион» (г. Санкт-Петербург), один из мировых лидеров в области разработки и серийного производства пьезоэлектронных приборов стабилизации и селекции частоты, сообщает о доработке опорного ультрапрецизионного маломощного кварцевого генератора ГК336-ТС. Теперь он доступен на частоту **5 МГц** с предельно низким значением кратковременной нестабильности частоты (КНЧ) (девиация Аллана) до **8×10^{-14} за 1 с**.

Данный генератор обеспечивает ультранизкий уровень фазовых шумов на уровне мировых аналогов по значениям в ближней зоне, а на дальних отстройках от несущей значительно превосходящий их.

ГК336 поставляется в вариантах с аналоговой, цифровой перестройкой, без управления (ненастроенный). Также доступен вариант с отстройкой до 300 ppm, предназначенный для использования в качестве референса при измерении фазовых шумов и КНЧ.

В настоящее время в АО «Морион» ведутся работы по улучшению значений КНЧ генераторов ГК336 до **$(6...7) \times 10^{-14}$ за 1 с**.

Спектральная плотность мощности фазового шума ГК336 5 МГц.



Отличительные особенности:

- стандартная частота выхода 5 МГц;
- высокая температурная стабильность частоты: до $\pm 2 \times 10^{-11}$;
- долговременная нестабильность частоты: до 1×10^{-8} /год;
- ультранизкий уровень фазовых шумов;
- кратковременная нестабильность частоты (девиация Аллана): до 8×10^{-14} за 1 с.

С 16 по 18 апреля 2024 года приглашаем посетить наш стенд номер В9043 на выставке ExpoElectronica в павильоне № 3, зале № 13 МВЦ «Крокус Экспо» (наш промо-код: ee24eRROM)).

За детальной информацией как по этому изделию, так и по остальной продукции просим обращаться в АО «Морион».

+ 7 (812) 350-75-72

**Сенсоры давления
русского производства**

АО «Орбита» выпускает МЭМС-изделия от кристаллов и сенсоров до сканеров и преобразователей давления, применяемые в составе изделий для транспорта, приборостроения, мониторинга окружающей среды, ЖКХ, метрологического оборудования, нефтегазовой, химической и пищевой промышленности.

Изделия обеспечивают стабильную работу устройств даже при крайних значениях температуры окружающей среды за счёт встроенного терморезистора для температурной адаптации.

Технические характеристики

- Измеряемый диапазон: 0,006 ... 25 МПа
- Измеряемые давления: абсолютное,

избыточное, дифференциальное, сила

- Диапазон рабочих температур: -20...+200°C
- Погрешность: до 0,15%

Преимущества

Понимая важность текущей обстановки, предлагаем свои знания, компетенции и готовы в кратчайшие сроки решить такие проблемы, возникающие у потребителей, как:

- уход с рынка «недружественных» производителей;
- дефицит иностранных ПКИ;
- резкое повышение цен на комплектацию;
- запрет на поставку в РФ электронных компонентов.

Возможно изготовление изделий данного типа по техническим требованиям заказчика.



Подробная информация о выпускаемой продукции доступна на сайте www.orbita.su.

www.orbita.su
marketing@orbita.su
info@orbita.su
 (8342) 25-46-88

Фаворит-ЭК представляет новинку МЭМС под маркой КТР

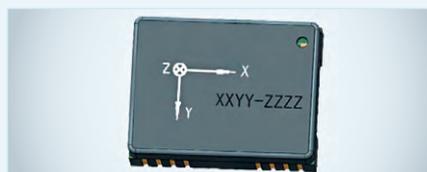
Новая МЭМС-микросхема КТР М306 содержит 6 инерциальных датчиков (3 акселерометра и 3 гироскопа) в компактном корпусе для поверхностного монтажа.

Данные 3 акселерометров и 3 гироскопов объединены в интерфейсе SPI.

Микросхема поставляется с заводской калибровкой в рабочем температурном диапазоне.

Основные характеристики

- Диапазон измерения гироскопов: ± 500 град/с
- Диапазон измерения акселерометров: ± 8 g
- Полоса пропускания: ≥ 150 Гц
- Стойкость к ударным воздействиям: ≥ 2000 g
- Стойкость к вибрации: ≥ 20 g
- СКЗ напряжение питания: $3,3 \pm 0,3$ В
- Размеры корпуса: $17 \times 13 \times 4,5$ мм
- Вес: ≤ 3 г



- Диапазон рабочих температур: -45...+85°C

www.favorit-ec.ru
info@favorit-ec.ru
 +7 (495) 627-76-24

Электронные устройства DOT в медицинской технике

Андрей Кашкаров

Новый, 2024 год обещает быть богатым на изобретения в области фармацевтики, медицины и в целом здравоохранения, ведь хороший рост в электронных медицинских технологиях был отмечен все предшествующие годы; медицинская техника, в том числе телемедицина – одно из самых перспективных направлений развития современной электроники. В качестве демонстрации современных технологий в производстве РЭА представлен миниатюрный имплантат для лечения депрессии.

Предпосылки и основания изобретения в области нейростимуляции

Нейростимуляция как направление медицинских инвазивных практик довольно распространена в мире для помощи в лечении и облегчении симптомов большого депрессивного расстройства, включая трудно поддающиеся лечению случаи резистентной к терапии депрессии. До недавнего времени пациенты либо лечились амбулаторно, с посещением врача в поликлинике для регулярных сеансов психотерапии и иных рекомендованных медицинских мероприятий: бассейн, прогулки, ароматерапия и др., либо им проводили операции на открытом мозге для имплантации устройства нейростимуляции.

Надо вспомнить, что депрессия как аффективное расстройство настроения даже в международной классификации болезней 11-й версии (МКБ-11, внедряемой в России в 4 этапа на протяжении нескольких лет) предполагает более 10 позиций-диагнозов. В практике типично не чисто аффективное

расстройство настроения, а смешанное депрессивное и тревожное расстройство, имеющее свою структуру [3, 4]. И есть большой опыт лечения аффективных расстройств настроения, в том числе лечат и бессонницу при депрессии [4].

В прикладном направлении для начала важно определить и классифицировать депрессивное состояние, принять как данность ощущение и состояние, отличное от того, что было раньше. Однако ещё до того, как побороться с недугом или обратиться за помощью к дипломированным специалистам, мудрый человек озаботится превентивными (предварительными) действиями, чтобы бессонницы не случилось. Речь о здоровом образе жизни и прогулках (или пробежках, занятиях плаванием в бассейне – кому как удобно) перед сном. Рекомендуются дыхательные и физические упражнения с незначительным повышением нагрузки – от одного занятия к другому. Компания Motif Neurotech из США с помощью новой электронной технологии изменила эту привыч-

ную и известную схему. Результаты исследования, проведённого под контролем учёных в медицинском центре Baylor St. Luke's (Хьюстон, США), показали, что устройство DOT можно безопасно для человека имплантировать в черепную коробку и воздействовать на сензитивную область мозга для нейростимулирующей терапии. Специалисты медицинских технологий уже окрестили это устройство «мозговым кардиостимулятором». Внешний вид миниатюрного имплантата для лечения депрессии представлен на рис. 1.

Так, нейромодуляционный имплантат позволяет проводить терапию не выходя из дома и не прибегая к сложным инвазивным и рискованным хирургическим вмешательствам. Исследования проводились более двух лет: сначала на животных, затем с давними медицинское согласие пациентами – под особым контролем и сопровождением врачей. По сути, речь о большой и перспективной научной работе, в которой участвуют высококлассные специалисты, уже имеющие в своём бэкграунде запатентованные разработки в области медицинской РЭА. По первым апробированным результатам, разумеется, некорректно говорить о надёжности и долгосрочной перспективе сего электронного устройства, однако примем во внимание, что в медицинской области почти все лекарственные препараты, и тем более медтехника, «выдерживают» длительные испытания и апробацию на реферативных группах пациентов, прежде чем бывают рекомендованы к массовому применению. В данном случае мы говорим о перспективной разработке, и, конечно же, её будут совершенствовать. Но идея уже имеет реализованный образец, модель, получившую подтверждение в безопасности использования и результативности терапии при минимально инвазивном подходе к использованию нейростимуляции для лечения тяжелой депрессии. Первый ультрамалых размеров бесвинцовый стимулятор мозга у человека – это цифровой программируемый надмозговой терапевтический прибор (или DOT), способный генерировать доста-



Рис. 1. Внешний вид имплантата для нейростимуляции

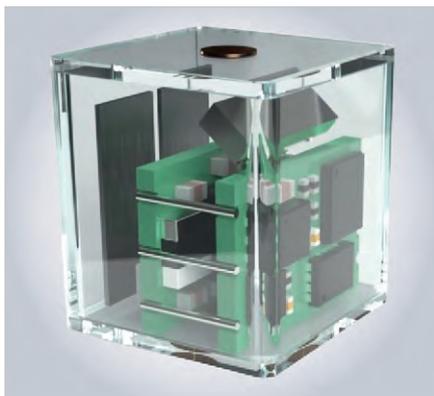


Рис. 2. Внешний вид на прозрачный корпус электронного имплантата с внутренними компонентами

точно энергии для стимуляции мозговой активности человека и крупных животных через твёрдую мозговую оболочку. DOT реализован в стеклянном корпусе и обеспечивает надёжную работу и не сковывает движения пациента, может работать без переустановки до 1 месяца. Поэтому устройство столь перспективно и подходит для использования в домашних условиях для терапевтического лечения различных психических расстройств.

Особенности устройства и его установки

Модель производства компании Motif Neurotech позиционируется как электронное устройство (Digitally Programmable Over-Brain Therapeutic – DOT) и является цифровым программируемым терапевтическим прибором с фиксацией непосредственно над головным мозгом. Финансирование работы предоставлено Фондом Макнейра. Среди учёных и исследователей-разработчиков Joshua E. Woods, Amanda L. Singer, Fatima Alrashdan, Wendy Tan, Chunfeng Tan, Sunil A. Sheth, Sameer A. Sheth, Jacob T. Robinson (все из США). Сертифицирующий орган IRB предоставил одобрение устройства после его испытания в медицинском колледже Бейлора. Таким образом, устройство способно стабильно обеспечивать безопасную и эффективную стимуляцию мозга, что подтверждено испытаниями [5].

Устройство имеет малый размер и площадь не более 1 см² в поперечном сечении. Не имеет источника питания и связано с внешним контроллером, а также облачным хранилищем данных беспроводным способом по каналу Wi-Fi. Реализованная в кор-

пусе устройства отдельная магнитная катушка и система драйверов для обеспечения беспроводной связи обеспечивают питание непосредственно на имплантат, размещённый в стеклянном корпусе, где находится и электрод для стимуляции. Корпус устройства с расположением элементов представлен на рис. 2.

Тем же каналом беспроводной связи обеспечивается обмен данными в цифровом формате. К электронному устройству разработана гарнитура для удобства и регулярных сеансов работы. Миниатюрное DOT-беспроводное устройство не соприкасается с мозгом или его защитной оболочкой. Устанавливается в 14-мм отверстие в черепной коробке в ходе малоинвазивной, гигиеничной и условно безопасной амбулаторной процедуры продолжительностью всего 20 минут [1].

Принцип работы устройства

Рефрактерные неврологические и психические расстройства всё чаще лечат с помощью методов стимуляции мозга с использованием имплантированных устройств: способом нейромодуляции. Однако существующие коммерчески доступные системы электронно-медицинского оборудования ограничены и нуждаются в имплантируемых генераторах импульсов и электропитании с помощью проводов. Условная сложность сей архитектуры создаёт множество критичных вопросов, требующих решения медицинскими и технологическими методами. Так, в проблемном поле частицы инородных материалов, к примеру, свинца, которые угрожают пациенту инфекцией и осложнениями недуга. Именно поэтому внедрение неинвазивных подходов расширило доступ и к инновационным методам лечения. Обсуждая модель компании Motif, имеем в виду бессвинцовый нейростимулятор. Такое медицинское устройство вырабатывает достаточное количество энергии для стимуляции активности коры головного мозга под стимулирующим воздействием через твёрдую мозговую оболочку. Экстремальная система воздействия возможна с помощью беспроводной передачи сигналов слабого тока магнитоэлектрическим способом, но без прямого контакта с кортикальной областью мозга. Внешняя стимуляция коры головного мозга (XCS) открывает возможность проведения условно простых малоинвазивных хирургиче-

ских процедур, обеспечивающих точную, длительную нейромодуляцию в домашних условиях с помощью крошечных имплантатов, которые никогда прямо не соприкасаются с поверхностью мозга.

Особенности транскраниальной магнитной стимуляции

Когда фармацевтические препараты неэффективны или вызывают невыносимые побочные эффекты, пациенты и врачи обращаются к нейромодуляции для получения эффективных методов лечения. Так, при болезни Паркинсона (БП) и эссенциального тремора (ЭТ) глубокая стимуляция мозга результативна в лечении тремора и других симптомов. При тяжёлом депрессивном расстройстве (МДД) и обсессивно-компульсивном расстройстве (ОКР) нейрофизиологическое модулирование активности в определённых областях мозга обеспечивает эффективную терапию, когда лекарственные препараты не обеспечивают адекватного лечения. В данном случае транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС, TMS) является показательным примером метода применения нейромозговой стимуляции. ТМС может неинвазивно активировать небольшие участки поверхности мозга размером от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров, используя генерируемое извне магнитное поле мощностью 1–2 Т (Тесла), и дать хороший результат выздоровления пациента при лечении нервно-психических расстройств [2].

С 1998 года число клинических испытаний, в которых используется ТМС для лечения нервно-психических расстройств, выросло примерно в 2 раза. Основываясь на данных клинических испытаний, орган сертификации и лицензирования в области медицинских технологий в США (FDA) одобрил ТМС для лечения резистентной депрессии, и с тех пор большинство страховых компаний возмещают стоимость мультисессионной терапии в клинике, если пациенты не проходят традиционную терапию антидепрессантами. ТМС уже тогда использовали для лечения обсессивно-компульсивного расстройства, ПТСР (посттравматического стрессового расстройства) и болезни Альцгеймера. Хотя ТМС является клинически доказанной терапией, у неё есть ограничения. Во-первых, системы ТМС в 2024 году требуют услов-

но больших пиковых мощностей до 3 МВт, а это означает, что пока они одобрены только для использования в стационаре. В результате ТМС недоступна для пациентов, живущих удалённо. Во-вторых, от сеанса к сеансу таргетинг может быть разным, поскольку стимулятор необходимо настраивать каждый раз перед процедурой с конкретным пациентом. Да, существуют условно альтернативные неинвазивные способы стимуляции мозга, как транскраниальная стимуляция постоянным током (TDCS) и транскраниальная стимуляция переменным током (TACS). Однако технологию стимуляции нервной системы в домашних условиях широко не использовали, потому что электрическое поле, создаваемое неинвазивным электростимулятором, не могло достигать напряжённости поля, необходимого для непосредственного воздействия [6]. При этом задача стояла активировать область мозга, не активируя при этом нервы в волосистой части головы, которые вызывают болезненные побочные эффекты. В сравнении со всеми названными методами и технологиями имплантируемые стимуляторы могут обеспечивать точную электрическую стимуляцию, которая непрерывно активирует мозг, но и эти имплантаты требовали сложной хирургической процедуры – и это также являлось ограничением для большого числа пациентов. По технологии беспроводной передачи энергии (WPT) создан кортикальный стимулятор мозга с достаточной энергией и устойчивостью (надёжностью работы) как аналог ТМС. Минимально инвазивные процедуры не предполагают контакта с мозгом или перфорации защитной твёрдой мозговой оболочки, а концепция терапии «кортикальной стимуляции с внешним питанием» (XCS) оказалась ещё более эффективной, чем ТМС, и такой же точной и удобной, как традиционные имплантируемые стимуляторы со встроенными и перезаряжаемыми элементами питания.

Электронный стимулятор состоит из имплантируемого генератора импульсов (IPG), работающего на встроенных элементах питания – батарейках и подключаемого проводами к участку стимуляции. К примеру, когда IPG имплантируются в грудную клетку, электрические провода проходят вблизи головы и шеи, а частые движения приводят к смещению имплантата и в целом его малой эффективности.

В альтернативе уместно имплантировать IPG в черепную коробку, но это невозможно без трепанации черепа пациента. Тем не менее и такие электронные приборы – условные анахронизмы эпохи – с разной результативностью, но используются для лечения аффективных расстройств настроения, доказывая, что долговременный эффект облегчения психических расстройств возможен при прямой электрической стимуляции с помощью имплантатов. Электроды, размещённые над дорсолатеральной префронтальной корой (DLPFC) – участка, «одобренного» для воздействия устройствами медицинской электроники FDA для ТМС-терапии, в исследовании показали антидепрессивный эффект у 3 из 5 пациентов [6]. Глубокая стимуляция мозга (DBS) нескольких участков внутри коры головного мозга также дала результат и антидепрессивные эффекты с облегчением от ОКР. Нейромодуляция может быть достигнута без IPG: с помощью подкожных проводников, подключающихся к внешнему стимулятору; однако возможная (нестерильная) инфекция от внешних устройств и применение условно тонких электрических проводников накладывают ограничения на образ жизни (комфортное состояние) пациента в процессе медицинского воздействия и типично не используются для длительной терапии нейромодуляцией.

Несмотря на растущую популярность беспроводных технологий в устройствах стимуляции без использования внутренних источников питания, клинические системы нейромодуляции до 2023 года применялись только в периферической нервной системе, не имея компактного миниатюрного фактора, чтобы их можно было быстро, гигиенично и безопасно «встроить» в черепную коробку. Доклинические исследования на грызунах показали результативность стимуляции коры головного мозга, но показали и другое: амплитуда импульсного воздействия слишком мала, чтобы стимулировать человеческий мозг воздействием через условно твёрдую мозговую оболочку. Единственный известный в научных кругах эпидуральный кортикальный стимулятор без батареек был применён на кошке, но её приходилось обездвиживать (что вызывало дополнительные стрессовые факторы у животного, при том что наркоз в таком воздействии не

имел смысла). И движение животного, смещение стимулятора всего на 3 мм существенно затрудняли достижение эффективного результата терапии как в условиях операционной, так и дома.

Основной проблемой при создании DOT является обеспечение достаточной мощности для стимуляции мозга из эпидурального пространства. Источник питания или батарея является самым объёмным компонентом имплантируемого нейронного стимулятора. А в рассматриваемом DOT-устройстве применена технология, позволяющая безопасно подавать беспроводным способом достаточное электропитание с напряжением 10–15 В, необходимым для эпидуральной стимуляции мозга при импедансе примерно 1 кОм. Это значение сопоставимо с условиями результативной стимуляции спинного мозга, но примерно в 5 раз превышает амплитуду стимуляции, необходимую для стимуляции блуждающего нерва (VNS), и в 3 раза превышает амплитуду стимуляции, необходимую для глубокой стимуляции головного мозга (DBS) [5].

Промежуточные результаты

Недавняя разработка магнитоэлектрического беспроводного источника питания теперь позволяет достичь требуемого уровня стимуляции с импульсным модулированным напряжением 14,5 В в имплантатах миллиметрового размера, не требующих использования батареек. Авторы исследования также утверждают, что получили мощность WPT до 56 мВт с использованием магнитоэлектрических плёнок с напряжением до 10 В DC. Чтобы эффективно использовать эту энергию и обеспечить соответствие напряжению 14,5 В на электродах с импедансом 1 кОм, внедрили схему стимуляции, представленную на рис. 3. Здесь представлена интраоперационная демонстрация эпидуральной стимуляции коры головного мозга с помощью миниатюрного эпидурально-кортикального стимулятора-имплантата без встроенных элементов питания.

В качестве модулей присутствует адаптер-стабилизатор питания, микроконтроллер с крайне малым энергопотреблением, мультиплексор и усилитель линии связи, а также повышающий преобразователь с выходным напряжением 15 В DC. В специальный стеклянный корпус поместили электроды (один – стиму-

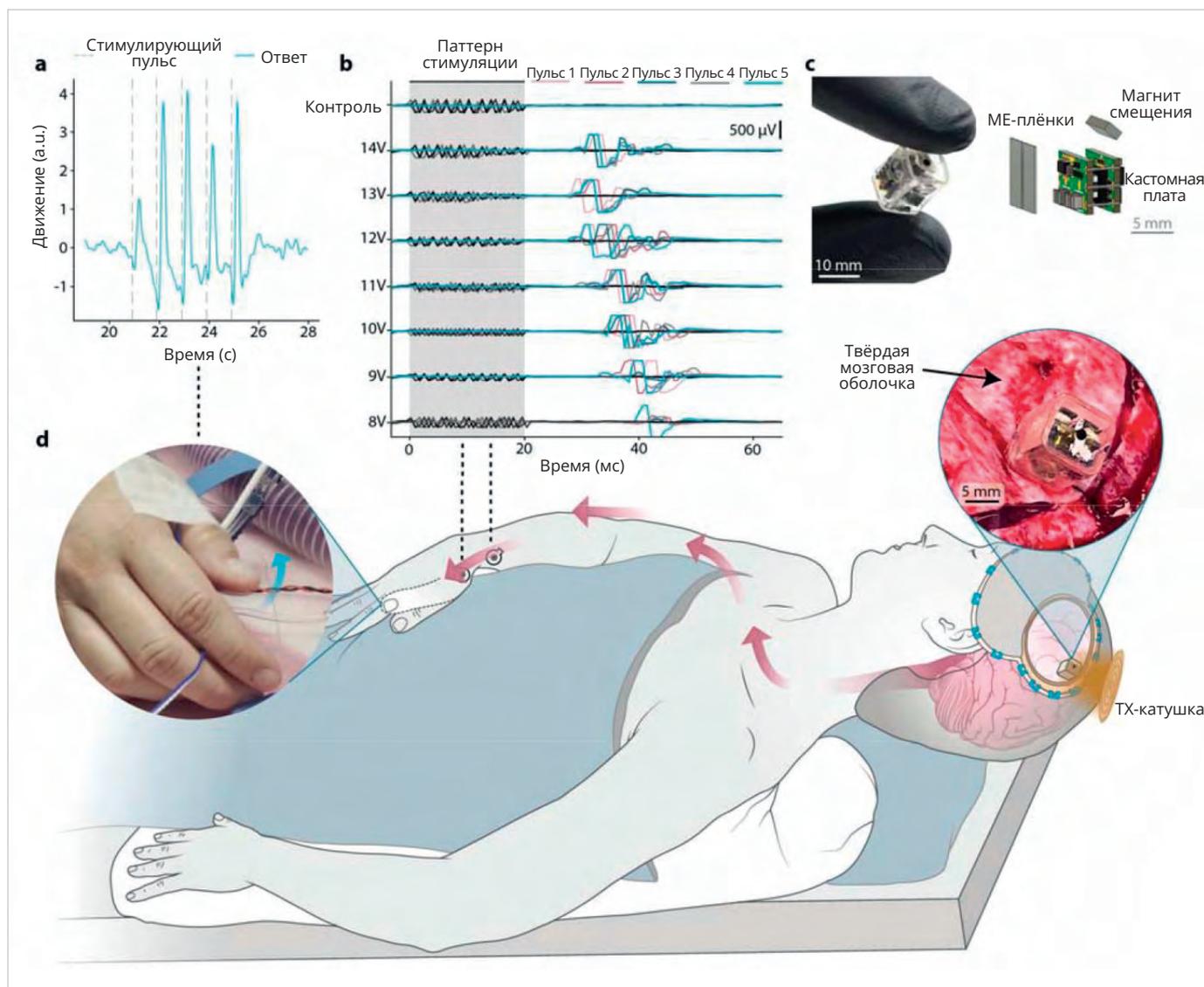


Рис. 3. Интраоперационная демонстрация эпидуральной стимуляции коры головного мозга

лирующий, используется как передатчик), состоящие из напылённого на поверхность стержня оксида иридия. И такое электронное устройство имеет размеры 9×9×11 мм.

Применительно к рис. 3 [5].

А: Применяется стимулирующее воздействие с частотой 500 Гц в пачке по 10 импульсов и импульсное воздействие с частотой 1 Гц двухфазной амплитудой 12 В.

В: форма ЭМГ (пачки по 5 импульсов) в каждой группе мышц APB-ADM во время стимуляции с различной амплитудой показывают, что эпидуральная стимуляция коры головного мозга вызывает ответный импульс амплитудой около 8 В, то есть примерно 2/3 импульсов воздействуют на нервные окончания.

С: прототип электронного устройства между двумя пальцами руки в перчатке. Показаны внутренние компоненты DOT, состоящие из 2 плёнок МЕ, пане-

лей печатной платы (РСВ), соединённых проводами, и смещающегося магнита.

Д: иллюстрация интраоперационных исследований на людях; устройство над твёрдой мозговой оболочкой коры активировано с помощью передатчика импульсов. Фактически моторные реакции человека были таковы, что стимуляция приводила к контралатеральному движению большого пальца. Справа показана иллюстрация зафиксированного над твёрдой мозговой оболочкой устройства.

Для питания и связи с DOT-устройством применили магнитную катушку и передающий микромодуль имплантата. Поток цифровых данных, генерируемый формирователем магнитного поля, программирует имплантат на один из 32 возможных уровней амплитуды стимуляции в диапазоне 6,75–14,5 В, а также устанавливает длительность импульса стимуляции и тип (частоту пачек) импульса

(режим) стимуляции. Интраоперационное тестирование во время нейрохирургической процедуры показало, что устройство может стимулировать двигательную реакцию при размещении непосредственно на внешней стороне коры головного мозга, а именно вызвать сокращение кисти человека. В конкретном исследовании пациент проходил процедуру резекции опухоли, которая требовала трепанации черепа, чтобы обнажить кору головного мозга. Запрограммировав DOT в режиме генерации сигнала воздействия: 500 Гц, 10 импульсов с частотой повторения 1 Гц и двухфазной амплитудой 14,5 В, исследователи проанализировали видеозапись сокращения кисти с частотой 1 Гц, подтверждающую, что таким воздействием принудительно (специально) удалось активировать область мозга. Таким же образом по аналогии удавалось вызвать сокращения мышц на пальцах,

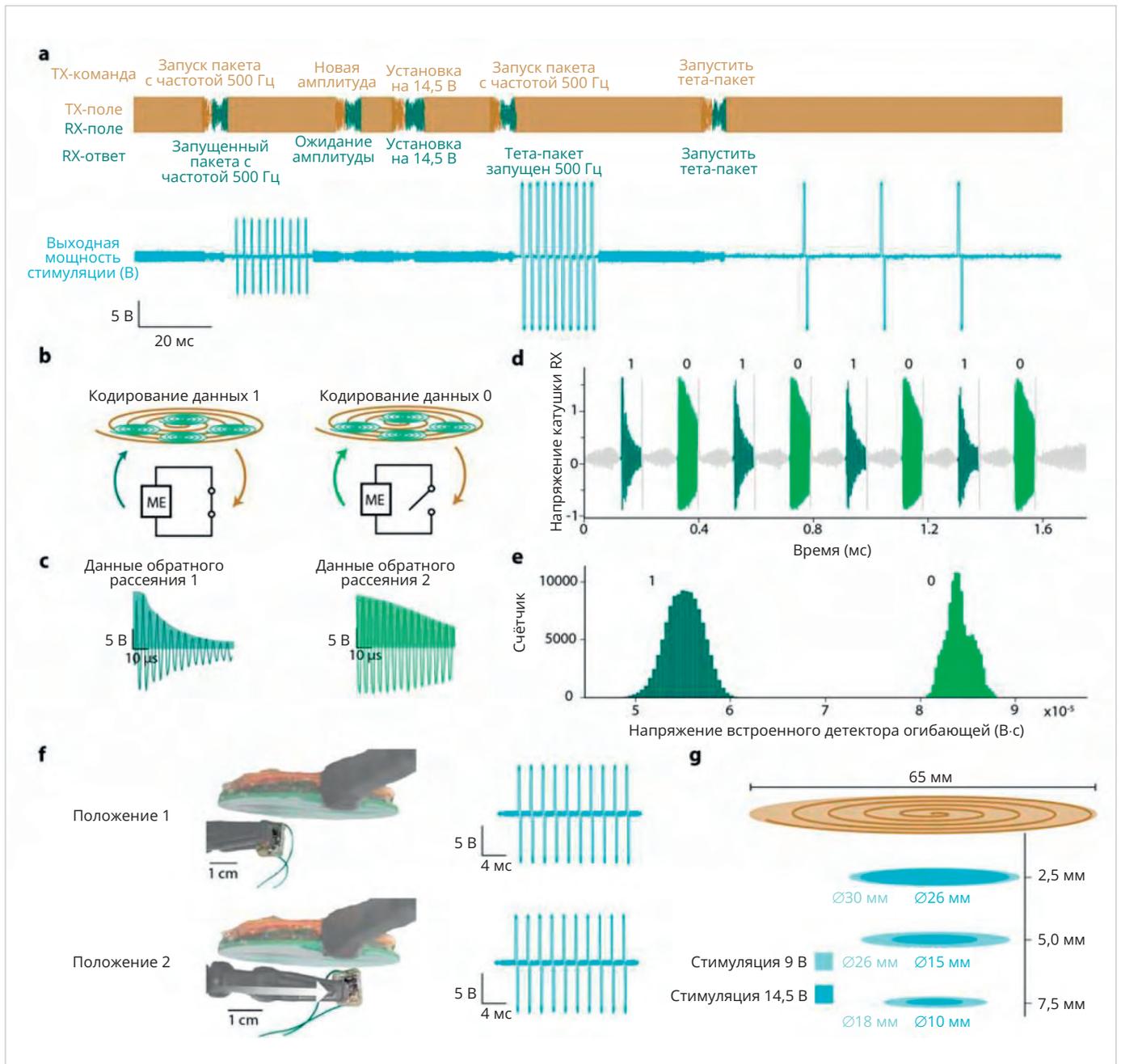


Рис. 4. Иллюстрация метода цифровой двунаправленной связи и эксплуатационные характеристики DOT-устройства

ладонях, верхних и нижних конечностях человека [5].

Другое проведённое тем же составом исследователей интраоперационное исследование показало, что DOT-устройство может стимулировать аналогичные двигательные реакции при размещении над твёрдой мозговой оболочкой. Отсюда был предложен вывод: несмотря на небольшой форм-фактор имплантата миллиметрового размера, он способен задействовать область коры головного мозга человека примерно с тем же результатом (терапевтическим эффектом), что и процедура ТМС. Электромиографические (ЭМГ) реакции в группах мышц APB-ADM

(отводящий Pollicis Brevis, отводящий Digniti Minimi) регистрировались при амплитудах всего 8 В, по мере увеличения интенсивности стимуляции латентность между стимуляцией и отражающим сигналом уменьшалась, а количество вызываемых движений увеличивалось (рис. 3а). Такая локализация реакции на стимуляцию демонстрирует высокую точность определения области активации устройства. Это показывает, что уровень напряжения стимуляции безопасен и достаточен для активации ткани в коре головного мозга человека при фиксации устройства над твёрдой мозговой оболочкой даже сквозь толщу промежуточной ткани.

Организация канала двунаправленной передачи данных

В дополнение к получению беспроводного питания и данных разработчики испытали DOT для передачи сигналов обратно на внешний приёмопередатчик, чтобы записать (зафиксировать в электронной памяти ПК) диагностические свойства имплантата и дистанционно включать технологические функции, такие как запись физиологических сигналов пациента. Чтобы свести к минимуму размер, сложность (интегрированность компонентов) и энергопотребление имплантата, применён эластичный материал ME. Притом каждое сообщение дли-

тельностью 3,4 мс разделено мультиплексорами в двух каналах: на 3 бита и, соответственно, 8 бит. Параметры стимуляции задают по первому каналу связи, а обмен данными и измерения проводят по второму. Так, в условной сети передачи данных удалось настроить и обеспечить синхронизацию с помощью внешнего приёмопередатчика. DOT-устройство разработано таким образом, чтобы его выходные данные стимуляции передавались кодом в заключительной части потока данных. Поэтому можно посылать команды на генерации в имплантате желаемой частоты, а двухфазные импульсы или последовательности импульсов вполне могут запускаться с частотой до 250 Гц. Для частот > 250 Гц, к примеру, для стимуляции частотой 500 Гц, выбирают соответствующий режим (последовательности импульсов) во встроенном ПО устройства и запускают функцию с помощью внешнего приёмопередатчика. На рис. 4 представлен метод цифровой двунаправленной связи и эксплуатационные характеристики DOT.

Пояснение к рис. 4.

4а: время при генерации импульсов стимуляции в диапазоне $\pm 6,75 \dots \pm 14,5$ В с шагом 250 мВ. Пример экспериментальной последовательности выходных сигналов приёмопередатчика и стимуляции имплантата. Приёмопередатчик запускается последовательностями импульсов длительностью 3,4 мс. Устройство было запрограммировано таким образом, чтобы на стимулирующий электрод воздействовали импульсы с частотой 500 Гц пачками по 10.

Для получения диагностической информации от имплантата в режиме реального времени внедрена двухканальная передача данных: для управления (вкл/выкл, активации) магнитным полем обратного рассеяния; и этот режим потребляет крайне мало энергии. Так, передатчик сигналов активируется для возбуждения режима резонанса плёнки МЕ, а затем передатчик деактивируется, но остаточное магнитное поле, генерируемое при затухании резонанса МЕ, всё ещё обеспечивает питание имплантата. Внутренний переключатель режима работы имплантата модулирует амплитуду отражённого сигнала (рис. 4б).

4б: иллюстрация, показывающая, как цифровые данные кодируются с помощью пассивного обратного рассеяния МЕ.

Если выход плёнки МЕ активирован в режиме стимуляции, фронт импульсов будет более длинным, чем без активации МЕ (рис. 4д).

Способ кодирования битов с имплантата. Биты 1 и 0 кодируются путём переключения между короткими (данные 1) и длинными (данные 0) последовательностями. Результирующие биты 0 и 1 разделяются на стороне приёмопередатчика с помощью аналоговой схемы (рис. 4д, е). Магнитоэлектрическая плёнка МЕ, входящая в состав имплантата, возбуждается магнитным полем приёмопередатчика, и тогда поле обратного (отражённого) сигнала измеряется с помощью дифференциально спаренных катушек датчика, в то время как поле возбуждения неактивно. Условная перегрузка на плёнке МЕ не превышает 40 мс. Цифровые данные из последовательности импульсов декодируются по положительному фронту сигнала.

4д: последовательность 1 и 0 битов, используемая для калибровки порогового значения для различения двух битов, используется в режиме измененный имплантата.

4е: гистограмма, показывающая интегральное напряжение отражённого сигнала «отбоя» для битов 1 и 0 с дискредитацией 223 888 битами при расположении имплантата на расстоянии 1 см от катушек внешнего приёмопередатчика. Биты 1 и 0 разделены, их легко отличить от сигнала приёмника.

4ф: два положения, в которых устройство способно выдавать двухфазные последовательности импульсов напряжением 9 В, последовательности из 10 импульсов частотой 500 Гц с напряжённостью поля 7 мТл на поверхности катушки для формирования соответствующего выходного сигнала стимуляции. Расстояние между двумя электродами > 2,5 см, что свидетельствует об относительно большом допуске на смещение устройства в случае возникновения двигательной активности пациента, что в принципе важно в условиях операционной.

4г: график экспериментальных результатов двухфазных последовательных импульсов напряжением 9...14,5 В, пачек по 10 импульсов частотой 500 Гц на разном расстоянии от катушек приёмопередатчика с напряжённостью поля 7 мТл на поверхности катушки. На расстоянии 7,5 мм устройство способно выдавать серии импульсов напряжением 14,5 В при площади

воздействия 1 см² и серии импульсов напряжением 9 В при площади 1,8 см².

Беспроводная передача данных обеспечивает надёжную связь с имплантатом в условно неконтролируемых средах, таких как медицинская операционная. Эластичный материал плёнок МЕ обеспечивает устойчивость к их возможному перекоксу и деформации при настройке устройства на возбуждение магнитного поля мощностью 7 мТл (в пределах допустимых значений) на поверхности катушки. При генерации импульсов двухфазной стимуляции напряжением 9 В устройство надёжно работало на участке площадью 1,8–2,5 см² в центре катушки приёмопередатчика на расстоянии 7,5 мм от катушки (измерение по центру верхней части устройства). При генерации импульсов двухфазной стимуляции с максимальной амплитудой 14,5 В устройство надёжно работало на площади 0,78 см² на расстоянии 7,5 мм от поверхности катушки (рис. 4г). Такой результат принято считать хорошим в части обеспечения глубины имплантации, основанной на известной средней толщине костей свода черепа взрослого человека в 5,8 мм [5].

О надёжности и безопасности

Работа генератора импульсов оказалась достаточно мощной, чтобы стимулировать кору головного мозга через твёрдую мозговую оболочку, но важны также аспекты обеспечения безопасности использования имплантата. Разработчики подтверждают, что устройство сможет безопасно обеспечить такой же уровень стимуляции с течением времени, если будет имплантировано постоянно. Чтобы доказать этот параметр предметно, использовали в качестве модели свинью, и выбор обоснован тем, что анатомическая структура мозга свиньи и толщина твёрдой мозговой оболочки наиболее соответствуют анатомии тех же частей у человека. В следующем эксперименте протестировали способность DOT-устройства стимулировать неповреждённую твёрдую мозговую оболочку и изучали реакцию тканей на протяжении времени от нескольких часов до 30 суток. Вот как описывают процедуру внедрения имплантата практикующие специалисты. «Операция по имплантации заняла около 20 минут и не предполагала контак-

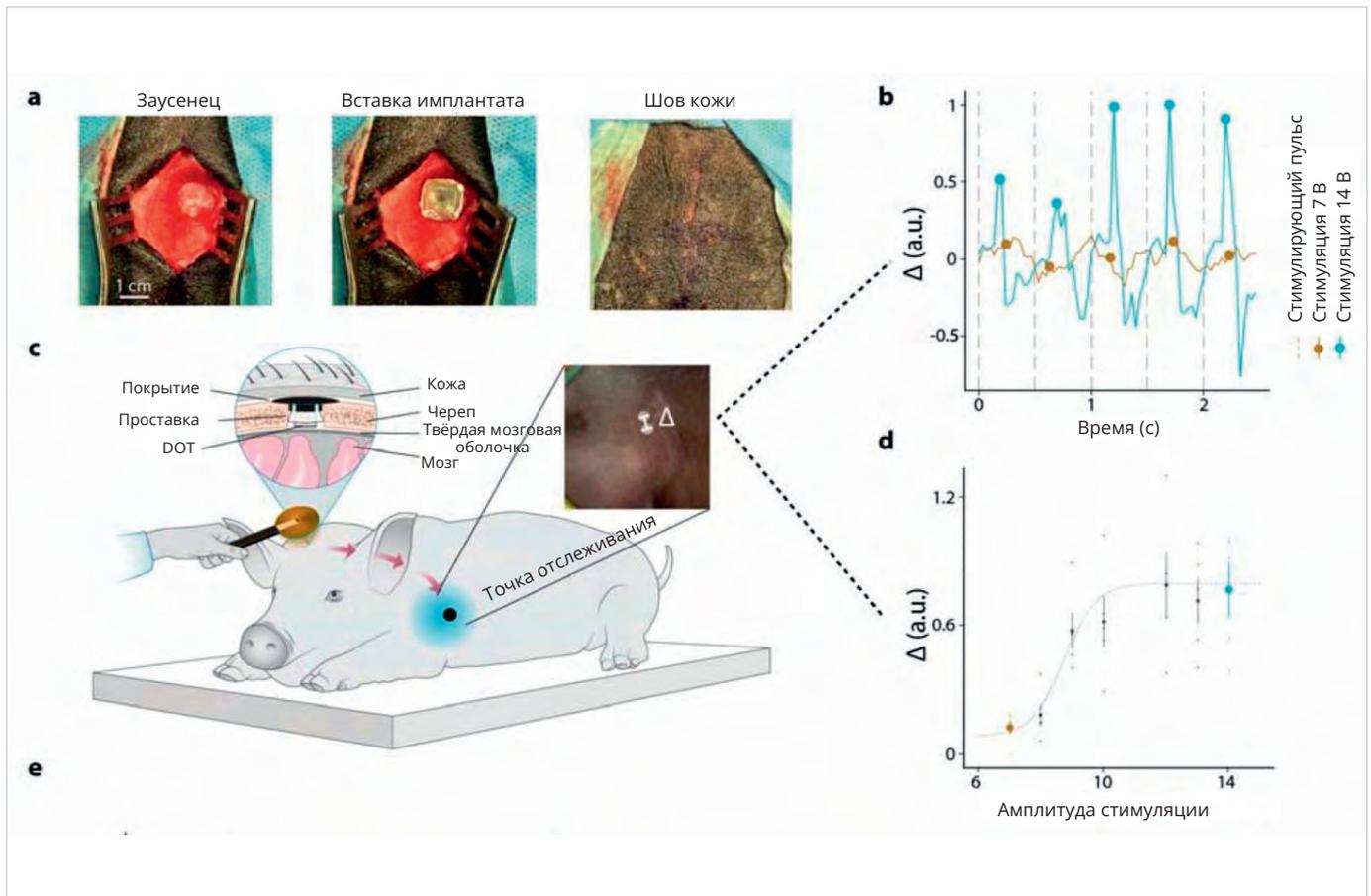


Рис. 5. Иллюстрация внедрения имплантата в кору мозга животного

та с головным мозгом. Мы обнажили череп и просверлили отверстие диаметром 14 мм над корой головного мозга, обнажив твёрдую мозговую оболочку под ней. Затем мы внедрили имплантат с помощью защитной силиконовой прокладки, поместили в отверстие и закрепили пластиковой крышкой (PEEK) для защиты имплантата от внешних повреждений. Схема полностью имплантированной системы и протокол тестирования показаны на рис. 5». Практика эпидуральной стимуляции коры головного мозга на примере животного вида КРС (крупного рогатого скота) показала, что DOT эффективно восстанавливает активность коры головного мозга в течение 30 дней. На рис. 5 представлена иллюстрация внедрения имплантата в кору мозга животного вида КРС.

На рис. 5 для иллюстрирования предложена схема тестирования устройства во время хронической имплантации на модели свиньи. Стимуляция проводилась над левой моторной корой головного мозга, а изменение под воздействием стимулятора фиксировалось по правой передней конечности свина. Катушка приёмопередатчика фиксировалась над местом имплантации,

пока свин был спокоен и расслаблен, а устройство питалось и программировалось с помощью внешнего передатчика. На левой вставке рис. 5 сверху показано поперечное сечение имплантата над твёрдой мозговой оболочкой и под кожей свиньи. На правой вставке (рис. 5 сверху) показан пример оценки движения передних конечностей.

5d: среднее значение на пиках сигнала при увеличении амплитуды стимуляции в диапазоне 7–14 В. Пунктирная линия показывает сигмоидальную подгонку с приблизительным пороговым напряжением воздействия 10 В. Реакция 7 В (жёлтая точка) значительно ниже порога минимального уровня, а реакция 14 В (синяя точка) показывает более высокое смещение, что указывает на движение свиньи в ответ на стимуляцию.

5e сверху: среднее значение амплитуды пиков сигнала за весь период воздействия имплантата. Синие точки показывают среднюю амплитуду после воздействия 5 импульсов напряжением 14 В, а оранжевые точки показывают среднюю амплитуду при стимуляции напряжением 7 В. Во всё время тестирования наблюдался значительно больший

отклик при стимуляции напряжением 14 В по сравнению со стимуляцией напряжением 7 В, что свидетельствует о том, что DOT-устройство оставалось функциональным и эффективным при рекрутировании коры мозга в течение всего периода имплантации в 30 дней (t-тест независимых выборок, $p < 0,05$) [5]. При имплантации устройства на 20–35 дней свиньям над твёрдой мозговой оболочкой устройство вызывало двигательную стимуляцию разной активности. Для «чистоты» и валидности эксперимента исследователи использовали фиктивный имплантат у некоторых животных, чтобы сравнить итоговые результаты и исключить эффект плацебо. Реакции при стимуляции, их продолжительность, направленность и амплитуда фиксировались с помощью инструментов видеонализа. Между 15-м и 25-м днями наблюдалось увеличение сопротивления электрода, аналогичное тому, которое наблюдалось при импедансе DBS. В промежутке между этими днями участники исследования отметили уменьшение амплитуды движений при максимальных значениях стимуляции, что коррелировало с увели-

чением сопротивления. Через 25 дней сопротивление стабилизировалось примерно на уровне 2,25 кОм, что обоснованно связывают с анатомическими изменениями тканей у животного, включая утолщение твёрдой мозговой оболочки или повторный рост тканей в месте приложения имплантата [5]. Эти известные в медицинской практике реакции на инородное тело могут возникать при адаптации субдуральных и эпидуральных имплантатов, но не представляют угрозы безопасности животному или человеку. Поскольку DOT-устройство стабильно обеспечивало стимуляцию мозга, несмотря на увеличение импеданса, это подтверждает его эффективность в нейротерапии даже при наличии реакций организма на инородное тело.

При внимательном анализе дозы терапевтической стимуляции, которую можно получить при ТМС-подобной терапии, не обнаружили критичных или заслуживающих внимания изменений и патологий в стимулируемых областях мозга; это позволяет предположить, что точечная стимуляция может обеспечить безопасный аналог ТМС-терапии. Для этих исследований выбрали способ прерывистой тета-импульсной стимуляции (iTBS), используемый в ТМС для стимуляции областей коры импульсами в течение 3 минут. Сигнал состоит из пакетов по 3 импульса частотой 50 Гц, повторяющихся с частотой 5 Гц, то есть с интервалом в 10 с. Исследования показали, что процессы стимуляции, повторяемые 5 дней в неделю в течение 6 недель, обеспечивают эффективную терапию для пациентов с устойчивой к лечению депрессией. Общая доза, получаемая при такой терапии, составляет в общем 60–450 минут стимуляции и соответственно 12 000–90 000 импульсов воздействия. При тестировании безопасности точечной стимуляции применяли «прямую электрическую стимуляцию» iTBS-подобной формы волны двухфазными импульсами по 250 мкс на фазу в течение 300 минут (54 300 импульсов) [6]. У разных животных воздействовали имплантатом в общем 170 и 200 минут iTBS-подобной стимуляцией. Затем исследователи эксплантировали DOT-устройства и вывели животных «на отдых» в течение 7–10 дней, прежде чем их забивали для анализа головного мозга и твёрдой мозговой оболочки. Отчёты патологоанато-

мов после эксплантации не показали различий между мозгом животного без воздействия и стимулирования и твёрдой мозговой оболочкой под стимулятором по сравнению с фиктивным имплантатом того же размера и формы, имплантированным тому же животному на противоположной стороне мозга. У некоторых животных обнаружили незначительные воспалительные реакции как на активные, так и на фиктивные имплантаты, что указывает на вариабельность реакций на инородное тело от животного к животному, но даже в случае реакции на инородное тело DOT-устройство всё ещё может генерировать эффективную стимуляцию коры мозга живого организма, а учёные предполагают, что такая реакция не ограничит способности и медикаментозный эффект нейромодуляционной терапии.

Выводы

Инновационные решения с помощью новых технологий и современной микроэлектроники в традиционной архитектуре нейромодуляции приведут к появлению новых парадигм клинической терапии. К примеру, эпизодическая нейромодуляция эффективна при ТМС и может безопасно применяться в домашних условиях с помощью миниатюрного имплантата в сочетании с носимой гарнитурой. Так сокращается время на обслуживание пациентов в стационаре и организационные затраты на обучение специально-обучаемого персонала, обеспечение койко-мест в больницах и медицинского сопровождения пациентов. Условная простота, безопасность внедрения (применения) и минимальное время настройки (подготовки) имплантата, в котором отсутствует автономный элемент питания, даёт устройству ещё больше конкурентных возможностей и автономности. Кроме того, концепция функционирования XCS может быть расширена, чтобы стимулировать несколько областей мозга для управления определёнными паттернами активности или состояниями пациента. Так, двустороннее воздействие терапией с помощью имплантата над левой и правой дорсолатеральной префронтальной корой привело к медицински результативной терапии для пациентов с суицидальными мыслями.

Отсутствие проводов или батареек значительно упрощает операцию

и устраняет критические опасности, однако остаются актуальными инженерные задачи, связанные с внедрением даже этой апробированной концепции DOT в имплантат для постоянного использования человеком. Производство и испытания продолжают в соответствии с нормативными стандартами, необходимыми для получения одобрения (сертификации) FDA, включая тестирование долгосрочной безопасности и биосовместимости. Необходимы дополнительные уточняющие исследования для подтверждения, что те же схемы стимуляции, которые эффективны для ТМС, будут эффективны и для XCS. Физиологические реакции животных и человека показывают, что DOT- и ТМС-методы успешны при задействовании участков коры (мозга) площадью от 1 кв. мм до 1 кв. см с точным расчётом времени, но клиническая эквивалентность с точки зрения терапевтических результатов может быть подтверждена только после того, как имплантаты будут одобрены FDA для проведения массовых исследований на людях. Тем не менее имеются многообещающие результаты применения имплантированных эпидуральных кортикальных стимуляторов, основанных на традиционной технологии IPG и Lead, предполагающие, что электрическая стимуляция одних и тех же областей воздействия приводит и к сходным клиническим результатам.

Существуют дополнительные проблемы при создании удобного носимого DOT-передатчика. Носимые подкожные системы подзарядки разработаны и используются для существующих IPGs. Поэтому требования к аккумулятору и электронным компонентам устройств могут быть уменьшены; однако гарнитура должна быть спроектирована и протестирована настолько, чтобы обеспечить достаточный комфорт, мощность и надёжное сопряжение для частого использования дома.

Одним из преимуществ архитектуры DOT-устройств и стимуляторов XCS является способность расширять терапевтические возможности нейромодуляции при нервно-психических состояниях. К примеру, с помощью нескольких имплантатов, активируемых с точными временными паттернами, уместно разрабатывать более точные (чем

есть) способы модуляции состояний мозга, которые, несомненно, связаны с настроением и памятью человека. Чтобы модулировать конкретные состояния мозга с точным расчётом времени, интеграция нейронного зондирования или других сенсорных возможностей с устройствами обеспечит цикличное (непрерывное) управление мозговой активностью человека, что, как показано выше, улучшает результаты терапии. Кроме того, с новым устройством нет необходимости ездить в стационар или неподвижно сидеть в кресле. Частота и продолжительность сеансов терапии могут быть увеличены по медицинским показаниям, что прямо связано с улучшением состояния и результатами лечения.

Перспективы совершенствования устройства

В перспективах совершенствования устройства его доработка до безопасной и надёжной технологии нейромодуляции, адаптация электронного стимулятора к быту в домашнем формате примене-

ния, причём контроль и медицинское сопровождение в таком случае обеспечиваются посредством возможностей телемедицины. Об этом мы регулярно сообщаем в разделе «Новости» сайта журнала. Это направление развития инженерной мысли перспективно, ибо домашняя терапия способна произвести революцию в лечении пациентов с депрессией. А благодаря ультрамалым размерам устройство невидимо после имплантации, но эффективно обеспечивает транскраниальную магнитную стимуляцию участков мозга и положительно влияет на облегчение состояния пациента. Таким образом, научными сотрудниками и разработчиками медицинских технологий в области микро- и нанoeлектроники заявлено новое слово в системе лечения пациентов, страдающих от тяжёлых форм депрессии.

Литература

1. Имплантат. Особенности и результаты исследования // URL: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2023.09.13.23295460v1>.
2. Миниатюрный имплантат для лечения депрессии // URL: <https://evercare.ru/news/miniaturnyy-implantat-dlya-lecheniya-depressii>.
3. Как победить осеннюю депрессию // URL: <https://www.belnovosti.by/krasotai-zdorove/psiholog-andrey-kashkarov-rasskazal-kak-pobedit-osennyuyu-depressiyu>.
4. Как бороться с бессонницей при депрессии // URL: <https://www.tut-news.ru/psihologiya/psiholog-andrey-kashkarov-rasskazal-kak-borotsya-s-bessonnicей-pri-depressii>.
5. *Elias G.J.B. et al.* Neuromodulatory treatments for psychiatric disease: A comprehensive survey of the clinical trial landscape. *Brain Stimul. Basic Transl. Clin. Res. Neuromodulation* 14, 1393–1403 (2021) // URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1935861X21002230>.
6. United States Central Medical Services. LCD – Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) in the Treatment of Adults with Major Depressive Disorder (L34998) – 2022 // URL: <https://www.psychiatrist.com/jcp/depression/insurance-rtms-for-treatment-resistant-depression-mismatch-of-evidence-and-policies/>.



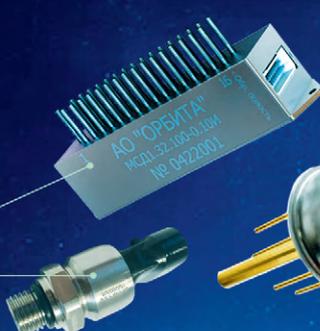


ОРБИТА

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО



На орбите новых технологий



Датчики давления



Сенсоры давления

(8342) 25-41-05
info@orbita.su
www.orbita.su

АО «Орбита»
 ул. Пионерская, 12, р.п. Ялга, г.о. Саранск,
 Республика Мордовия, 430904, Россия

www.orbita.su

Реклама

Инновационные электронные и оптогенетические технологии в беспроводном управлении мозговой активностью через имплантат

Антти Суомалайнен

В статье рассматривается имплантированное электронное беспроводное устройство со световодным зондом как элемент оптогенетических исследований индивидуального поведения живых организмов. Перспективу разработки на стыке электроники нейробиологии и оптогенетики трудно переоценить. Управление двигательной активностью, реакциями, аппетитом и даже сном – продолжение пути эволюционирующего технического прогресса.

Поскольку человеческий мозг представляет собой систему из почти 100 млрд переплетённых нейронов, чрезвычайно сложно исследовать отдельные нейроны или группы нейронов. Оптогенетика, активно развивающаяся в исследованиях и опытах с моделями на животных примерно с 2005 года, предполагает контроль над конкретными генетически определёнными нейронами, чтобы исследовать их с беспрецедентной точностью для изучения связи и высвобождения нейротрансмиттеров. Исследователи сначала модифицируют нейроны живых мышей, чтобы экспрессировать модифицированный ген посредством светочувствительных рецепторов. Затем уже можно использовать внешний свет для контроля и мониторинга активности мозга живого существа.

Инновационные направления развития на стыке оптогенетики и электроники

Оптогенетика в связке с электронной даёт большие перспективы

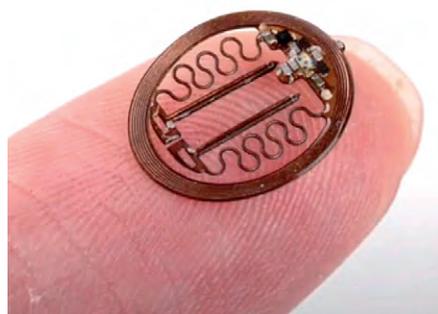


Рис. 1. Внешний вид устройства с имплантируемым зондом

развития. Об этом свидетельствуют результаты опыта Северо-западного университета в Иллинойсе по исследованию взаимодействий животных. Основанный на оптогенетике эксперимент с применением вживляемых зондов-световодов, проводившийся на мышах, закончился в мае 2022 года.

Эту передовую технологию для управления с помощью световых импульсов, с помощью тонких гибких зондов, проникающих в биологические ткани, уже называют прорывной в области нейробиологии. Авторы метода: исследователи профессор Джон А. Роджерс (John Rogers), наша бывшая соотечественница профессор-нейробиолог Евгения Коровицкая (Yevgenia Kozorovitskiy) и более 10 их коллег.

Импульсы, передаваемые мышам с помощью лучей света в режиме реального времени, влияют на их поведение, коммуникацию, активность. В основе метода сверхминиатюрный беспроводной имплантируемый транспондер, использующий световые импульсы для активации нейронов животных. Воздействие на нейроны определённой частотой возбуждает их двигательную активность или, наоборот, приводит к пассивности, ослаблению деятельности. Устройство, представленное на рис. 1, работает без элементов питания.

Проектирование устройств без элементов питания можно назвать трендом перспективных идей в области современной электроники, которого придерживаются многие разработчики. Об устройстве электронной медицинской маски с датчиками, работающими автономно от преобра-

зователей света и дыхания, «СоЭл» писала в [1].

Беспроводное управление в режиме реального времени

Устройство представляет собой миниатюрный имплантат без элементов питания с беспроводной цифровой связью. Тонкий, гибкий, беспроводной характер имплантата позволяет мышам быть активными в реалистичной среде, а исследователям – наблюдать за ними. Устройство уже называют элементом «переходной электроники», открывающей новые перспективы в медицине и биомедицинских исследованиях. К примеру, биорезорбируемые материалы позволяют создавать диагностические и терапевтические устройства для мониторинга прогрессирующих заболеваний и методов их лечения, проведения электрической, фармакологической, клеточной терапии и даже перепрограммирования генов в формате геной инженерии. Дальность действия (связи, управления) имплантата пока не превышает размеров одного помещения площадью в 20 м². Управление осуществляется с помощью компьютерной программы, следовательно, управляющей моделью может служить ПК, ноутбук, что делает разработку мобильной, автономной и этим даёт ей новые перспективы для дистанционного управления живым организмом через нейронные связи.

Принцип действия устройства

Ограниченное программируемое управление и узкие варианты профилей освещения ограничивают использование существующих устройств. С появлением новой разработки эти недостатки преодолены – созданы две платформы с возможностью программирования пользователем в реальном времени для нескольких независимых источников света, в конструкциях с креплением на голове и на спине. Миниатюрное беспроводное устройство толщи-

ной 0,5 мм мягко опирается на внешнюю поверхность черепа мыши, а нитевидный световод-зонд одним концом вживляется под кожей, проникая в мозг через крошечный черепной дефект. Миниатюрное устройство использует протоколы связи ближнего радиуса действия. Исследователи управляют светом по беспроводной связи в режиме реального времени с помощью пользовательского интерфейса на компьютере. Антенна, окружающая вольтер с животными, одновременно является передатчиком энергии на беспроводное устройство, что устраняет необходимость в источнике внутреннего питания. Индукция межмозговой нейрональной синхронности в медиальной префронтальной коре мозга, каким бы интеллектуально малым он ни был, формирует импульсы активности, приводящие к взаимодействию внутри групп мелких грызунов.

Проблематика исследований

Для электронных устройств оптогенетики с независимым цифровым контролем над несколькими датчиками-транспондерами одновременно возникли ещё большие перспективы в приклад-

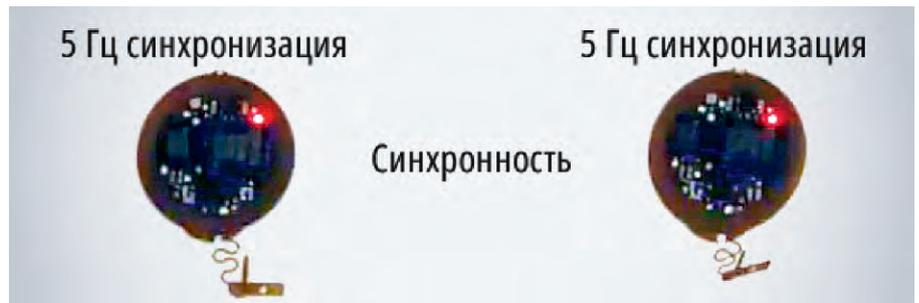


Рис. 2. Воздействие световыми импульсами с частотой 5 Гц

ной науке, ибо количество одновременно контролируемых управляемых устройств может быть очень большим. Метод управления нейронами с помощью света и вживляемого имплантата теоретически был известен, в частности, с помощью светопроводящих оптоэлектронных волокон проводили эксперименты на мелких грызунах, но двигательная активность «опытных образцов» приводила к тому, что шлейф оптоволокон быстро запутывался, и опыт прекращался. С предыдущими технологиями было затруднительно наблюдать за несколькими животными, взаимодействующими в среде, так как они были «привязаны» шлейфами управления, состоящими из оптоволо-

кон. Поэтому предыдущие исследования в области нейронной оптогенетики ограничивались доступной технологией по передаче световых импульсов.

С помощью программного обеспечения можно дистанционно включать и выключать свет, одновременно наблюдая за поведением животного. Хотя можно было исследовать одно животное в отдельности, с контролем нейронной активности одновременно в гибких паттернах в группах взаимодействующих в среде животных возникали сложности. Ибо волоконно-оптические провода выходили из головы животного и соединялись с внешним источником света.

Достичь перспективного результата опыта удалось только теперь, когда с помо-

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ЭЛЕКОНД

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

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

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

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

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

КОНДЕНСАТОРЫ
разработка и производство

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

Реклама



Рис. 3. Воздействие световыми импульсами с разными частотами – 5 Гц и 25 Гц

щью электронного устройства (рис. 1) воздействие на грызунов стали осуществлять дистанционно беспроводным способом. В новом формате удобнее наблюдать социальные взаимодействия грызунов как в группах, так и индивидуально.

Эффект достигнут с помощью двух платформ с возможностью программирования пользователем в реальном времени для нескольких независимых источников света, в конструкциях с креплением на голове и на спине. По мере того как мыши двигались, исследователи воздействовали на них разными импульсами. Так изучают естественное поведение животных, связанное с физическим ограничением передвижения (клетка).

Профессор-исследователь молекулярной биологии Джон Роджерс, получивший недавно престижную премию по совокупности результатов исследований, отзываясь об инновационном методе так: «Мозговая активность у изолированных животных интересна, но выход за рамки исследований отдельных людей к изучению сложных, социально взаимодействующих групп является одним из самых важных и захватывающих направлений в нейробиологии. Теперь у нас есть технология для исследования того, как формируются и разрываются связи между людьми в этих группах, и для изучения того, как в результате этих взаимодействий возникают социальные иерархии» [2].

Джон Роджерс, Ph.D в области материаловедения, биомедицинской инженерии и нейрохирургии, награждён Советом Национальной академии наук США престижной премией Джеймса 2022 года в области интеграции науки и технологий. Премия Джеймса присуждается за выдающийся вклад, сделанный учёными, разрабатывающими методы из смежных областей наук для решения актуальной современной проблемы, не поддающейся решению с точки зрения одной только прикладной дисциплины. Исследование

«Беспроводные многосторонние устройства для оптогенетических исследований индивидуального и социального поведения» поддержано Национальным научным фондом и национальными институтами здравоохранения США.

Описание эксперимента

Чтобы подтвердить принцип технологии Д. Роджерса, Е. Козоровицкий с коллегами разработали эксперимент по изучению оптогенетического подхода к дистанционному управлению социальными взаимодействиями между парами или группами мышей. Когда мыши находились рядом друг с другом в замкнутом пространстве (клетка размерами 1x1 м), по беспроводной сети, управляющей имплантатом, исследователи синхронно активировали набор нейронов в области мозга, связанной с исполнительной функцией высшего порядка, заставляя их увеличивать частоту и продолжительность социальных взаимодействий. Это иллюстрирует рис. 2.

При воздействии через вживлённый зонд-волновод одинаковой частотой 5 Гц действия грызунов были синхронны. Стимуляция разными частотами вызывает эффект десинхронизации у той же пары мышей. Это иллюстрирует рис. 3.

Так, в групповом формате исследователи смогли заставить произвольно выбранную пару грызунов взаимодействовать больше, чем другие. Это подтверждение верности гипотезы о нейронной синхронности в социальном поведении. Кроме того, возникли перспективы продолжения исследования зависимости поведения испытуемых живых организмов от частоты световых импульсов. При воздействии с разными частотами (отличие в 5 раз) грызуны вели себя неодинаково. Параллельно проводятся исследования зависимости активности поведения грызунов от силы и частоты электромагнитных импульсов

малого тока, приводящих к минивибрации имплантата. Но это уже другой эксперимент в нейробиологии.

Перспективы электроники в связи с нейробиологией

Инженерные исследования оптоэлектронных и тепловых свойств электронного имплантата определяют перспективные возможности и конструктивные особенности дальнейших разработок, подчёркивая возможности программируемости беспроводных оптогенетических платформ в реальном времени. Имплантируемые миниатюрные устройства с беспроводным управлением и интегрированными в них датчиками пульса, давления, температуры живого организма представляют привлекательный набор атрибутов для будущих исследований. Ведь ранее были объективные технические ограничения, несовместимые с традиционными оптоволоконными подходами или имплантатами с питанием от батарей или аккумуляторов. Другая перспектива описанного метода в возможностях – влиять на поведение крупных млекопитающих, одним из видов которых является человек разумный. Ещё одно перспективное направление исследований – оптогенетику – в сочетании с электронными разработками можно применять для лечения слепоты и даже паралича конечностей.

Литература

1. *Кашикарров А.П.* Новейшие разработки в области медицинской электроники для борьбы с вирусом и не только // Современная электроника. 2022. № 3. С. 8.
2. Вестник Северо-западного университета, Иллинойс. Имплантированное беспроводное устройство для оптогенетических исследований индивидуального поведения мышей. // URL: <https://news.northwestern.edu/stories/2021/05/implanted-wireless-device-triggers-mice-to-form-instant-bond/>.
3. Wireless multilateral devices for optogenetic studies of individual and social behaviors. *Nature Neuroscience*. // URL: <https://www.nature.com/articles/s41593-021-00849-x>.
4. *Bassett D.S. & Sporns O.* Network neuroscience. *Nat. Neurosci.* 20, pp. 353–364 (2017).
5. *Klapoetke N.C. et al.* Independent optical excitation of distinct neural populations. *Nat. Methods* 11, pp. 338–346 (2014).

НОВОСТИ МИРА

Тайвань обвинил Пекин в краже технологий производства чипов

Тайваньский представитель в США обвинил Китай в нечестной конкуренции и краже технологии производства чипов. При этом китайские технологические успехи он не признаёт.

Руководитель Тайбэйского экономического и культурного представительства в Вашингтоне Александр Юи (Alexander Yui) в интервью агентству Reuters обвинил Китай в том, что тот пытается конкурировать с Тайванем в технологии производства чипов путём «краж» и «обмана».

«Они на самом деле не следуют правилам. Они обманывают, копируют и т.д. Они крадут технологии», – сказал Юи о китайских производителях микросхем.

При этом посол не признаёт успехов китайских технологических компаний, которые уже используют 7-нм и 5-нм процессоры в своей электронике.

Дипломат заявил, что Китай пока не добился успеха в этой области, несмотря на огромные инвестиции. Юи добавил, что у него есть сомнения относительно того, смогут ли они создать жизнеспособные процессоры следующего поколения уже в этом году на фоне санкций США, направленных на сдерживание развития Пекином передовых технологий.

Посол Китая в США Лю Пэньюй (Liu Pengyu) сказал в ответ, что такое заявление является злостным и не соответствует здравому смыслу.

«Научные и технологические достижения Китая никогда не достигаются посредством "обмана" и "кражи". Наше развитие всегда строится на наших собственных силах, и мы уверены, что продолжим укреплять способность Китая к самообеспечению технологическими инновациями», – заявил представитель Китая.

Несмотря на все ограничения, введённые США и их союзниками, китайская Huawei в сотрудничестве с SMIC выпустила в конце августа 2023 г. 7-нанометровый чип. Телефон с этим процессором поступил в продажу как раз во время визита министра торговли США Джинны Раймондо (Gina Raimondo) в Китай.

Изучив строение чипа, эксперты TechInsights заподозрили китайскую компанию в копировании технологии у тайваньской TSMC, крупнейшего в мире контрактного производителя. Они выдвигали ещё одну версию, согласно которой SMIC сумела закупить значительное количество литографического оборудования до вступления в силу новых строгих санкций против Китай-

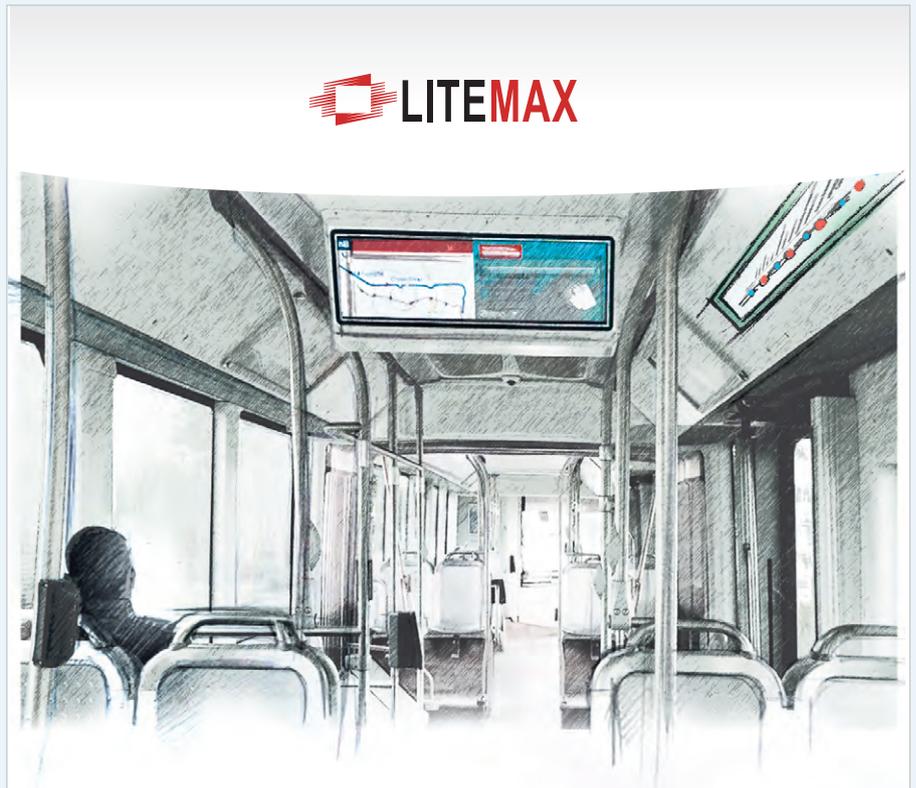
ской технологической индустрии.

А в начале декабря 2023 г. Huawei анонсировала ноутбук Qingyun L540. CNews писал тогда, что в Китае с высокой долей вероятности появилось собственное производство 5-нанометровых процессоров Kirin 9006C, которые лежат в основе ноутбука.

Новые технологии, такие как 7-нм и 5-нм технологические узлы, настолько сложны, что их практически невозможно украсть, считают авторы портала Tom's Hardware. Поэтому вме-

сто того, чтобы воровать передовые технологии производства, SMIC переманивает специалистов из TSMC и Samsung Foundry. Это ещё одна попытка объяснить появление современных процессоров в технике Китая. По данным Reuters, расследование в отношении китайских компаний, подозреваемых в незаконном переманивании инженеров по полупроводникам и других технических талантов, проводили тайваньские «ловцы шпионов».

russianelectronics.ru



ВАШ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОПУТЧИК!

Полосковые дисплеи для транспорта

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



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

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



Ядерные батареи будущего

Андрей Ласорла

Автономные источники электропитания, способные работать без подзарядки десятилетиями, востребованы во многих отраслях промышленности: от космоса до медицины. Из новых трендов стоит отметить ядерные (они же радиоизотопные или атомные) электрические батареи на основе радионуклидов миниатюрного форм-фактора. В обзоре рассматриваются уже созданные условно «вечные» элементы питания на основе радионуклидов, а также аспекты развития инженерной мысли в области ядерных электрических батарей, процессоров и элементов питания, накапливающих энергию из внешней среды.

Тенденции в разработке автономных источников питания

Ядерные батареи – автономные источники тока, в которых энергия радиоактивного распада метастабильных ядер преобразуется в электрический ток. В зависимости от конкретной задачи в таких батареях используются а- и б-активные ядра с периодом полураспада нуклидов $T_{1/2}$ от сотни дней до сотни лет. Выбор ядра специального источника питания зависит также от режима эксплуатации РЭА и других условий. Пока такие электрические батареи работают в условиях очень малой мощности, но перспективы для совершенствования изделий и технологии огромны. К слову, все достойные внимания разработчики РЭА в мире конкурируют за создание микроконтроллеров конфигурации RISC-V со сверхнизким энергопотреблением, работающих исключительно за счёт сбора энергии из внешней среды: преобразования энергии тепла, света, радиоволн, химической среды и даже продуктов потовых желёз человека и животных. Да, пока такие источники автономного «самопитания» обладают чрезвычайно малой мощностью, но они уже существуют и применяются, в частности, при взаимодействии с имплантатом в устройствах медицинской микроэлектроники. Иногда батарея, аккумулятор или даже ионистор в качестве элемента питания действительно не подходят, если вы проектируете устройство сверхнизкого энергопотребления. В этой связи рассмотрение технологий создания электрических батарей на основе изотопов с ядерным принципом действия представляется весьма актуаль-

ным. Конфигурация RISC-V касается микроконтроллеров со сверхнизким энергопотреблением с периферийными устройствами на основе стандартной технологии КМОП и инструментов Cadence Design Systems с открытым исходным кодом. Используется 32-битное ядро RISC-V, специально разработанное для обеспечения супернизкого энергопотребления и встроенной функцией сбора энергии. Среди преимуществ масштабируемая, настраиваемая память с низким энергопотреблением, беспроводной интерфейс с поддержкой Bluetooth Low Energy и радиоканал в формате IEEE802.15.4 на одном чипе, протоколы Matter и другие особенности ПО. Уже несколько лет доступны саморастворяющиеся имплантаты и даже водорастворимые в горячей воде печатные платы, что удобно для безопасной и полной переработки. На фоне этих инноваций прототип радиоизотопной батареи малой и средней мощности на основе бета-распада никеля-63, плутония-238 (и других изотопов), а также параллельные разработки по созданию ядерной электрической батареи в КНР представляют огромный интерес.

Выбор радиоизотопа и схемы преобразования

Области применения ядерных батарей разнообразны: они незаменимы на территориях, удалённых от инфраструктуры, к примеру, в Арктике, на больших глубинах, на газо- и нефтепроводах большой протяжённости, в космосе, в устройствах, обеспечивающих специальную связь, и в медицине: везде, где требуется длительный мониторинг без возможности подзарядки

или замены источников энергии. Для изотопных источников применительно к кардиостимуляторам или датчикам артериального давления, электронным анализаторам крови подходят только плутоний-238 и никель-63. Требование безопасного радиоизотопа сужает возможности, поскольку радионуклиды при распаде должны распадаться либо переходить в состояние дочернего ядра. Кроме выбора радионуклида принципиально важным при разработке радиоизотопных источников энергии является выбор схемы преобразователя энергии ядерного распада в электрический ток. На практике преобразование осуществляется по непрямому ступенчатому принципу: кинетическая и кулоновская энергия альфа- и бета-частиц сначала превращаются в тепловую, химическую, механическую, световую и другие виды энергии, а затем – в электрическую.

Концепция оригинальной физической системы на основе ^{63}Ni предложена группой учёных из Института «Лангпауз» под руководством Петра Борисюка [7]. Если обеспечить условия эффективной генерации вторичных электронов непосредственно внутри наноструктурированных плёнок никеля и значительно увеличить токовый сигнал, вызванный каскадом многократных неупругих соударений бета-частиц, на выходе экспериментальной реализации получают относительно простую систему, но довольно результативную с точки зрения состава плотно упакованных нанокластеров никеля с градиентным распределением наночастиц по размеру, осаждённых на поверхности широкополосного диэлектрика – оксида кремния [7]. Вследствие размерной зависимости энергии Ферми наличие пространственно-неоднородного распределения металлических наночастиц по размерам приводит к пространственному перераспределению заряда в электропроводящей системе соприкасающихся друг с другом металлических наночастиц. Их средний размер изменяется в выделенном направлении, что приводит к возникновению разности потенциалов на полярных выходах (напряжению). Объяснением этого эффекта с помощью знаний физики ядерной



Рис. 1. Внешний вид батареи BV-100 фирмы Betavolt

реакции является демонстрация формирования нанокластерных плёнок никеля-63 с градиентным распределением наночастиц. В процессе реакции достигают двух эффектов. Во-первых, формируются покрытия с фиксированной разностью потенциалов (определяется разницей размеров наночастиц в выделенном направлении); во-вторых, происходит преобразование энергии бета-распада ^{63}Ni в ток электронов (электрический ток) без использования дополнительных сложных для реализации полупроводниковых систем.

Исследование электрофизических свойств формируемой нанокластерной плёнки никеля и подбор оптимальных параметров эксперимента для создания эффективного преобразователя энергии бета-распада ^{63}Ni в электричество впервые были опубликованы в журнале Applied Physics Letters коллективом авторов [7]. Поскольку наноструктурированные плёнки могут использоваться в качестве селективного фотоэмиттера – системы с перераспределённым спектром излучения в заданном спектральном диапазоне, процесс окисления плёнки приводил к образованию оксидной оболочки поверх металлического ядра нанокластера. Затем происходило формирование совокупности металлических нанокластеров с их пространственным распределением по размерам, но в одном слое (оболочке) оксида. Относительно малые размеры нанокластеров (2–15 нм) способствуют проявлению квантовых свойств полупроводниковых материалов с широким разбросом значений ширины запрещённой зоны, а это обеспечивает возможность эмиссии фотонов заданной длины волны при нагреве и, следовательно, обеспечивает возможность коррекции спектра излучения под определённый диапазон длин волн. Это важное отличие

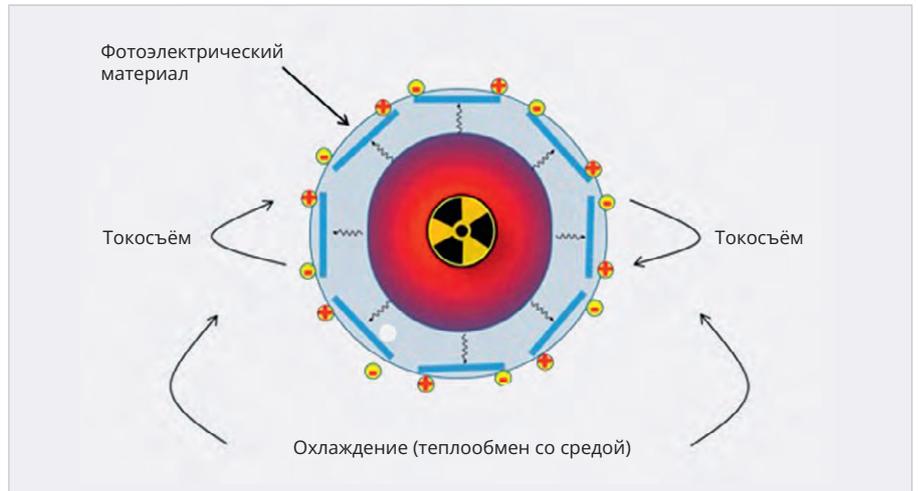


Рис. 2. Иллюстрация синтеза полураспада изотопов, применяемых в батарее BV-100

перспективного открытия в разработке отечественных ученых, поэтому энергоэффективность и энергосбережение современных тепловых источников электроэнергии может выйти на новый уровень. Понимая конкурентное значение технологии, подобными исследованиями занимаются во всём мире.

Китайские успехи

Китайский стартап Betavolt из Пекина представил первую в мире миниатюрную аккумуляторную батарею с ядерной начинкой: модель BV-100. Первенство объясняют тем, что это первый случай, когда атомная энергия реализована в столь миниатюрной модели. Модуль размером $15 \times 15 \times 5$ мм содержит 63 разновидности атомов (и ядер) химических элементов (изотопов). Отсюда и название батареи – «ядерная». Миниатюризация – основной отличительный признак инновации. Батареи можно подключать параллельно и последовательно, создавая модули в электрической цепи для увеличения мощности источника питания и суммарного напряжения. Заявленная мощность одной батареи с изотопом никель-63 и алмазными полупроводниками сравнима с источником автономного питания в 100 мкВт, а напряжение составляет 3 В постоянного тока [6]. Размеры батареи меньше средней монеты. На рис. 1 представлен внешний вид изделия.

Принцип работы батареи основан на преобразовании энергии, выделяемой при распаде изотопов, в электрический ток. Соответственно, речь идёт об источнике энергии, у которого понятие саморазряда отсутствует вообще, а рабочий процесс начинается только

после подключения в электрическую цепь (при подключении к контактам батареи устройств нагрузки).

Изотопы никеля – разновидности химического элемента никеля, имеющие разное количество нейтронов в ядре. Известны изотопы никеля с массовыми числами от 48 до 80 (количество протонов 28, нейтронов от 20 до 52) и 8 ядерных изомеров. Природный никель получил распространение как источник для ионизации захватом электрона (ион-мобильная спектрометрия, детекторы электронного захвата в газовой хроматографии) и представляет собой смесь пяти стабильных изотопов: ^{58}Ni (изотопная распространённость – ИР – 68,27%), ^{60}Ni (ИР – 26,10%), ^{61}Ni (ИР – 1,13%), ^{62}Ni (ИР – 3,59%), ^{64}Ni (ИР – 0,91%). Среди искусственных изотопов самые долгоживущие – ^{59}Ni (период полураспада 76 тыс. лет) и ^{63}Ni (период полураспада порядка 100 лет), а период полураспада некоторых других изотопов не превышает нескольких суток. Дочерний изотоп – стабильный ^{63}Cu – получают облучением нейтронами в ядерном реакторе стабильного изотопа ^{62}Ni .

На рис. 2 представлена иллюстрация синтеза полураспада изотопов, применяемых в батарее BV-100.

Используемый в новой атомной батарее $\text{Ni}63$ – наиболее перспективный радионуклид в бета-вольтаике: средняя энергия бета-частиц ^{63}Ni 17,5 кэВ (и максимальная энергия 67 кэВ), период полураспада 100,1 лет; к нему можно создать физическую защиту от мягкого бета-излучения источника в миниатюрном элементе питания.

Модуль BV-100 рекомендован к применению в широком спектре современных электронных устройств: в сотовых

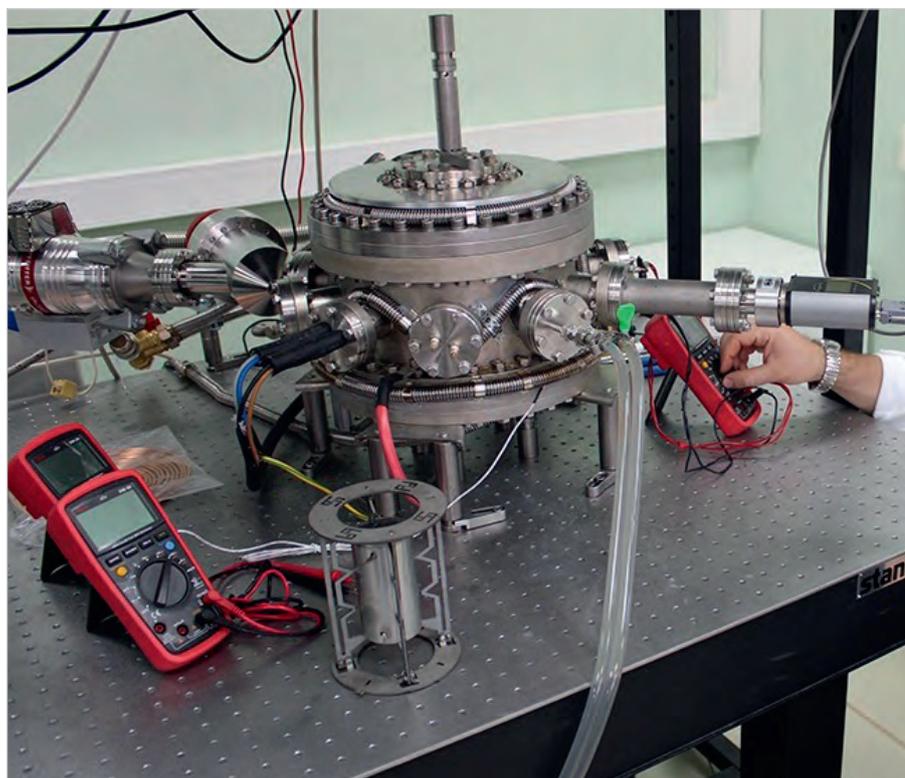


Рис. 3. Внешний вид лабораторного источника электроэнергии в НИЯУ «МИФИ»

телефонах и радиостанциях, робототехнике (миниатюрных роботах), БПЛА, устройствах с ИИ, медицинских электронных приборах и датчиках разного назначения, в том числе работающих удалённо от основного блока управления или сервера. Особую роль пророчат изобретению в аэрокосмической промышленности, в частности, в микропроцессорной технике. Батарея имеет многослойную конструкцию, устойчива к огню и даже сильному воздействию детонации, приравняемому к взрывной среде. Сохраняет функциональность в температурном диапазоне от -60 до $+120^{\circ}\text{C}$. При этом модуль безопасен и не имеет излучения, ибо в процессе отдачи электроэнергии изотопы распадаются, превращаясь в стабильные и нерадиоактивные изотопы меди. Атомная батарея не имеет внешнего радиоактивного излучения, пригодна для использования даже в условиях высоких требований к стерильности: в медицинских устройствах, таких как кардиостимуляторы, мониторы разного назначения, элементы искусственного сердца, соприкасающиеся с телом человека.

Модуль позиционируют не только «ядерным», но и «вечным», ведь его не надо заряжать. Но это не означает, что электронные устройства с питанием от «волшебной таблетки» могут работать вечно. Заявлено, что батарея

может храниться 50 лет без подзарядки и иного обслуживания. Пока не ясно, какими испытаниями этот срок установлен, но он заявлен производителем в анонсе [6]. Также непонятно, нужны ли батареи со столь длительным сроком эксплуатации в смартфонах: нередко пользователи меняют устройства на более новые и функциональные каждые 1–2 года. Остаётся загадкой и то, насколько потребители готовы к использованию «карманного ядерного реактора», несмотря на гарантии безопасности.

Предпосылки к созданию миниатюрного, пусть пока и маломощного, ядерного энергетического модуля известны ещё в XX веке, когда учёные СССР и США разработали электронную технологию для использования в космических кораблях, подводных системах и удалённых научных модулях-станциях, однако термоядерные батареи позиционировались как дорогостоящие и громоздкие. Стремление к миниатюризации и коммерциализации ядерных батарей предпринято в рамках 14-го пятилетнего плана Китая, призванного укрепить экономику страны в период 2021–2025 гг. Надо отметить, что научные коллективы в США и Европе также работают над разработкой подобных батарей. В пресс-релизе сообщается, что новая энергетическая инновация поможет

Китаю получить преимущество в новом раунде технологической революции искусственного интеллекта [6]. Пока новейшая разработка находится на стадии пилотных испытаний, создатели первой портативной ядерной батареи утверждают, что будут работать над созданием к началу 2025 года аккумуляторной батареи мощностью 1 Вт.

Применение нетрадиционных источников питания в качестве селективно излучающих систем в инфракрасном диапазоне позволяет увеличить эффективность их работы, ибо часть энергии безвозвратно превращается в тепловую. Был создан прототип автономного радиоизотопного источника питания средней мощности на основе узкозонных полупроводниковых термофотовольтаических материалов с КПД преобразования теплового излучения (ближнего ИК-диапазона) не ниже 15%. Это более чем в 2 раза превосходит КПД преобразования радиоизотопных источников питания, выполненных по технологии радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РИТЭГ). Также было проведено исследование технических характеристик прототипа, разработан комплект конструкторской документации для масштабирования, отработана технология преобразования тепловой энергии ядерного распада в электричество с помощью термофотовольтаических преобразователей, позволяющих работать в ближнем ИК-диапазоне. Такие же разработки в настоящее время активно ведутся в США и Европе для аппаратов исследования космоса. Увеличение КПД солнечных элементов питания посредством использования термофотовольтаических материалов – новый импульс к совершенствованию ядерных батарей. Поэтому путь создания высокоэффективных радиоизотопных источников энергии представляет собой поиск новых или модифицированных материалов, по своим полупроводниковым свойствам способных заменить кремний, германий и другие узкозонные полупроводники.

Источник питания на плутонии-238

Созданный в Национальном исследовательском ядерном университете (НИЯУ) «МИФИ» прототип источника электроэнергии на плутонии-238 мало похож на пальчиковые батарейки или аккумуляторы мобильных теле-

фонов. Это состоящее из нескольких технологических слоёв 30-килограммовое устройство с многочисленными разъёмами [4].

На рис. 3 представлен внешний вид лабораторного источника электроэнергии в НИЯУ «МИФИ».

Стремление к тому, чтобы добиться крайне продолжительной работы данного источника, прямо связано с предназначением и условиями эксплуатации рассматриваемых нетипичных электрических батарей.

Предназначение и условия эксплуатации изотопных батарей

Рассматриваемые изотопные батареи решают множество проблем для расположенных в отдалённых районах потребителей, к примеру, в датчиках телеметрии для нефте- и газопроводов, ибо ядерные электрические батареи могут работать без подзарядки несколько десятков лет там, где условия эксплуатации очень суровы, включая условия с нетипичным температурным режимом до -100°C , когда стандартные автономные источники питания устойчиво работать не могут или их энергоёмкость существенно снижается. В пример уместно привести автономные метеопосты на территории Крайнего Севера, створные навигационные знаки и в целом оборудование гидрографических станций, оборудование световых «маяков» для ориентации судов, находящихся в море, в том числе на наземных объектах вдоль трассы Северного морского пути, а также космические спутники. Разумеется, сфера применения ядерных батарей не ограничивается приведёнными выше примерами. Так, при установке в качестве источников питания с мощностью даже 5–10 Вт на удалённые и необслуживаемые оператором (обслуживаемые дистанционно) метеостанции, предназначенные для передачи информации о погоде на Большую землю посредством телеметрии, удастся добиться более точных прогнозов. Это возможно в том числе из-за стабильного автономного питания удалённых зондов, для которых изотопные батареи будут дополнительным фактором стабилизации питания в комплексе с источниками возобновляемых источников энергии ветра (ветрогенераторы) и солнца (солнечные панели и преобразователи в электрический ток).

Долговечность и принцип работы изотопных батарей

Чем больше период полураспада активного изотопа, тем больший ресурс имеет источник питания на его основе. Вот почему так важны характеристики материалов: к примеру, период полураспада тория-228 составляет 2 года, а америция-241 – около 400 лет. Выбранный плутоний-238 – элемент с 87-летним периодом полураспада. Гарантированный срок службы изделий обозначен разработчиками в 30 лет. Как и в любом «рукотворном» устройстве со сложными элементами, в том числе в РЭА, отдельные элементы изделия неравномерно сохраняют свойства, а общая надёжность зависит от расчёта «наработки до отказа» самых нестабильных компонентов. Поэтому в расчётах долговременности эксплуатации учитываются риски разрушения проводников (в том числе с алмазным напылением), деградация поверхности и кристаллов фотоэлементов, возможная потеря вакуума в капсуле. При нарушении целостности оболочки и корпуса изотопный источник автономного питания можно переместить в новую оболочку, и сохранённая энергия обеспечит разность потенциалов на полюсах. Таким образом, теоретически ядро, если оно сохранено, можно использовать и далее в других источниках питания РЭА.

Но вот что крайне важно: чем меньше живёт активный изотоп, тем выше (при одинаковой энергии распада и прочих равных условиях) его энергоёмкость и отдаваемая в нагрузку полезная мощность. Как мы отметили выше, изотопный источник тока практически лишён эффекта саморазряда, так как реакция происходит только при наличии «внутреннего тока» и ЭДС, связанной с подключением внешней нагрузки.

Применяемый в плутониевой электрической батарее принцип преобразования энергии ядерного распада в электрическую называют термофотоэлектрическим [4]. Альфа-источник окружён вакуумной капсулой, внешние стенки которой покрыты слоем наночастиц. Тепло от ионизирующего излучения нагревает капсулу до 1500 К, заставляя её поверхность светиться. Чувствительные и адаптированные к среде фотоэлементы, окружающие капсулу и способные выдерживать колоссальный нагрев окружающей темпе-

ратуры, улавливают эти изменения спектра. В принципе работы изделий особенности фотогенерации: образование подвижных электронов и дырок при поглощении квантов света, в том числе в органических полупроводниках с изменениями от освещённости и температуры. Это знание способствует созданию разных устройств в сегменте органической фотовольтаики, таких как солнечные панели и батареи. Перенос заряда и энергии в конденсатах квантовых точек описан довольно давно [3, 5]. Однако с появлением изотопных источников тока задача моделирования транспорта носителей заряда, необходимого для оптимизации характеристик оптоэлектронных устройств на основе квантовых точек, решается лучше.

Наногибридные материалы

Неупорядоченные органические полупроводники применяются в РЭА даже в производстве кристаллов светодиодов. Активно исследуются возможности применения в тонкоплёночных транзисторах, фотовольтаике, сенсорах и др. Преимущества неупорядоченных органических полупроводников перед другими материалами – гибкость, лёгкость, разнообразие свойств и возможность производства по дешёвой массовой технологии. В связи с относительно малой величиной диэлектрической проницаемости поглощение фотона приводит к образованию пар, в которых электрон и дырка разделены в пространстве, но связаны кулоновским взаимодействием (геминальные пары). Вероятность полного разделения геминальной пары определяет фотогенерацию свободных носителей заряда: «электронов» и «дырок». Вот почему увеличение эффективности фотогенерации важно для развития устройств органической фотовольтаики и, в частности, солнечных элементов. Разъяснение феномена и предтечи открытий связано с физическими свойствами наногибридных материалов. Изготовление конденсатов квантовых точек производится доступными методами, но для получения качественного покрытия необходимо тщательно соблюдать технологию и условия изготовления, а также выбирать тип органических молекул, «сшивающих» квантовые точки между собой [5]. Возможность замены лигандов позволяет менять расстояние между квантовыми точками и оптимизировать перенос

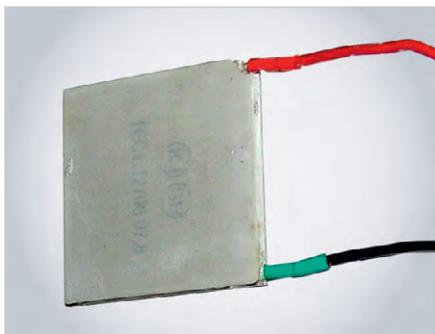


Рис. 4. Внешний вид маломощного элемента Пельтье

энергии и заряда. Технология замены лигандов при комнатной температуре облегчает данный процесс, а наногибридные материалы с квантовыми точками разработчики РЭА используют не только для создания фотовольтаических элементов или светодиодов, но и для сложных полупроводниковых структур как основы новейших высокочувствительных сенсоров.

РИТЭГ и специальные элементы питания

Предтечей новых разработок был запущенный в серийное производство в СССР радиоизотопный термоэлектрический генератор РИТЭГ. Он работал на бета-частицах стронция-90 по термоэлектрическому принципу, почти как термопара: между холодным и разогретым от активного источника полюсами-контактами возникала разность потенциалов (напряжение), при подключении нагрузки создавалась классическая электрическая цепь с постоянным родом тока. Интересно, что для безопасной утилизации последних РИТЭГов с автономных антарктических метеопостов в 2015 году снаряжали полярную миссию. Пока же необслуживаемые метеостанции в труднодоступных районах питают электроэнергией от возобновляемых источников ветра и солнца.

КПД и перспективы изделий

Коэффициент полезного действия РИТЭГ не превышал 6%. В рассматриваемом прототипе изотопной батареи он в 2,5 раза больше. Специальные термо-фотоэлементы, преобразующие свет ближнего диапазона ИК-спектра в электрический ток, дают такой эффект, что энергии тратится меньше [4]. Можно сказать, батарея «сама себя экономит» и является аккумулятором для своей же энергии. На рис. 3 показаны



Рис. 5. Пробраз современной электрической батареи

разъёмы, которые свидетельствуют об экспериментальном образце и продолжающихся исследованиях и тестах – для метрологического замера разных характеристик изделия. Теплопроводность в сердцевине изделия отсутствует, а в перспективе добиваются, чтобы максимум возможной энергии альфа-распада переходил в излучение. Притом что нормальное атмосферное давление чуть больше значения 1 бар, в рабочей камере изделия надо добиться давления внутри примерно в 1/1 000 000 (одну миллионную) миллибара. Нагрев рабочей зоны капсулы имитирует ТЭН, поэтому вакуум в рабочей камере нужен для исключения конвекционных потерь.

По теме РИТЭГ уместно вспомнить, что тепло, как неизменный спутник процесса радиоактивного распада, уже является условием возникновения электрического тока после соответствующего преобразования. Для иллюстрации этого тезиса уместно вспомнить принцип работы элементов Пельтье; кроме прочего, ими комплектуются электронные устройства охлаждения: кулеры, пурифаеры и др. На рис. 4 представлен внешний вид маломощного элемента Пельтье.

Из истории автономных элементов питания

История автономных элементов питания по-своему любопытна. Древняя багдадская (она же парфянская) электрическая батарея была похожа на глиняный горшок, внутрь которого вставлен и зафиксирован полый цилиндр из меди. По центру, так, чтобы тот не соприкасался со стенками трубы, установлен металлический (железный) стержень. Конструкция закрывалась пробкой из битумной смолы. Внешний вид старинной парфян-

ской электрической батареи представлен на рис. 5.

Подобных артефактов при раскопках найдено несколько. Местом обнаружения стало древнее поселение Худжут Рабу неподалеку от Багдада, где в 1936 году велись археологические раскопки. Возраст городища оценивается примерно в 2000 лет, оно было построено в Парфянскую эпоху предположительно между 250 г. до н. э. и 224 г. н. э. Согласно предположению немецкого археолога Вильгельма Кенига, выдвинутому в 1938 году, предназначение сосуда было тем же, что у современного электрического аккумулятора. За загадочным артефактом прочно закрепилось название «багдадская батарейка». Вероятность гипотезы подтверждена экспериментами, проведенными после Второй мировой войны Уиллардом Греем, исследователем компании «Дженерал Электрик». Исследователь соорудил копию предполагаемой батарейки; после наполнения её электролитом Грей выяснил, что устройство является источником электрического тока с напряжением примерно 2 В [2]. Если это действительно так, то древние люди вполне могли пользоваться источниками питания с существенно более высоким напряжением, если включали подобные сосуды в последовательную электрическую цепь и извлекали из неё, к примеру, 220 В.

Что касается альтернативных электрических батарей, работающих по принципу химической реакции, уместно вспомнить и такой вид химических источников тока, как батареи для акваторий. Пример подобной электрической батареи представлен на рис. 6.

Одними из особенных и заслуживающих внимания химических источников тока являются специальные водоакти-

вируемые батареи. Сухие законсервированные и герметично упакованные в целлофановую плёнку батареи способны обеспечить в электрической цепи ток 2–10 А (зависит от типа батареи) при заполнении резервуара водой. Главное их назначение – морские и речные (озёрные) устройства навигации, сигнализации, освещения и спасения. Химические источники питания, работающие под воздействием воды, предназначены производителями для всех подходящих случаев, например, для огней спасательных жилетов (к примеру, ЖСМ), светящихся буюв (БС-2), спасательных плотов, огней поиска (ЭОСС-98ПВ) и самозажигающихся огней спасательных кругов. К примеру, буй БСД-02 (буй светодымящий аварийный) предназначен для обнаружения спасательного круга как в ночное, так и в дневное время за счёт подачи светового и оранжевого дымового сигналов. Он состоит из поплавка и корпуса, в котором размещён водоактивируемый источник питания (приводится в действие автоматически при падении в воду) и дымящий состав. Такие источники разных моделей, фирм и годов выпуска, но действующие (активирующиеся) по единому принципу, подходят и для электропитания элементов плавсредств, а также буюв. Активация происходит автоматически после того, как внутренний резервуар устройства заполняется водой и происходит химическая реакция. Перед этим электрохимический источник тока, предварительно подключённый к электронному устройству (РЭА) нагрузки, освобождают от пробки-заглушки и помещают (бросают) в воду.

Внутренняя начинка водоактивируемых батарей

При производстве на лист магния толщиной 1,4...2 мм (объёмный пористый электрод из металлического магния марки МА2 или МА8) напрессовывают хлорид в смеси с проводящими ток (графит) и связующими (бутилкаучук, целлюлоза, декстрин) добавками. Хлоридный электролит пропитывает целлюлозные (стекловолоконные) сепараторы и высушивается. Батарея хранится в целлофановой, приближенной к вакууму, упаковке длительное время. При поступлении воды химсостав батареи реагирует, и между двумя противоположными полюсами (через несколько минут после воздействия воды с темпера-

турой +1...+40°C) появляется разница потенциалов. Напряжение между полюсами элемента не превышает 6 В (в разных ХИТ), но ток, отдаваемый в нагрузку, существенен. Он может достигать нескольких ампер в течение 10–30 мин, а ток короткого замыкания – порядка 8–10 А. Один из примеров – батарея типа «Дымок», фото которой представлено на рис. 6.

Осуществление постоянного дистанционного контроля

Рассмотренные изотопные источники питания в антивандальных (и безопасных) для флоры и фауны соответствующей местности контейнерах будут оснащены комплексом удалённого контроля местоположения и фиксации параметров окружающей среды, в том числе радиационного фона. Такой контроль посредством современных телекоммуникационных систем позволит минимизировать риски техногенной катастрофы, сохранять окружающую среду и обеспечивать безопасность для людей, животных и в целом природы на высоком уровне.

Утилизации и безопасности изделия также уделено внимание. Динамика разгона альфа-частиц плутония-238 существенно меньше толщины стенок внутренней капсулы, а внешние стенки корпуса устройства со свинцовым экраном являются надёжной преградой для радиации. По истечении срока службы батарею будут утилизировать, а ядерный компонент изымать и хоронить в рекреационных зонах согласно плану утилизации ядерных отходов.

Выводы

Разработки в области ядерных источников питания малой мощности имеют высокий приоритет согласно Единому отраслевому тематическому плану научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) корпорации «Росатом» [7]. Оригинальный альтернативный подход к решению проблемы преобразования энергии ядерного распада в электричество и реализация соответствующей программы позволят совершенствовать процесс преобразования энергии во всём объёме материала. А увеличение эффективности и КПД системы открывает поистине космические возможности масштабирования элементов для получения большей мощности источников питания при их миниатюризации. Это ведёт к созданию в будущем



Рис. 6. Электрохимический источник тока для питания световых и звуковых сигналов на воде

ядерных батарей с энергоёмкостью до сотни кВт. Ожидается, что к 2030 году в промышленной сфере будут внедрены проверенные продукты для накопления и хранения энергии, обеспечивающие сотни ватт и имеющие разный срок службы.

Литература

1. Второй саммит Россия – Африка: перспективы развития // URL: https://www.cta.ru/news/soel/2023/vtoroy_sammit_rossiya_afrika_perspektivy_razvitiya_sovremennoy_elektroniki/.
2. Изобретения инженеров древности // URL: <https://www.weekly-news.info/single-post/2017/12/28/%D0%98%D0%B7%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F-%D0%B8%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BE%D0%B2-%D0%B4%D1%80%D0%B5%D0%B2%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8>.
3. Кашкаров А.П. Фото- и термодатчики в электронных схемах. М.: Альтекс, 2004. 212 с., ил.
4. НИЯУ «МИФИ» разработал ядерную батарею на плутонии-238 // URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/09/13/138696>.
5. Повышение эффективности солнечных батарей // URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/10/18/139777>.
6. Пресс-релиз фирмы Betavolt (КНР). Nuclear battery produces power for 50 years without needing to charge // URL: <https://www.independent.co.uk/tech/nuclear-battery-betavolt-atomic-china-b2476979.html>.
7. Прототип радиоизотопной батареи средней мощности на основе никеля-63 // URL: <https://www.atomic-energy.ru/news/2023/02/01/132411>.

Преимущества переноса производства микросхем малой степени интеграции на кремниевые пластины большего диаметра

Карина Абагян (АО «Микрон»), Андрей Денисов (НПК «ТЦ»)

Исторически производство кремниевой микроэлектроники развивалось от пластин меньшего диаметра к большему по мере освоения технологий выращивания монокристаллического кремния. На сегодняшний день производство на пластинах 75–150 мм перешло от кремниевых подложек на гетероструктурные материалы, такие как арсенид галлия, ниобат лития, нитрид галлия, карбид кремния и другие. Работа со 100-миллиметровыми кремниевыми пластинами осталась в основном для учебных и исследовательских целей, в вузах и лабораториях, среди которых Tyndall National Institute, Unisonic Technologies, Universal Semiconductor Technology, Inc. (USTI), университеты Калифорнии, Мичигана, Висконсина. С 2012 г. в мире новые фабрики строятся только под пластины диаметром не менее 200 мм.

В России данная тенденция также прослеживается, хоть и появилась с небольшой задержкой. В настоящее время со 75–100-мм пластинами работают 4 малосерийных завода с наследованными технологиями и продуктами, и, по аналогии с мировой дорожной картой развития, данные производства можно перенести на масштабные промышленные площадки с улучшением экономических показателей, таких как ресурсоёмкость, стоимость, технологическая стабильность и коэффициент выхода годной продукции. Ниша производств на 100-миллиметровых пла-

стинах – аналоговые и логические микросхемы низкой интеграции.

Сравним основные показатели производства микроэлектроники на 100-миллиметровых и 200-миллиметровых пластинах.

Съём чипов на единицу площади пластины

В силу технологии выращивания кремниевых монокристалльных слитков пластина имеет круглую форму, а чипы – прямоугольную, поэтому краевые зоны пластины не могут полностью использоваться под размещение

чипов. Соответственно, действуют две закономерности: чем больше диаметр пластины, тем больше процент эффективной (используемой под рабочие чипы) площади, и чем больше размер самого чипа, тем сильнее выражается этот эффект. В табл. 1 указано, как увеличивается эффективная площадь в зависимости от диаметра пластины. На рис. 1 – влияние размера чипа на зависимость между диаметром пластины и эффективной площадью.

Таким образом, использование 200-мм пластин вместо 100-мм даёт увеличение съёма чипов с пластины на 5–9% и более, что напрямую отражается на себестоимости чипов.

Снижение стоимости единицы площади чипа

На 2023 г. в мире не осталось действующих фабрик, работающих на 100-миллиметровых кремниевых пластинах.

Согласно данным TechInsights, минимальная себестоимость 1 см² 100-мил-

Таблица 1. Отношение: площадь, используемая для рабочих чипов / полная площадь пластины

Размер чипа, мм ²	100-мм пластина	200-мм пластина
5×5	90,3%	95,1%
10×10	84,6%	92,2%
15×15	81,0%	90,3%

Таблица 2. Сравнение структуры себестоимости пластин КМОП, 2 металла на 100-мм и 200-мм пластинах

	200-мм	100-мм
Подложка	10,5%	7,3%
Трудозатраты	23,0%	38%
Амортизация	6,4%	0%
Обслуживание оборудования	5,6%	3,2%
Непрямые трудозатраты	9,7%	24,1%
Инфраструктурные системы	30,9%	15,9%
Расходные материалы	13,8%	11,5%

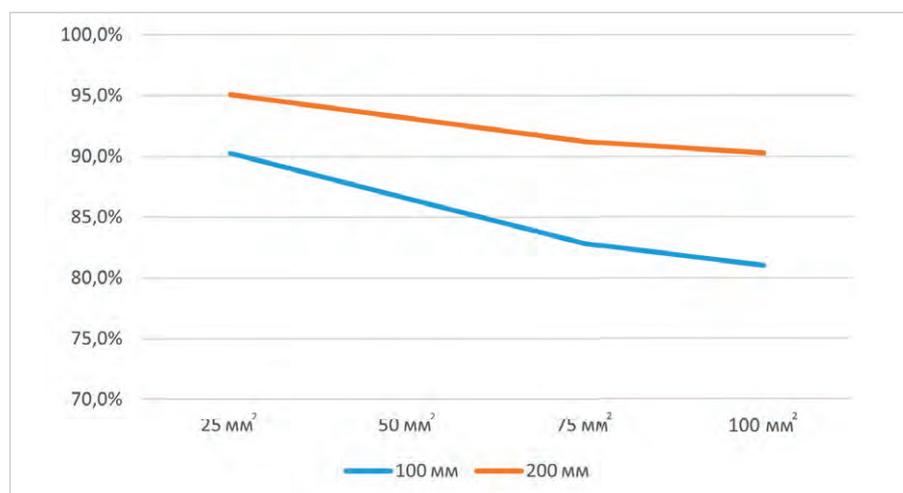


Рис. 1. Отношение: площадь, используемая для рабочих чипов / полная площадь пластины для 100-мм и 200-мм пластин



Рис. 2. Структура себестоимости, 200-мм пластина, КМОП, 350 нм, 2 металла



Рис. 3. Структура себестоимости, 200-мм пластина, КМОП, 2 мкм, 2 металла

лиметровый пластины по техпроцессу КМОП из двух металлов составляет \$2013; 200-мм пластины по техпроцессу КМОП из двух металлов – \$765. Почти трёхкратная разница в затратах на производство обусловлена более высоким уровнем автоматизации и лучшей воспроизводимостью (рис. 2, 3).

Общие трудозатраты на производство 100-мм пластины составляют 68,1% против 32,9% для 200-мм, что объясняется высокой долей ручного труда при обработке и измерениях. Для микроэлектроники, требующей высокой чистоты сред производства, минимизация участия людей в техпроцессе является критической задачей, непосредственно влияющей на уровень дефектности и долю брака. Второй фактор, по которо-

му 100-миллиметровые пластины уступают 200-миллиметровым в 2 раза – это затраты на инфраструктурные системы: очищенную воду, электричество, кондиционирование, подачу химических реактивов. Более высокая материал- и энергоёмкость производства на 100-мм обусловлена значительно устаревшим и неэнергоэффективным оборудованием, а также малой серийностью производства (табл. 2).

Таким образом, основными причинами неконкурентоспособности стоимости 100-миллиметровых пластин в сравнении с 200-мм являются низкая автоматизация производства (высокие трудозатраты) и высокая ресурсоёмкость оборудования (высокие затраты на инфраструктурное обеспечение).

Выводы

Перенос производства интегральных микросхем низкой степени интеграции со 100-миллиметровых на 200-миллиметровые пластины обеспечит снижение себестоимости чипов и рост их качества и надёжности. При этом производство на 200-мм требует более высокой серийности чипов, и перенос целесообразно сопровождать универсализацией чипов сходного функционала через настраиваемые и программируемые параметры. Исследование проведено в рамках выполнения НИОКР в НПК «Технологический центр» при финансовой поддержке Министерством науки и высшего образования РФ.



НОВОСТИ МИРА

Японцы вкладывают огромные средства, чтобы доминировать на рынке чипов. Renesas покупает Altium почти за \$6 млрд

Японский производитель полупроводников Renesas Electronics заявил, что покупает зарегистрированную в Сиднее компанию по разработке программного обеспечения Altium за 9,1 миллиарда австралийских долларов (5,89 миллиарда долларов) наличными, поскольку компания стремится оптимизировать процесс проектирования электроники.

Японский производитель микросхем, который будет финансировать сделку за счёт банковских кредитов и наличных денег, заявил, что приобретение позволит ему лучше управлять проектированием электроники для клиентов, поскольку основным бизнесом Altium является создание инструментов для проектирования печатных плат.

Япония серьёзно настроена вернуть себе глобальное лидерство и доминирование в



мировой экосистеме производства чипов, заявил CNBC Джеспер Колл, экспертный директор Monex Group, подчеркнув, что японские фирмы располагают огромными резервами незадействованного капитала.

Колл сказал, что «корпорации имеют на своих балансах почти \$5 трлн денежных резервов / нераспределённой прибыли в сочетании с де-факто финансированием с нулевой процентной ставкой со стороны

правительства», что помогает финансировать приобретения и создавать комплексную экосистему чипов.

Совершенно разумно прогнозировать, что к 2028–2030 году Япония будет владеть и управлять одной третью глобальной экосистемы производства чипов, что более чем вдвое превышает её нынешнюю долю, добавил Колл.

industry-hunter.com

Практические решения автоматизации производства, видеоидентификации и связи. Обзор и перспективы

Вадим Экземплярский

В 2024 году проявились тенденции, определяющие ключевые тренды в развитии автоматизации в промышленности с помощью систем искусственного интеллекта (ИИ), определилось их влияние на экономическую и технологическую сферы индустрии производства. Среди актуальных трендов особое значение имеют обучаемые с помощью ИИ системы идентификации, контроля документооборота, сертификации, производственного цикла деталей в конвейерном производстве и системы корпоративной связи. Предложен прогноз развития элементов ИИ в системах автоматизации, а также обсуждение потенциальных возможностей и преимуществ для промышленности и общества.

Предпосылки и основания автоматизации процессов идентификации деталей, документооборота и лиц

Пока правительство утвердило список российских приложений для обязательной предустановки на производстве и в критической инфраструктуре, а в бытовой сфере – смартфоны, компьютеры и телевизоры, отечественные компании оцифровали документооборот и переводят взаимодействие с клиентами, партнёрами и сотрудниками в электронный вид. Это особенно актуально, когда в технологических операциях люди участвуют удалённо, что требует корректного подтверждения личности. Такое стало возможным с совершенствованием систем видеоаналитики на алгоритмах распознавания различных образов «в кадре» камеры с помощью технологий машинного

обучения и искусственного интеллекта (ИИ). При внедрении технологий компьютерного зрения в системах видеоаналитики разработчики стремятся к неоригинальному подходу на основе центра обработки данных (ЦОД) – сбора, хранения и обработки «сырых», необработанных видеоданных, поставляемых по каналам связи несколькими видеокameraми, в том числе совмещёнными в одном корпусе «сканера»; таким образом обеспечивается высокая скорость сканирования и минимизация ошибки считывания в потоке данных в движении (документа или детали). В табл. 1 приведены некоторые сравнительные характеристики централизованной и децентрализованной систем видеоаналитики [3].

Компьютерное распознавание образов обеспечивает идентификацию объекта (документа, детали, человека,

номерного знака автомобиля и др.) и при необходимости последующую верификацию для фиксации процесса обработки детали (заготовки), присвоения штрих-кода, контроля качества. Такие же широкие перспективы идентификация и контроль имеют в документообороте производства, когда требуется идентифицировать сертификаты и документацию разных моделей и элементов конструкции. На рис. 1 представлена модель устройства видеоидентификации с несколькими камерами разного функционала и назначения.

В работе с людьми автоматизация контроля доступа направлена на комплексный контроль и борьбу с возможными подделками документов или мошенничеством. С одной стороны, автоматизация обеспечивает быструю идентификацию именно удалённого доступа к управлению производством и его элементами. С другой стороны, позволяет усовершенствовать до новейших версий системы потоковой верификации документов Smart ID Engine. Такой софт, например, установлен для автоматизированных пропускных пунктов аэропорта «Шереметьево-2»: достаточно приложить к считывателю (на расстоянии до 10 см) паспорт всего на 0,15 секунды, и система, сверяя дан-

Таблица. 1. Некоторые сравнительные характеристики централизованной и децентрализованной систем видеоаналитики

Система видеоаналитики	Централизованная (Cloud)	Децентрализованная (Edge)
Инфраструктура	Простая камера (камеры) + ЦОД	Простая камера (камеры) + сервер рядом с камерами
Требования к каналам связи	Высокая пропускная способность. Высокие требования к стабильности и качеству	Невысокие требования к постоянному присутствию онлайн. Задержки и своевременность доставки контента не критичны
Устойчивость к сбоям каналов связи	Риски потери данных при сбое канала связи	Некритично к сбоям канала связи. Допустимо кэширование данных на периферийном сервере
Стоимость ЦОД. Аренда ОРЕХ	Аренда более дорогих серверов	Аренда простых серверов CAPEX, покупка оборудования к камерам
Управляемость	Простая. Централизованный провайдер ЦОД	Необходимы квалифицированная настройка и поддержка периферийных компонентов



Рис. 1. Устройство комплексной видеоидентификации



Рис. 2. Досмотровая зона аэропорта Шереметьево-2



Рис. 3. Трёхдиапазонный ИК-сканер документов модели ПС4-02



Рис. 4. Рабочее место оператора контроля системы пропуска

ные на сервере с электронным билетом, принимает решение о пропуске в соответствующую зону. Полный цикл распознавания документации в видеопотоке, начиная от показа камере и заканчивая получением результата, в пределах 0,75–1 с [1]. Благодаря комплексному сканированию с применением в том числе ИК-датчиков система обеспечивает надёжную работу почти в любых условиях, даже при недостаточном освещении и значительном запылении (на производстве). Там же, в Шереметьево, в апреле 2023 года ввели в эксплуатацию автоматизированную систему управления предприятием EAM компании IBS на базе «1С:ERP», обеспечивающую эксплуатацию специального транспорта и оборудования. А также действует PAC – аппаратно-программный комплекс,



Рис. 5. Схема работы автоматизированной системы безопасности на основе видеоидентификации граждан и документов

разработанный для служб обеспечения авиационной безопасности в аэропортах и предназначенный для автоматизации и упрощения обязательных процедур регистрации пассажиров и их багажа. PAC позволяет пассажирам проходить предполётный досмотр по электронному посадочному талону с помощью смартфона или другого устройства и выполняет дополнительные функции. Элементы системы распознавания Smart Engines устойчиво работают в государственных организациях с высокими требованиями к безопасности, а также на производстве, в ритейле и в банковской сфере. На рис. 2 представлена иллюстрация работы системы в аэропорту.

Автоматическая система пропуска с помощью софта распознавания Smart Engines 2.2 представлена трёхдиапазонным сканером документов ПС4-02 с установленным на нём ПО Smart Engines 2.2 (рис. 3).

На рис. 4 представлен вид на рабочее место оператора контроля системы пропуска (внизу – скрины изображений с нескольких видеокamer).

На рис. 5 показана схема работы автоматизированной системы безо-

пасности на основе идентификации граждан и документов.

И третья из важных перспектив. Система автоматизации определения деталей и документов адаптирована под штрих-код и голографическую защиту, и в потоковом (конвейерном) варианте обеспечивает автоматизацию (с последующей маркировкой, удобной для складского учёта и логистического сопровождения товаров) процесса технического контроля качества продукции, а также отслеживания процессов обработки высокотехнологичной детали на всех этапах производства. Очевидно, что для новых потребностей уместно использовать прорывные технологии агрегации (объединение деталей в сборки на производстве). Тогда автоматизация определения детали и документации, маркировки, к примеру, металлов в металлорошковой технологии LB-PBF/SLM или ячеистых структур предполагает топологическую оптимизацию и генеративное проектирование с использованием ИИ. Нередко в таком случае имеют производственный результат сокращения веса изделия от 20 до 60% [5]. Такие уникальные возможности помогают

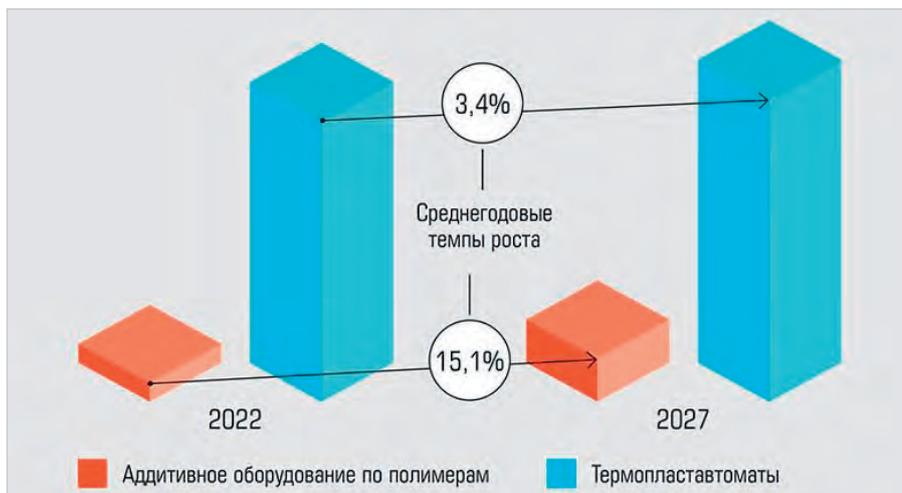


Рис. 6. Перспективы роста рынка полимерных изделий относительно металлопродукции

экономить на производстве 50–100 тыс. руб. в час только в одном технологическом процессе. Усреднённые темпы роста производства по металлам, сплавам и полимерам свидетельствуют о том, что рынок полимерных изделий (в том числе созданных по аддитивным технологиям) самый ёмкий, примерно в 3 раза в денежном выражении превышает рынок технологий изготовления металлопродукции (см. рис. 6).

Лидерами в полимерах являются технологии экструзии FDM/FFF, фотополимеризации в ванне SLA и синтеза на подложке PBF/SLS, причём во всех этих случаях требуется автоматизация процессов с помощью контроля качества изделия на всех этапах производства. В сегменте металлов около 90% рынка приходится на технологии синтеза на подложке LB-PBF (лазеры), EB-PBF (электронный луч) и прямого подвода энергии и материала DED [5]. На рис. 7 представлена иллюстрация детали сложной конфигурации, этапы производственного процесса которой контролировались с помощью системы видеоидентификации.

Показана деталь вентилятора из жаропрочного сплава для печей термообработки АО «Протон-ПМ». Однако по тому же принципу, как скульптор, создавая памятник из металлического сплава, предварительно ваяет ту же модель (прототип) из мягкого состава – глины, гипса, архитектурно-пластилина, перед сложной моделью всегда идёт прототип. Поэтому в соответствии с глобальными трендами технология экструзии полимеров и композитных полимеров FDM/FFF имеет наибольшее распространение. Она относительно давно присутству-

ет на отечественном рынке и предпочитает значительную рентабельность. Популярность этой технологии обусловлена условно низкой стоимостью, относительно простой схмотехникой, невысокой зависимостью от комплектующих двойного назначения, внесённых в санкционные списки. В плюсах также быстрое и доступное прототипирование, создание производственной оснастки без требований к сертификации, производство изделия из широкого ряда термопластов. Технология FDM/FFF является синонимом доступной 3D-печати прочных изделий из пластмасс, композитов и эластомеров, инструментом для вещественного воплощения цифрового проектного замысла [5].

Технология LB-PBF/SLM востребована в авиастроении, космонавтике, медицинской технике, авто- и мотоспорте, военной промышленности, везде, где требуется облегчение веса, агрегация (объединение деталей сборок в одно изделие), минимизация технологических процессов, индивидуализация.

Предустановленное российское ПО для усовершенствования машинного обучения

Для наглядного примера уместно рассмотреть систему идентификации данных Smart ID Engine. Её последняя версия 2.2 является обучаемой с помощью нейросетей. Предыдущие версии Smart ID Engine версий 1.13, 1.12.0 с алгоритмом зрительной памяти, 1.11.0 – внедрена в IDPay для банковских транзакций. Эти версии Smart ID Engine успешно экспортировали,

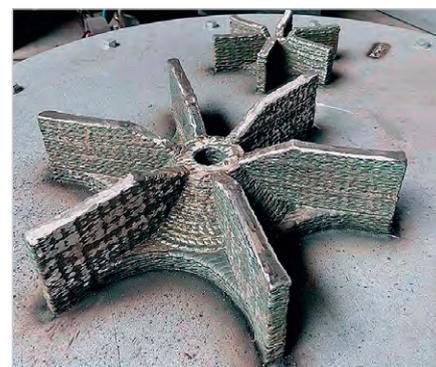


Рис. 7. Деталь сложной конфигурации, создаваемая под контролем системы видеоидентификации производственных процессов

в том числе на рынок США. С учётом текущей геополитической обстановки технология экспортируется в страны Азии, Индокитая и развивающиеся страны африканского континента. Кроме выявления аномалий и расхождений в документации и деталях (в конвейерном варианте) функционал обеспечивает обнаружение синтеза или вмешательства в электронный документооборот. Притом что систему обслуживают, и обновления продукта выходят с регулярностью 1 раз в 2-3 месяца, обеспечивается безопасность и автономность предприятия-клиента. ПО является интеллектуальной собственностью фирмы, а это обеспечивает не только высочайшую безопасность, но и повторяемость результатов, а также поддержку платформенных решений [1].

Поддержка мультиплатформенных решений

Проблема ложных срабатываний систем идентификации и безопасности – одна из ключевых для корпоративной информатизации на производстве. Специалисты фронт-менеджмента и расследователи компьютерных преступлений (форензики) знают об этом, а потому предъявляют высокие требования к качеству распознавания в документообороте. Потребовалось разработать множество признаков идентификации, позволяющих находить подделки в автоматизированной системе с низким уровнем ложных срабатываний (тревоги, FAR), который в идеальных условиях стремится к 0,1%. Вероятность ложного нераспознавания обозначается FRR. Оба показателя в идеале должны стремиться к нулю. К примеру, на страни-

цах паспорта гражданина России идентификационных признаков чуть менее 100, а система идентификации в документообороте Smart ID Engine 2.2 «научена» распознавать с видеокamer с высоким разрешением до тысячи признаков и без дополнительного «специального» оборудования – прерогативы специальных служб и правоохранительных органов. Совокупность механизмов защиты Optical Variable Devices основана на корректной идентификации документации (даже в движении, потоке) с поправкой на изменение цвета и (или) изображения в зависимости от угла зрения или угла освещения. Такие эффекты можно наблюдать, если изменять угол наклона документа перед глазами, в частности, акцентировав внимание на голограмме (элемент голографической защиты), а теперь и в видеопотоке не только для документации и сертификатов Росстандарта, но и некоторых европейских и китайских документов. Всего система может распознать информацию на 102 языках. Функции Optical Variable Devices четырёхмерны – согласованы в пространстве и времени. Это условно новый шаг в технологии распознавания технической документации в потоке.

Система распознавания ID-документов не хранит данные документооборота. Используемые алгоритмы машинного обучения развиваются на синтетических данных, поэтому риски минимальны. Максимум, на что может рассчитывать взломщик, – синтетические данные, не позволяющие идентифицировать реальные сведения и лиц. Основная программная библиотека Smart ID Engine 2.2 автономна и при работе системы в полностью автоматическом режиме исключает риски утечки персональных данных. Библиотека адаптирована под производственные серверы и встраивается в них, а также в мобильные приложения, причём производитель системы после её внедрения на производстве связи с ней не поддерживает (накопленные данные недоступны). Не используются сторонние библиотеки: ни математические, ни нейросетевые. Отсутствие open-source ПО гарантирует, что Smart ID Engine 2.2 – технологически независимый продукт с высокой скоростью работы нейронных моделей и сверхкомпактной архитектурой (объём софта относительно мал) [1].



Рис. 8. Вид на производственную линию с контролем системы потоковой видеоидентификации

Нанотехнологии родом из древности

Из истории нанотехнологий известно про кубок Ликурга – чашу, изготовленную в IV веке н. э., предположительно в Александрии. Уникальное свойство кубка таково: в зависимости от угла падения света меняется его видимая окраска. Если источник освещения (естественного или искусственного) спереди объекта, его цвет становится зелёным, если позади – кубок окрашивается в насыщенно-алый колер [2]. Над разгадкой тайны учёные мужи бились с 1950-х годов XX века, с тех пор как чашу приобрёл Британский музей. И только в 1990 году исследователи закончили изучать мелкие фрагменты под сильнейшим микроскопом и предложили выводы. Оказывается, «стеклянный материал» с особыми свойствами, из которого отлита чаша, насыщен наночастицами золота и серебра. Размер частиц меньше 1/1000 кристалла поваренной соли «Помол № 1». Такая ювелирная работа за случайность сойти не может. После публикации результатов исследования возникло ещё больше вопросов, но уже иного свойства: имели ли древние творцы кубка Ликурга представление о нанотехнологиях за столетия до появления самого термина. При облучении такого материала ИК-волнами фиксируются ещё более интересные эффекты изменения гаммы. Примерно по тем же принципам создана современная система верификации документов и сертификатов с голографической защитой. Избыточно говорить о том, что система идентификации документации в потоке, доступная для современного производственного процесса (предприятий

и организаций), экономит время, людские ресурсы и бюджет.

Автоматизация верификации и защиты документации

Система Smart ID Engine 2.2 не предполагает дополнительной ручной верификации, что делает её полностью адаптированной как инструмент автоматизации производства. Решение для автоматического распознавания документов является настраиваемым до такой степени, чтобы полностью исключить человеческий фактор, когда человек не может ввести данные, даже если нужно исправить ошибку. Эту опцию можно регулировать, но в активном состоянии это ещё один элемент защиты данных от несанкционированного вмешательства. С появлением системы потокового видеоконтроля документации и производственной линии можно забыть про ручной ввод информации оператором. Видеоаналитика на производстве на основе нейронной сети SVC даёт возможность контролировать любые производственные процессы с помощью нескольких видеокamer, установленных в разных местах, или с помощью мультикамер, пример которых представлен на рис. 1. Автоматизация соответствующего контроля с помощью видеоаналитики позволяет обеспечить безопасность производства и использовать оборудование максимально эффективно. На рис. 8 представлена иллюстрация системы, внедрённой на производственной линии отгрузки отходов производства пивоваренной компании «Балтика».

Помимо крупного размера объектов, более критичным фактором являются



Рис. 9. Производственный контроль сборочного цеха самолётов с помощью видеоидентификации

высокие требования к применяемому оборудованию: процессы на производствах преимущественно взрывоопасные и технологически закрытые (в трубах, внутри оборудования), где визуальных точек контроля не очень много, а значит, предъявляются высокие требования безопасности как к системам, так и к алгоритмам. Дополнительно оказывает влияние разброс возраста используемого оборудования, который может сильно варьироваться от самого современного с умными системами управления до установок ещё советского производства, не предусматривающих встроенных сенсоров. Эти факторы делают очевидной необходимость автоматического анализа видеопотока с камер для снижения нагрузки на оператора и возможности удалённого контроля за производством. На рис. 9 представлен вид производственного контроля сборочного цеха самолётов.

На сервере, адаптированном к 32-ядерным процессорам, в том числе отечественного производства «Эльбрус» и «Комдив», может распознаваться 50–60 документов в секунду, то есть 3000 в минуту, или 180 тыс. в час. Исходя из этого, система Smart ID Engine за счёт параллельной обработки потока на нескольких серверах имеет значительный ресурс актуальности в производственной сфере на несколько лет вперёд. А уж если говорить об оптимизации, тут перспектив ещё больше. На рынке современных технологий это решение премиум-уровня высокого качества распознавания, скорости, минимизации ошибок, обеспечивающее уровень безопасности согласно вызовам времени. Тем не менее после Smart ID Engine 2.2 разрабатываются следующие версии. В задачах совершенствования продукта существенно повысить качество распознавания документов с разработкой новых методов анализа изображений и видеопотоков. Это вполне в форма-



Рис. 10. Структурная схема автоматической системы корпоративной связи

те методики «перехватывающих серверов»: в непосредственной близости от сканеров потокового (конвейерного) типа камер видеонаблюдения устанавливаются многоядерная система серверных процессоров класса Intel Xeon.

Автоматизированная корпоративная связь на территории компании

Ещё одним из многих факторов автоматизации производственного процесса является усовершенствованная корпоративная видеосвязь. Темы IP-телефонии и унифицированных коммуникаций (Unified Communication – UC) некорректно назвать инновационными. Особенно теперь, когда лидеры рынка сетевых технологий ушли с российского рынка. Тем не менее есть примеры и решения, которые работают и совершенствуются. К примеру, решения китайской компании Yeastar. Практические решения автоматизированной коммуникации реализованы, в частности, в пивоваренной компании «Балтика». Причём в формате нескольких независимых корпоративных сетей охватывают не только менеджмент, но и логистику на заводах компании (несколько), вплоть до каждого водителя транспортной системы доставки и обеспечения административной деятельности подразделений [4].

На рис. 10 представлена структурная схема автоматической системы корпоративной связи, принятой в ПК «Балтика».

ИТ-системы мониторинга состояния водителя грузового автомобиля на примере службы доставки пивоваренной компании «Балтика» с обязательным созданием цифрового профиля сотрудника помогают снизить аварийность на дорогах. Разумеется, мы рассматриваем только один вариант – на примере службы логистики; в реалии примеров много, они не ограничены ничем, кроме как задачами и возможностя-

ми руководителя компании, завода или структурного подразделения. Так решаются проблемы «кадрового голода», подбора сотрудников по высокому уровню профессиональных компетенций, что косвенно ведёт к повышению престижности профессии. Такие же системы корпоративной связи работают в каждом структурном подразделении с возможностью автоматической коммуникации с диспетчером и другими производственными отделами. Всё это позволяет позиционировать систему ИТ-связи не только как элемент автоматизации производства, но и как фактор усовершенствования профессиональной коммуникации.

Корпоративная автоматизированная система связи хорошо зарекомендовала себя в двух ипостасях. Во-первых, обеспечена прямая связь с каждым участником процесса, даже на значительном удалении от предприятия (во время процесса доставки продукции), что позволяет оперативно внести необходимые коррективы в работу: изменить точку, адрес и время доставки, характеристики продукции (количество, ассортимент) и др. С другой стороны, система ИТ-видеосвязи обеспечивает контроль каждого сотрудника «нижнего звена» в любое время и почти в любом месте, где доступна сотовая связь. Этот контроль хорошо зарекомендовал себя в части обеспечения безопасности движения, мониторинга личного состояния водителя, отклонения от маршрута и иных популярных злоупотреблений (несанкционированный слив топлива, саботированный «простой», прочие особенности, связываемые с человеческим фактором). Наличие такой системы дисциплинирует работников, а обратная связь с их стороны позволяет установить и оперативно решить проблемные вопросы, не зависящие от работника, как-то: отказ заказчика принять продукцию на точке

и иные спорные случаи. А также уточнить дорожную обстановку и выбрать наиболее оптимальный маршрут с минимумом затраченного времени. Дисциплина сотрудников достигается уже наличием самой корпоративной системы и вовлечённости в неё работника. Зная свою подконтрольность, люди стараются не нарушать трудовые обязанности по договору с работодателем. В конкретике и со стороны технических характеристик разберём программно-аппаратные свойства корпоративной системы связи.

Программно-аппаратные помощники

Инженерные решения в системе US предусматривают заранее проработанные механизмы интеграции:

- с CRM (к примеру, Salesforce, Bitrix24, Microsoft Dynamic и др.);
- с системами HelpDesk (ZenDesk, Zoho Desk);
- со службами каталогов (Microsoft Azure AD, Windows Active Directory).

Кастомная интеграция тоже возможна за счёт API-интерфейса на основе продуктов Enterprise и Ultimate. Помимо интеграции с программными системами, предусматривают сопряжение с гарнитурами Jabra, Yealink, EPOS, Poly. А при подключении к системе IP-телефонов автоматическое конфигурирование с системами Yealink, Fanvil, Gigaset, Snom, Avaya, Cisco. Ставшие уже стандартными функции цифровой телефонии (администрирование, маршрутизация и мониторинг вызовов, IVR, быстрый набор или набор по имени и др.) добавляются функционалом из категории Unified Communications – видеозвонков по принципу «точка-точка» посредством протокола WebRTC, а также видеоконференции с множественными подключениями. Стабильность и безопасность решений обеспечивается в соответствии с международным сертификатом ISO 27001 обеспечения механизмов безопасного информационного менеджмента за счёт следующих подходов:

- работа в режиме резервирования канала с синхронизацией в реальном времени;
- шифрование голосового трафика;
- многоуровневая защита – фаерволы, блокировка по IP-адресу и двухфакторная идентификация.

Клиентская часть является развитым интерфейсом унифицирован-

ных коммуникаций и представлена решением Yeastar Linkus UC Clients. Может функционировать через браузер и (вариативно) посредством десктоп- или мобильного приложения в совокупности с P-Series PBX System; так обеспечиваются все возможности коммуникаций, традиционно ассоциируемых с UC. Среди них почтовые сообщения в формате текстового мессенджинга с возможностью обозначения статуса каждого участника, телефония (традиционная, мобильная и VoIP), голосовая почта, разделяемые экраны и интерактивные экранные панели (white boards), аудио- и видеоконференции, календари, планировщики и другие инструменты, относящиеся к персональным электронным ассистентам. В корпоративной телефонии базовым коммуникационным протоколом для UC-решений (Yeastar P-Series PBX System) является VoIP, а остальные стандарты связи являются «чуждыми». Чтобы, будучи включёнными в корпоративную UC-систему, пользователи могли иметь возможность совместить (интегрироваться) работу с традиционными аналоговыми телефонами и сотовыми телефонами сотрудников, предусмотрено прямое и обратное преобразование одного из стандартов связи в VoIP-трафик и обратно. Каждый сотрудник с телефоном, включённым в сеть in corpore, работает как с новыми стандартами, так и с цифровым стандартом ISDN. Из аппаратных решений Yeastar VoIP Gateway for Business и Yeastar Central Management – единая панель управления IP-АТС и шлюзами и функции облачных решений в формате UCaaS.

Особенности P-Series PBX System

UC трактуется как зонтичная концепция с набором компонентов, в совокупности обеспечивающая интегрированные между собой электронные коммуникации разных форматов (аудио, видео, текст) между коллективами сотрудников (пользователей), имеющих любые оконечные устройства (от телефона, до ПК), любые каналы связи и находящихся в произвольных точках земного шара. Такую систему можно собирать, как конструктор, из разных частей, но для лучшей адаптации рекомендуется применять элементы одного производителя, специализирующегося на конкретных ИТ-системах. Реше-

ния компании Yeastar серии P-Series PBX System поставляются в трёх вариантах: Appliance Edition (в виде аппаратной платформы), Software Edition (в виде программной реализации), Cloud Edition (в виде облачного решения). Преимущество первого очевидно – гарантированное быстродействие и надёжность функционирования, достигаемые единством программно-аппаратной платформы одного поставщика. Базовый продукт, реализуемый в классической для телекоммуникационных решений форме. В линейке Yeastar обеспечивает экономичное UC-решение для SMB, ориентированное на компании сотрудников до 500 человек. ПО Software Edition может работать как в классической инсталляции поверх ОС корпоративного сервера, так и в виртуальных средах на базе наиболее популярных гипервизоров – VMWare, Hyper-V и KVM. Ёмкость возможностей зависит от производительности платформы и может достигать 10 000 пользователей. Software Edition (несмотря на P-Series PBX System Cloud Edition) запускается в облаке как на физических, так и на виртуальных условиях. Редакция ПО Cloud Edition ориентирована на размещение исключительно в облачной среде и связана с сервисной моделью предоставления ИТ-услуг – в конкретном случае модели Unified Communication as a Service (UCaaS) [6]. Модель as a Service нередко путают с деятельностью профессиональных провайдеров, продающих сервис сторонним клиентам и тарифицирующих его в соответствии с условной единицей потреблённых клиентом услуг. Однако та же модель работает в крупной компании с несколькими филиалами и большим количеством структурных подразделений – что мы показали на примере выше.

Ввиду многообразия эффективного применения сегмент UCaaS демонстрирует впечатляющий рост даже на фоне динамичного рынка унифицированных коммуникаций. Известны четыре апробированных и прикладных решения с конкретным набором функций: Basic и Standard (оба – только для Appliance Edition), Enterprise и Ultimate.

Среди решённых задач организация call-центра или набора функций, обеспечивающих возможности централизованного управления большим количеством телефонных коммуникаций посредством стандартных прикладных



Рис. 11. Иллюстрация взаимодействия сотрудника и диспетчера в условиях корпоративной связи

и мониторинговых функций, характерных для продуктов данного класса. Другое преимущество – службы удалённого доступа (Remote Access Service) и удалённого SIP (Remote SIP Service) позволяют организовать взаимодействие с сотрудниками так, как будто пользователи находятся в офисе, в том числе подключить любое из имеющихся коммуникативных устройств с поддержкой SIP к центральной офисной системе связи, независимо от местоположения его обладателя, а также множество удалённых офисов компании, если бизнес имеет такую задачу (рис. 11).

Актуальные тренды ИТ в области корпоративной и автоматизированной связи в сегменте перевозок имеют и перспективы, и особенности. Основываясь на рассмотренном примере, можно рекомендовать системы корпоративной ИТ-связи коммерческим и государственным перевозчикам в разных направлениях – от автомобильного транспорта и такси до авиаперевозок и авиатакси, которое в скором будущем станет реальностью. Бортовая система видеоаналитики используется для подсчёта пассажиров автобуса, оценки числа проданных билетов, сбора статистики по загруженности маршрута на различных отрезках пути и в разное время суток. Помогает производить мониторинг поведения водителя, к примеру, детектировать попытки закурить или разговаривать по телефону за рулём [3], [4]. Обработка данных с видеокamer транспортного средства осуществляется бортовым

компьютером из семейства Intel NUC. На рис. 12 представлена одна из подходящих моделей VPC-3350S производства AAEON.

Доступны варианты системы с процессорами Intel Atom, Celeron и Core, с интегрированной графикой HD Graphics и аппаратным ускорением для обработки видеопотоков. Бортовой компьютер имеет порты LAN для ИТ-видеокamer и устойчив в работе в диапазоне температур $-20...+70^{\circ}\text{C}$. Комплектуется модулем сотовой связи Cat 4 LTE с интегрированным приёмником GPS/ГЛОНАСС или USB-сопроцессором Intel Myriad X на базе вычислительных модулей Movidius для ускорения работы нейросетей.

Выводы

В условиях влияния автоматизации производственного процесса на занятость, включая возможное исчезновение определённых профессий и появление новых рабочих мест, связанных с ИИ и автоматизацией производства, обозначились новые тенденции. Проблемы и вызовы времени связаны с внедрением искусственного интеллекта и автоматизации. Это не потерявшие актуальность вопросы безопасности, этики, управления и регулирования производственных процессов. Разработчики РЭА и менеджеры на производстве задают резонный вопрос: как вести среднесрочное и долгосрочное бизнес-планирование в условиях турбулентности, когда «ничего не понятно» и обстоятельства меняются буквально на глазах?



Рис. 12. Внешний вид бортового компьютера VPC-3350S производства AAEON

С наступлением эры сотовых сетей пятого поколения (5G), помимо высоких скоростей, открылись и новые возможности видеоаналитики, отличающиеся малыми задержками и надёжностью в передаче данных и сигналов даже в местах скопления большого числа абонентов или датчиков. Список поддерживаемых ими спецификаций постоянно растёт. При контроле продукции в конвейерном варианте производства будущее за системами со множественным доступом Multi-Access Edge Computing, когда ресурсы (серверы) хранения данных располагаются близко к операторам (пользователям).

Интересно сегодня проанализировать прогнозы специалистов на 2023–2024 годы, опубликованные несколько лет назад, в частности в [6]. «Ожидается, что к 2023 г. до 80% инвестиций, вложенных в изменение бизнес-моделей в большинстве отраслей, будет направлено на периферийно-ориентированные вычисления. В свою очередь, вопросы обеспечения инфраструктуры, доставки приложений и данных на периферию станут стимулом для внедрения новых периферийных и сетевых облачных решений, которые, в свою очередь, послужат основой для дальнейшего масштабирования и повышения устойчивости бизнеса». А согласно другому прогнозу того же источника, «...уже к 2029 г. корпоративные инфраструктуры будут работать с более чем 15 млрд камер, сенсоров и других IoT-датчиков». Тенденция понятна, и она подтверждается. Применение ИИ в различных отраслях промышленности с неперенным развитием киберфизических систем, Интернета вещей и создание автономных роботов для обеспечения производственного цикла – уже реальность. ИИ используется в производстве, управлении, логистике и других аспектах различных отраслей. Примерами могут быть использование ИИ для оптимизации производственных

процессов, улучшения качества продукции, снижения затрат и повышения производительности, что является важным экономическим фактором.

Литература:

1. Арлазаров В. Smart Engines: Проблема подделки документов стоит все острее // URL: https://www.cnews.ru/articles/2023-12-06_vladimir_arlazarovsmart_engines_problema?erid=2SDnjcVvQpx.
2. Изобретения инженеров древности // URL: <https://www.weekly-news.info/>
3. Слинько В., Мяков А. Два подхода к оснащению производства системами компьютерного зрения. Control Engineering // URL: <https://controleng.ru/tehnickoe-zrenie/dva-podhoda/>.
4. Суомалайнен А. Автоматизация производственных операций и линий.
5. Трубаевский Д. Аддитивные технологии в России: быстрая эволюция 2022–2023 годов // URL: <https://monocle.ru/monocle/2023/02/additivnyye-tehnologii-v-rossii-bystraya-evolyutsiya-20222023-godov/>.
6. Электронные коммуникации в одном флаконе. Обзор P-Series PBX System // URL: <https://www.tadviser.ru/a/741512>. 

НОВОСТИ МИРА

Преподавателей в МИФИ заменят на ИИ

Команда разработчиков, костяк которой составляют студенты НИЯУ МИФИ, создала систему искусственного интеллекта, способную помогать педагогам, проверяя ответы школьников, сообщили представители НИЯУ МИФИ.

Искусственный интеллект способен проверять и анализировать ответы учеников, при этом в настоящее время он ориентирован на проверку письменных ответов

школьников на олимпиадах по гуманитарным предметам – таким как естественные науки, экономика и право. Электронная система не только выставляет баллы за проверенные работы, но и генерирует аналитику ответа, которая позволяет ученикам узнать, что именно им надо подучить и в чём именно они ошиблись. Свои собственные знания об истории, общественности и экономике ИИ черпает из Интернета.

Если в своём ответе ученик приводит нерелевантные аргументы, ссылаясь на не-

корректные источники, например, из мировой истории, то искусственный интеллект не только укажет на ошибку, но ещё и скажет, что почитать и какие относящиеся к делу кейсы можно найти в Интернете, чтобы лучше понять тему.

Разработанный в НИЯУ МИФИ продукт уже использовался для проверки работ школьников на региональном этапе Всероссийской олимпиады школьников по общественным наукам на базе онлайн-школы «Общее дело».

russianelectronics.ru

CviLux Corporation

Type C Разъем для быстрой зарядки

Ток до 5А
максимально быстрая подзарядка аккумулятора

SMT 6 pin
вертикальный разъем

Более 10 000
циклов замыканий/размыканий

- Передача данных и мощности через один разъем
- Поддерживает USB 2.0, USB 3.1 gen 1 и USB 3.1 gen 2
- Пропускная способность до 100W при 20V
- Рабочая температура: -40 до +80°C

Применение:

- Широко используется для подзарядки устройств в бытовом применении
 - Зарядные док-станции
 - Подзарядка устройств в промышленных применениях
-
- Материал корпуса: LCP UL-94V-0
 - Покрытие корпуса: нержавеющая сталь



PROCHIP
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТ

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

energy

Точность и стабильность инерциальных датчиков КТР

Александр Бекмачев

Этой статьёй мы продолжаем серию публикаций об инерциальных датчиках, поставляемых в РФ под торговой маркой КТР. Вниманию читателя предлагается анализ протоколов заводских приёмочных испытаний серийных партий продукции. Установлены реально достижимые показатели точности и стабильности МЭМС гироскопов и акселерометров. Приведённая информация будет полезна разработчикам инерциальных навигационных систем и систем стабилизации при выборе перспективной ЭКБ.

В условиях временного дефицита отечественных инерциальных датчиков потребители проявляют вполне обоснованную настороженность при выборе замен, особенно при рассмотрении новых брендов или иностранных производителей с корнями в Юго-Восточной Азии. Переход на иную компонентную базу, в первую очередь, связан с необходимостью адаптации схемотехники и ПО, поскольку не всегда удаётся замена Pin-to-Pin или Drop-In. Другой препятствующий фактор – это предубеждение по отношению к «восточным» товарам, перенесённое с продукции лёгкой промышленности и «ширпотреба». Свою роль сыграл и ранний негативный опыт применения ЭКБ «Made in China», ори-

ентированной на бытовую электронику низшего ценового диапазона.

Таким образом, новому бренду на рынке требуется преодолеть предубеждение и завоевать доверие, подтвердив фактическое соответствие характеристик продукции тем параметрам, которые заявлены в ТУ, и показать повторяемость этих характеристик от партии к партии.

Эффективным способом преодоления недоверия является организация сравнительных испытаний, когда потребитель вместе с образцами продукции получает протокол и методику приёмочных испытаний от производителя. Результатом «доказательной эксплуатации» являются объективные основания для принятия решения об уровне техники ЭКБ, предлагаемой к внедрению. Дополнительными факторами формирования непредвзятого отношения к новому бренду становятся «истории успеха» – публично доступные данные об использовании компонентов в проектах и изделиях других потребителей, а также возможность получения расширенной статистики за счёт анализа характеристик компонентов из других производственных партий, которые значительно разнесены по дате выпуска.

Опыт показывает, что методики испытаний инерциальных датчиков,

принятые у зарубежного производителя, далеко не всегда полностью совпадают с режимами и циклограммами эксплуатации у потребителя в РФ. То же касается и терминологии, описывающей ключевые параметры компонентов. Объём и состав предоставляемой зарубежным производителем документации, обычно это Datasheet (краткие ТУ) и User Manual (руководство пользователя), также не всегда отвечают ожиданиям потребителя. Эти документы зачастую содержат долю рекламы и «мелкого шрифта»: информации, требующей уточнения. В такой ситуации важно иметь прямой контакт со службой технической поддержки производителя или его официального представителя в РФ для получения консультаций, разъяснений, технического сопровождения, адаптации к условиям эксплуатации или даже заказа специальных версий стандартных изделий.

В качестве демонстрации читателю предлагается оценить информацию, доступную для первичного анализа при выборе зарубежных инерциальных датчиков, на реальных примерах.

В нашем распоряжении имеется репрезентативная выборка: набор верифицированных данных для двух типов инерциальных датчиков, поставляемых в РФ под брендом КТР.

Это протоколы заводских приёмочных испытаний одноосных МЭМС гироскопов Н111-300, 4 партии 2023 года выпуска, от 3 до 80 шт. в партии, всего 150 шт.

Второй блок информации – протоколы приёмочных испытаний 6-компонентных инерциальных МЭМС модулей М301 (3 гироскопа + 3 акселерометра), 5 партий 2023 года выпуска, от 13 до 34 шт. в партии, всего 100 шт.

Отправной точкой для анализа являются краткие ТУ и методика испытаний, полученная от производителя для части параметров. В упомянутых выше протоколах содержатся не все данные из кратких ТУ, а только те, которые производитель считает необходимым контролировать. Остальные параметры обеспечиваются технологией и подтверждаются периодическими испытаниями, так называемой «квалификацией производства», или же

Таблица 1. Основные характеристики гироскопа Н111-300

Параметр	Ед. изм.	Значение
Диапазон измерений	°/с	±300
Смещение нуля / Начальное смещение нуля	°/с	-0,5...0,5
Кратковременная стабильность смещения (нулевого сигнала), 1σ	°/ч	10
Случайный угловой уход / Блуждание угла	°/√ч	≤ 0,2
Масштабный коэффициент (МК)	LSB / (°/с)	10 000±500
Погрешность масштабного коэффициента (МК) / Нелинейность передаточной характеристики	% от МК	≤ 0,1
Разрешающая способность	°/с	0,005
Порог чувствительности	°/с	0,005
Полоса пропускания (-3 дБ)	Гц	120
Диапазон рабочих температур	°С	-40...+85
Стойкость к ударам	g	2000
Напряжение питания	В	5,0±0,1
Потребляемая мощность	мВт	≤ 150
Интерфейс	-	SPI
Размеры корпуса	мм	24×20×10,2



Рис. 1. Внешний вид гироскопа Н111-300



Рис. 2. Смещение нуля гироскопа

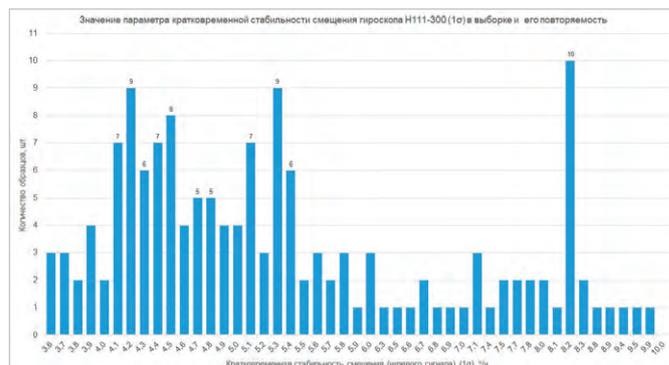


Рис. 3. Кратковременная стабильность смещения гироскопа

обеспечиваются на этапе заводской калибровки в диапазоне рабочих температур. По запросу потребитель имеет возможность получить расширенный отчёт – Test Report – о результатах, полученных в ходе производства или дополнительного тестирования.

Анализ фактических показателей высокостабильных одноосных МЭМС гироскопов H111-300 в прочном корпусе

В кратких ТУ на гироскоп H111-30 (рис. 1) нормируются величины

7 параметров точности и стабильности (табл. 1). Мы ограничимся анализом только части из них.

Смещение нуля

При заданном диапазоне $-0,5...0,5^\circ/\text{с}$ фактические значения параметра не выходят за пределы $-0,094...0,096^\circ/\text{с}$, а большая часть измеренных значений находится в диапазоне $-0,01...0,01^\circ/\text{с}$ (рис. 2).

Кратковременная стабильность смещения (нулевого сигнала)

Как видно из рис. 3, ни в одном из исследованных гироскопов параметр не превысил значения $10^\circ/\text{ч}$ в интер-

вале 1σ , а лучший показатель нулевого сигнала составил $3,6^\circ/\text{ч}$ (1σ).

Случайный угловой уход, или блуждание угла

Среди полученных измерений нет ни одного, которое достигало бы или превышало бы верхний порог в $0,2^\circ/\sqrt{\text{ч}}$, при этом максимальное количество отсчётов сосредоточено у нижней границы выборки в $0,15^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ (рис. 4).

Масштабный коэффициент (МК)

Значения измеренного МК формируют плотную группу вблизи

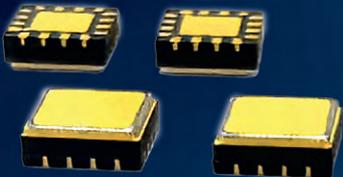


ЭЛЕКТРОННАЯ КОМПАНИЯ
Фаворит-ЭК

“Фаворит-ЭК” рекомендует:

СОХРАНЯЙТЕ ВЕРНЫЙ КУРС!

акселерометры, гироскопы,
инерциальные навигационные модули





Реклама

ООО “Фаворит-ЭК”
www.favorit-ec.ru / +7 (495) 627-76-24 / info@favorit-ec.ru



Рис. 4. Случайный угловой уход (блуждание угла) гироскопа



Рис. 5. Масштабный коэффициент гироскопа



Рис. 6. Погрешность масштабного коэффициента гироскопа



Рис. 7. Внешний вид модуля M301

Таблица 2. Основные характеристики модуля M301

Параметр	Ед. изм.	Значение
Гироскопы		
Диапазон измерений	°/с	±450
Дрейф нуля на температурном диапазоне / Смещение нулевого сигнала на температурном диапазоне	°/ч	≤ ±100
Стабильность нуля, 1σ	°/ч	≤ 8
Повторяемость смещения нуля, 1σ	°/ч	≤ 5
Погрешность масштабного коэффициента (МК) / Нелинейность передаточной характеристики	ppm	≤ 20
Разрешающая способность	°/с	≤ 0,005
Чувствительность к линейному ускорению	°/с / g	0,005
Акселерометры		
Диапазон измерений	g	±15
Дрейф нуля на температурном диапазоне / Смещение нулевого сигнала на температурном диапазоне	mg	≤ ±2
Стабильность нуля, 1σ	mg	≤ 0,2
Повторяемость смещения нуля, 1σ	mg	≤ 0,2
Погрешность масштабного коэффициента (МК) / Нелинейность передаточной характеристики, ±1g	ppm	≤ 100
Разрешающая способность	mg	1
Общие		
Неортогональность измерительных осей	угл. мин	≤ 10
Полоса пропускания (-3 дБ)	Гц	150 (10...250)
Частота дискретизации	отсчетов/с	1000
Диапазон рабочих температур	°С	-45...+85
Стойкость к ударам	g	≥ 2000
Напряжение питания	В	5,0±0,3
Потребляемая мощность	Вт	≤ 1,5
Интерфейс	-	RS-422
Размеры корпуса	мм	44,8×38,6×20

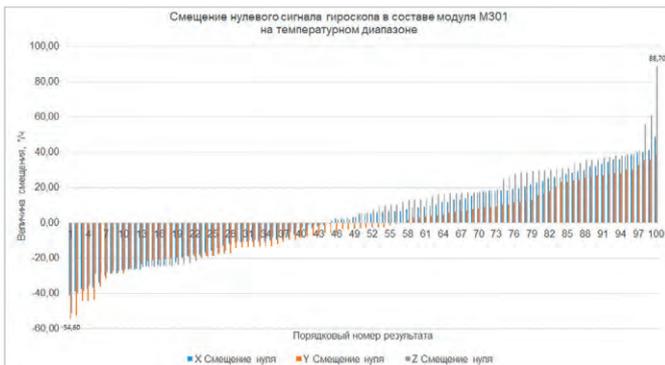


Рис. 8. Смещение нулевого сигнала гироскопа на температурном диапазоне в составе модуля



Рис. 9. Стабильность нуля гироскопа в составе модуля



Рис. 10. Повторяемость смещения нуля гироскопа в составе модуля

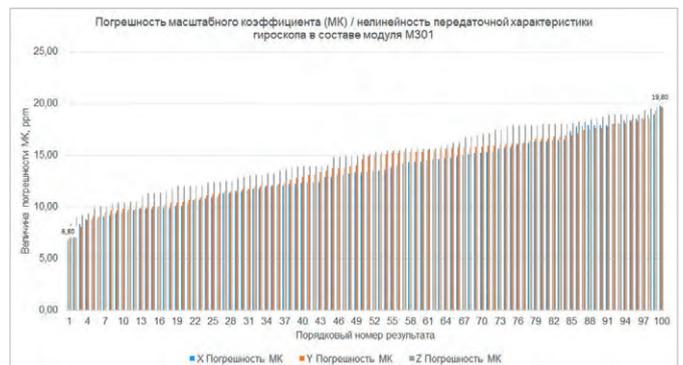


Рис. 11. Погрешность масштабного коэффициента гироскопа в составе модуля



Рис. 12. Чувствительность гироскопа к линейному ускорению в составе модуля



Рис. 13. Смещение нуля акселерометра в составе модуля

номинального значения (рис. 5). Фактическое значение для рассмотренной выборки составляет округленно $10\,004 \pm 50$ LSB/(°/с) при номинально допустимом $10\,000 \pm 500$ LSB/(°/с).

Погрешность масштабного коэффициента (МК), нелинейность передаточной характеристики

В выборке из 150 гироскопов только один прибор продемонстрировал номинальное значение погрешности МК в 0,1%. Остальные значения расположены в диапазоне 0,01...0,079 %, формируя несколько

групп вблизи отметок 0,033%, 0,039% и 0,053% (рис. 6).

Анализ фактических показателей инерциальных МЭМС модулей М301

Каждый модуль линейки М301 содержит 3 гироскопа и 3 акселерометра (рис. 7). В кратких ТУ нормируются величины 9 параметров гироскопов и 8 параметров акселерометров, а также общие для модуля характеристики (табл. 2). В рамках настоящей журнальной статьи рассмотрим только часть параметров, вносимых производителем в протокол заводских испытаний.

Параметры гироскопов в составе модуля М301

Дрейф нуля, или смещение нулевого сигнала гироскопа в пределах рабочего температурного диапазона

Согласно кратким ТУ на модуль, дрейф не должен выходить за пределы $\pm 100^\circ/\text{ч}$. Среди 300 чувствительных элементов (100 модулей, каждый имеет 3 оси) размах измеренных значений составил $-54,6...88,7^\circ/\text{ч}$, что соответствует требованиям (рис. 8).

Стабильность нуля гироскопа

Результаты расчётов значения стабильности нуля представлены в виде



Рис. 14. Стабильность нуля акселерометра в составе модуля

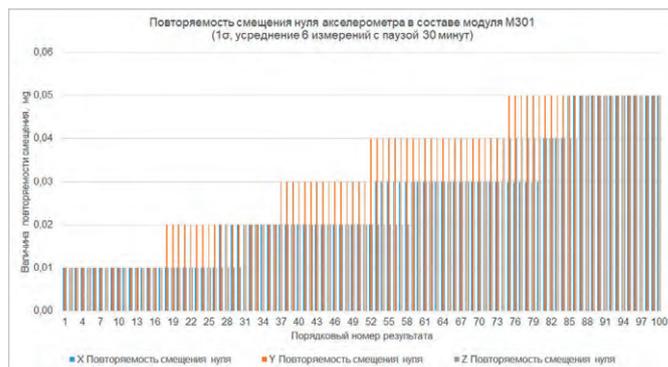


Рис. 15. Повторяемость смещения нуля акселерометра в составе модуля

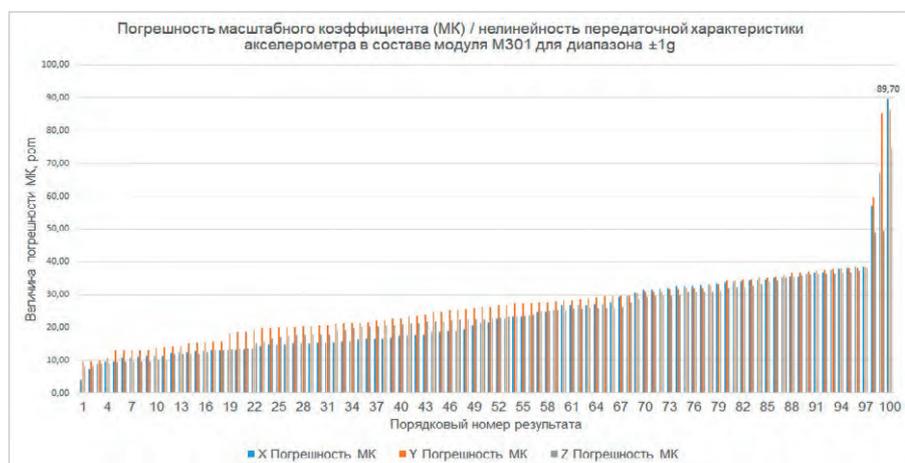


Рис. 16. Погрешность масштабного коэффициента акселерометра в составе модуля

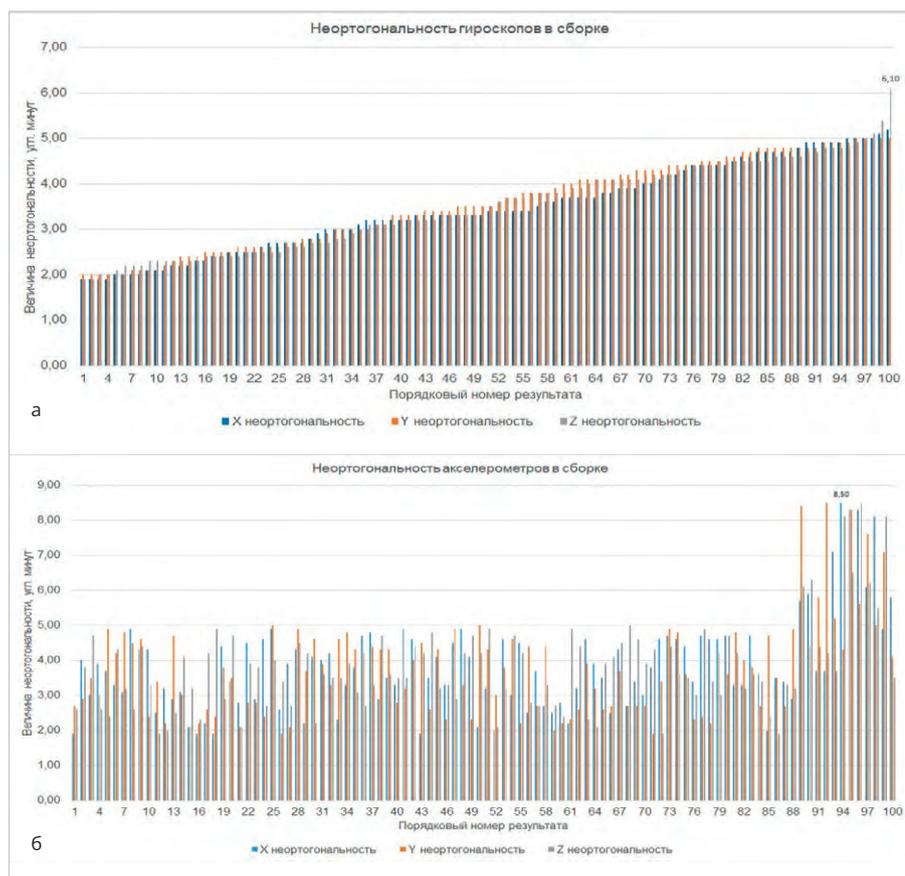


Рис. 17. Неортогональность измерительных осей в составе модуля: а) гироскопы; б) акселерометры

значений доверительных интервалов 1σ , показания датчиков усреднялись за периоды в 10 секунд. При предельно допустимом значении $8^\circ/\text{ч}$ худшее полученное значение составило $6,1^\circ/\text{ч}$, а лучшее – $1,3^\circ/\text{ч}$ (рис. 9).

Повторяемость смещения нуля гироскопа

Расчёт параметра производится на основе средних значений 6 последовательных измерений с паузой 30 минут между записью данных. Ранжирование результатов произведено для значений 1σ . Приблизительно 70% гироскопов показали результат, не превышающий $1^\circ/\text{ч}$, при максимальном значении по всей выборке $3,3^\circ/\text{ч}$. Таким образом, заданный лимит в $5^\circ/\text{ч}$ не превышен (рис. 10).

Погрешность масштабного коэффициента (МК) или нелинейность передаточной характеристики гироскопа

Документация производителя ограничивает погрешность МК значением 20 ppm или 0,002%. Фактические значения для рассмотренной партии составили 6,8...19,8 ppm, т.е. находятся в допустимых пределах (рис. 11).

Чувствительность гироскопа к линейному ускорению

Методика измерения влияния линейной составляющей на показания гироскопа достаточно трудозатратна, так как требует измерения показаний на протяжении 15 с для каждой оси в прямом и обратном вращении. Полученные данные говорят о том, что только приблизительно десятая часть значений группируется у верхнего предела $0,005^\circ/\text{c/g}$, не пересекая его, а подавляющая часть показаний находится в диапазоне $0,002...0,003^\circ/\text{c/g}$ (рис. 12).

Параметры акселерометров в составе модуля М301

Дрейф нуля, или смещение нулевого сигнала акселерометра в пределах рабочего температурного диапазона

Зарегистрированное значение дрейфа в выборке из 300 акселерометров в составе модулей находится в диапазоне $-0,55...0,70$ mg. Это почти вдвое лучший результат, чем того требуют краткие ТУ: ± 2 mg (рис. 13).

Стабильность нуля акселерометра

Методика определения параметра стабильности нуля акселерометра сходна с методикой для гироскопов в составе тех же модулей. Наибольшее значение составило $0,17$ mg (1σ), оно не превышает предельно допустимого $0,2$ mg (1σ) (рис. 14).

Повторяемость смещения нуля акселерометра

Регистрация и расчёт данных производились способом, аналогичным тому, что применялся для гироскопов в составе модуля: усреднение по 6 измерениям с перерывом 30 минут между сеансами записи, сортировка по 1σ . Акселерометры по осям X и Z продемонстрировали исклю-

чительную стабильность, акселерометры по оси Y удельно показали несколько большее смещение, но в любом случае этот показатель ($0,05$ mg, 1σ) вчетверо ниже, чем допускаемый производителем: $0,2$ mg (1σ) (рис. 15).

Погрешность масштабного коэффициента (МК), нелинейность передаточной характеристики акселерометра

Вычислены значения погрешности МК для приложенного к испытываемой оси линейного ускорения в прямой и обратной проекциях по данным, полученным от 300 акселерометров из состава модулей. Результаты преимущественно лежат в диапазоне от 10 до 40 ppm и не превосходят 89,7 ppm при максимально допустимом значении 100 ppm (рис. 16).

Неортогональность измерительных осей чувствительных элементов модуля

Этот параметр определяется преимущественно конструкцией, материалами и технологией сборки модуля. Неортогональность компонентов кла-

стера гироскопов и кластера акселерометров проверяются по единой методике с усреднением показаний за 15 с для каждого чувствительного элемента. Предельное значение параметра одинаково для датчиков угловой скорости и линейного ускорения: не более 10 угловых минут. Фактические показатели не превысили $6,1'$ для сборок гироскопов и $8,5'$ для сборок акселерометров (рис. 17).

Как можно видеть из приведённой статистики, вся продукция укладывается в заявленные допуски либо демонстрирует существенно лучшие показатели точности и стабильности.

Анализ приведённых выше данных не даёт исчерпывающей информации о реальных возможностях и надёжности планируемых к применению датчиков. Следующим этапом, как правило, является тестирование инженерных образцов или пробной партии в условиях, имитирующих реальные режимы работы.

Следует отметить, что однотипная продукция поставляется в РФ на протяжении нескольких лет, демонстрируя при этом достаточно низкий уровень дефектности на этапе эксплуатации в аппаратуре потребителя: не более 1...2% для различных моделей датчиков или блоков датчиков. 

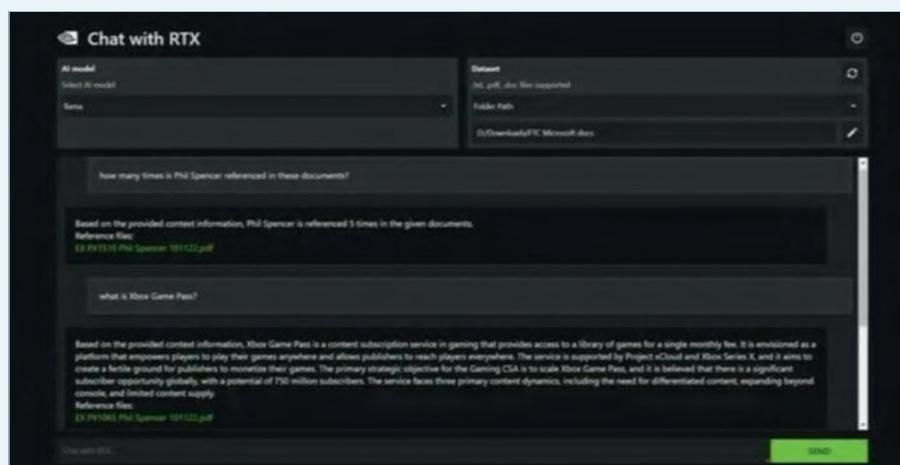
НОВОСТИ МИРА

NVIDIA представила чат-бот без подключения к Интернету – он бесплатный

Новая программа для ПК с видеокарты RTX получила название Chat with RTX.

Она представляет собой аналог ChatGPT, который включает в себя генеративный ИИ на основе большой языковой модели. Программа позволяет запускать одну из доступных языковых моделей – Mistral или Llama 2.

- Chat with RTX не требует выхода в Сеть и, в отличие от ChatGPT и прочих аналогов, запускается на компьютере локально.
- Чат-бот даёт ответы на вопросы при помощи анализа локальных документов, сохранённых на ПК – ему можно выдать доступ к нескольким форматам документов: txt, pdf, doc, docx и xml.
- Более того, он также способен анализировать данные из YouTube-роликов – для этого следует ввести URL-адрес, после чего будет в виде текста отображено краткое содержание видео.
- Для работы чат-бота требуются тензорные ядра RTX – они применяются для ускорения обработки запросов.
- Чтобы использовать Chat with RTX, нужно иметь на компьютере операционную систему Windows



11, не менее 16 ГБ ОЗУ, а также видеокарту линейки RTX 30 или 40 с 8 ГБ видеопамяти.

В The Verge отметили, что программа всё ещё кажется недоработанной, однако она может стать полезной для тех, кто исследует пакеты документов. Chat with RTX действительно удобен в том числе для поиска конкретных деталей в видео, но есть нюансы: например, этот чат-бот не подходит для поиска видео на YouTube. Журналист The Verge попытался найти содержание видео на YouTube, а Chat with

RTX загрузил транскрипт совершенно другого ролика. Это был даже не тот ролик, который запрашивался пользователем ранее, так что в этой ранней демоверсии явно есть ошибки.

В остальном программа работает достаточно шустро, например, журналисту было легко получить релевантный и структурированный набор данных по судебным документам в деле FTC против Microsoft – выполнение этой задачи вручную, по его мнению, казалось непосильным.

industry-hunter.com

На пути к электронному обонянию. Обзор электрохимических, оптических, инфракрасных, полупроводниковых, термокаталитических датчиков газа для контроля параметров разных сред

Надежда Любимая

Датчики газа применяются во всех сферах жизнедеятельности человека: от промышленного производства игристых вин, электрогенераторов на основе водородного топлива (в том числе АПК) до контроля изменчивых химических сред, представляющих опасность для человека или потенциальную пользу. В обзоре анализируются технические особенности нескольких типов датчиков контроля уровня загазованности, а также рассматриваются составные части и электронные элементы жидкостных испарителей, производящих «дымовую завесу» без контроля её количественного значения, что является проблематикой, создающей почву для будущих инженерных решений, среди которых электронные индивидуальные считыватели запахов для идентификации других людей.

Некоторые современные условия образования испарений, запахов и газовой среды

Газообразные среды, в том числе испарения жидкостей, неодинаково критичны и по-разному полезны для человека. Во многом польза или вред для человека определяется составом и концентрацией в воздухе испаряемой смеси или газа. Всё относительно: как известно, и чистым кислородом дышать нельзя. Кислотные испарения в относительно высокой концентрации нежелательно вдыхать даже краткосрочно. То же касается паров кислот, скапливаемых в аккумуляторных батареях (АКБ). Продукты горения также обязательно нужно выводить из помещений, где живут люди, посредством принудительной вентиляции или вытяжки. На этот счёт показательны простые и многочисленные примеры (в том числе статистические данные) о сотнях тысяч людей, погибших в XX веке по всему миру из-за угарного газа несовершенных печей отопления в собственных домах и банях. То есть при большой концентрации CO₂ и других газов во вдыхаемом воздухе человеку спазм сосудов и летальный исход. Однако в XX веке устрой-

ства контроля загазованности в быту были мало распространены, в том числе из-за отсутствия соответствующих датчиков контроля газообразных сред.

Примеров мест, где возникают испарения, продукты горения или газообразные среды, сегодня очень много вокруг. Их можно условно разделить на критичные для жизни и здоровья человека и менее критичные. Соответственно, существуют и на основе РЭА разрабатываются электронные модули и устройства, обеспечивающие контроль параметров воздуха, испарений и газообразных сред. В простых бытовых примерах это могут быть датчики дыма как элемент противопожарной сигнализации, а если говорить о более узкой специализации, таких датчиков очень много применяется в самых разных устройствах, включая пылесосы, кондиционеры воздуха, устройства контроля бытового газа и многих других.

Ещё один примечательный пример связан с каминами и специальными кафельными устройствами (и свечами), применяемыми в ритуальной и церковной практиках, а именно с дымоходом в Сикстинской капелле (СК), где проходят конклавы епископов по избранию нового папы римского.

Сикстинская капелла – официальная резиденция папы римского. По давней традиции дым из печной трубы служит единственным способом сообщить миру, что избран новый папа римский. И вот как это происходит на практике. Камин Сикстинской капеллы используют только во время выборов понтифика. Камин напрямую связан с трубой, через неё с помощью естественной вытяжки поднимается дым. Это делает камин важной частью дискуссий, происходящих в процессе избрания нового папы, ибо именно в камине и никак иначе по традиции сжигаются записки с поданными голосами. Дизайн камин не играет большой роли, но в то же время для большинства людей имеет огромное культурно-историческое значение. Если из дымохода Сикстинской капеллы, где собирается конклав, выходит чёрный дым – это означает, что нового Папу пока не выбрали. До 2005 года чёрный дым получался за счёт горения мокрой соломы, которую специально подкладывали в камин. Когда конклав приходил к общему решению и новый папа был избран, в камин клали сухое сено; сгорая, оно образовывало белый дым и оповещало о радостной и важной новости [7]. С 1958 года в Ватикане используют химические добавки для получения нужного цвета дыма. А в наше время (2024 год) практикуется другая методика: чёрный дым получается с помощью химического соединения серы, перхлората калия, антрацена, а белый – за счёт сжигания смеси из бертолетовой соли, лактозы и канифоли. Примерно так же соединяют угольный порошок с химическим составом и ароматизаторами для производства и возжигания кафельных свечей (рис. 1).

Запахи и дым можно получать и без открытого горения. Для тех, кто бывал на медицинских процедурах «ароматерапии для успокоения нервов» и в

санаториях, не составит труда вспомнить, как с помощью электронного устройства нагревается площадка для ароматических масел, и они испаряются в воздухе. Примерно по такому же принципу работают электронные сигареты или вейпы, об устройстве и проблематике которых поговорим в заключении статьи. Во всех таких примерах концентрация запахов во вдыхаемом человеком воздухе должна находиться не под условным, а под строгим электронным контролем, и технологии для этого существуют.

Датчики химического состава воздуха, испарений, газообразных сред – современные электронные элементы, помогающие обеспечить контроль среды и в целом безопасность жизнедеятельности человека. Датчики применяются в различных сферах, в частности, для контроля выдыхаемого (алкотестеры и др. устройства) и иным образом выделяемого человеком воздуха (анализаторы микрофлоры). А в некоторых случаях, связанных с табакокурением, такие устройства жизненно необходимы для контроля и ограничения вдыхаемых составов испарений химических соединений.

Любые запахи, вдыхаемые человеком, могут нести как пользу в качестве терапии (см. пример с ароматерапией), так и вред: как и другие лекарства – в допустимой дозе сохраняют медикаментозные свойства, а в слишком высокой являются «ядом» для живых существ. Именно поэтому устанавливаются ограничения и по табакокурению, и по ароматерапии. Продолжительность процедуры в комнате площадью до 25 м² должна составлять не более 20 минут с последующим обязательным проветриванием помещения. Для такого контроля необходимы электронные датчики различного назначения. Что касается химических составов кислот высокой концентрации, ими дышать опасно даже короткое время. Не за горами будущее, когда каждый заинтересованный человек будет иметь с собой «универсальный электронный анализатор безопасности» по аналогии с теми приборами, что уже применяются для контроля радиационного фона и даже пестицидов в выращенных агрокультурах, в том числе полуразложившихся спрессованных отложений болотного мха, влияющих на почву. Далее рассмотрим некоторые типы электронных датчиков.



Рис. 1. Иллюстрация кадильных свечей для церковного праксиса



Рис. 2. Внешний вид ИК-датчика NDIR SRH-40

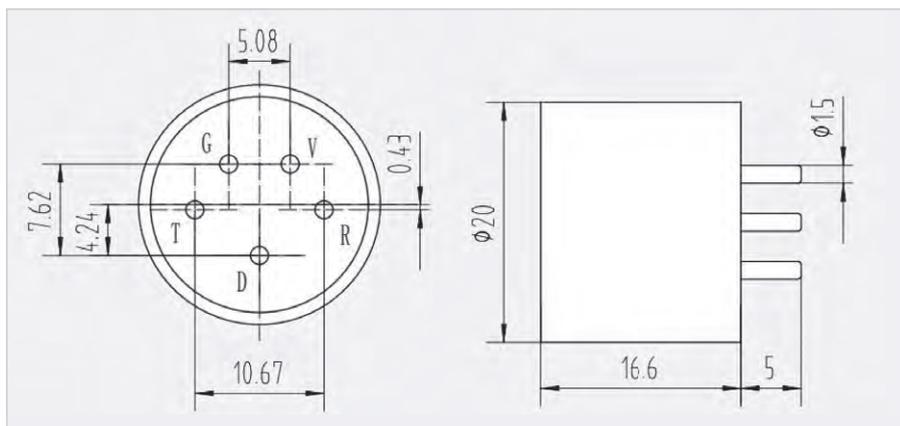


Рис. 3. Распиновка (цоколевка) выводов

ИК-датчик CO₂ фирмы Cubic модели NDIR SRH-40

Газовые датчики NDIR промышленного класса основаны на недисперсионной инфракрасной технологии (NDIR), изготовленной с использованием новейших элементов, поэтому широко используются для определения концентрации CO₂, CH₄, C₃H₈, CBrH₃ как в промышленности, так и в сельском хозяйстве (АПК). Газовые датчики NDIR промышленного класса интегрируются в устройства безопасности и оповещения, которые могут использоваться для АПК, промышленной безопасности, мониторинга окружающей среды, мониторинга газоотводных труб и других ситуаций, связанных с риском превышения CO₂, CH₄, C₃H₈, CBrH₃ в химической, нефтегазовой, металлургической промышленности, в условиях хранения больших объемов газа и нефти (нефтебаза, станция сжиженного газа), при транспортировке и распределении газа. Датчик CO₂ фирмы Cubic модели NDIR SRH-40 разработан специально для интеллектуальных приложений мониторинга CO₂ при хранении зерновых культур в силосных мешках по технологии Silobag [2], [8]. Датчик углекислого газа CO₂ или диоксида углерода, адаптирован для работы в том числе с устройствами IoT и соответствующими приложениями к смартфонам,

что позволяет использовать установку почти автономно. Датчик работает на основе восприятия ИК-диапазона волн. Внешний вид датчика представлен на рис. 2.

На примере ИК-датчика NDIR SRH-40 уместно и показательно рассмотреть принцип работы датчиков-анализаторов газа.

Датчики применяются для обнаружения следующих газов: диоксид углерода (серия SRH), метан (серия SJH), пропан (серия SBH), бромметан (серия SBrH). Каждый датчик реализован в ударопрочном корпусе, имеет мультиизмерительную шкалу с линейризованным диапазоном и цифровым выходом сигнала. Отбор проб рассеянного газа осуществляется через фильтр-сетку. Имеется опорный канал для термокомпенсации и влажности с калибровкой матрицы для обеспечения точности. Доступен механизм автоматической калибровки нуля. При отсутствии движущихся частей обеспечивается быстрая реакция, высокая стабильность, защита от коррозии. По европейской классификации соответствует уровню взрывозащиты Ex ia IIC T4 Ga. На рис. 3 представлена цоколевка (распиновка) выводов датчика.

Все размеры указаны в миллиметрах; размеры без ограничений явля-

Таблица 1. Сведения по назначению выводов датчика согласно рис. 3

Номер или литера контакта	Название	Назначение, уточнение
V	Vi – контакт питания DC	Входное напряжение в диапазоне 3,3 В...5,5 В (DC). Рекомендуется Vi = 5 В
G	GND (общий провод)	Контакт ввода питания (клемма заземления)
T	TX Serial	Контакт выхода последовательного порта
D	Выходное напряжение	Контакт (вывод) выходного сигнала
R	RX Serial	Терминал-приёмник последовательного порта

ются номинальными. Допуски по размерам корпуса ±0,2 мм.

В табл. 1 представлены сведения по назначению выводов датчика.

Внешние устройства могут взаимодействовать с датчиками через UART. Устройство напряжением 3,3 В (центральный процессор) может быть подключено напрямую к выводам последовательного порта RX и TX. На рис. 4 представлена схема интерфейса, из которой понятен принцип считывания данных о концентрации газа или выполнения функции калибровки.

Сочетание технологий Silobad, IoT и других

Один из эффективных способов хранения сухого зерна широко известен и используется в мире по технологии Silobad – в силосных мешках. Это технология хранения ранних зерновых и кормовых культур (плющенного зерна, фуража, жома, семян и т.д.) в герметичных полимерных пакетах. Позволяет сохранить продукцию в течение длительного времени без потерь качества и питательных свойств. В некоторых странах за последние 5–6 лет по этой технологии сохранилось от 35 до 40 млн. тонн зерна. Как показала практика, таков условно простой и экономичный способ снизить потери и затраты субпродукта. Подробнее о технологии в [2]. В зерновых мешках зерно хранится в анаэробном состоянии в среде углекислого газа. Датчики контролируют концентрацию газа. Снижение концентрации означает нарушение герметичности условий хранения и начало биологической активности зерна (увеличение значения CO₂ в измеряемом объёме), что приводит к порче субпродукта. Поэтому назначение электронных устройств газового контроля CO₂ в зерновых хранилищах длительно сохранения трудно переоценить. Для выполнения этой задачи требуются высокоточные измерения CO₂, ибо цена ошибки может быть значительна. Мониторинг уровня концентрации CO₂ в силосных мешках считается жизненно важным для обеспечения безопасности и качества хранящегося зерна. Поэтому с помощью мониторинга уровня концентрации CO₂ в силосном мешке можно эффективно оценить состояние хранения зерна, а электронное устройство-контроллер, к которому подключен датчик, вырабатывает своевременное оповещение оператору, чтобы предотвратить порчу и потерю зерна. Кроме того, электронный контроллер с технологией IoT, подключённый к датчику, позволяет контролировать и провести мониторинг CO₂ через типичный гаджет. Согласно опыту применения технологии Silobag, крупные хозяйства АПК в типичных условиях находятся на условно больших расстояниях от центров принятия решений, что затрудняет своевременный мониторинг концентрации CO₂. Технология контроля CO₂ в сочетании с технологией IoT позволяет осуществлять дистанционный мониторинг концентрации CO₂ в режиме реального времени. Это помогает специалистам своевременно принимать адекватные меры для сохранения зерна (и других продуктов), поэтому является не только полезным средством измерения и элементом электронной системы, но и важным экономическим фактором: гарантирует агрокомплексам продовольственную безопасность, а с ней и экономические выгоды в конкурентной среде. Датчик разработан для широкого диапазона измерения концентрации CO₂ до значения 40% загазованности по объёму хранилища. Эта цифра ука-

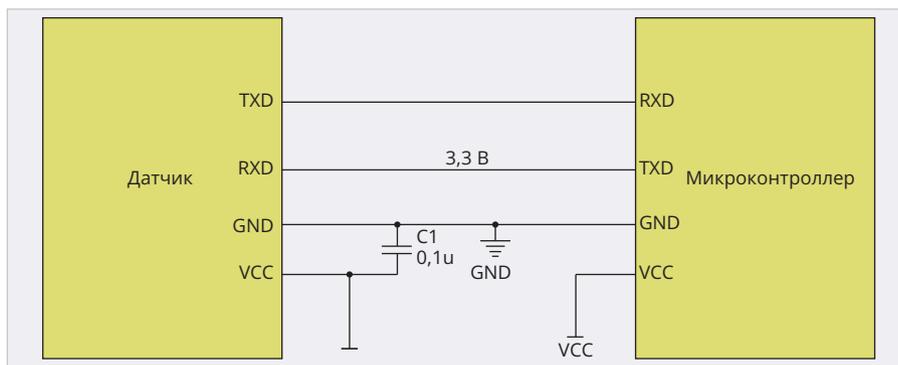


Рис. 4. Принцип считывания данных о концентрации газа или выполнения функции калибровки

зана в наименовании модели NDIR SRH-40. Датчик применяется в электронных контроллерах в режиме низкого энергопотребления с минимальным значением 1 мА. Принцип работы основан на неинвазивной инфракрасной спектроскопии с использованием инфракрасного излучения длиной волны 4,3 мкм. NDIR SRH-40 обеспечивает высокую точность и стабильность измерений благодаря использованию модуляционной спектроскопии и автоматической компенсации температуры и давления.

Блок-схема применения и включения датчиков CO₂ представлена на рис. 5.

Встроенный стабилизатор датчика преобразовывает напряжение при подключении к устройствам напряжением 5 В. Типичная схема применения датчика поясняет принцип переключения на выходе сигнала логического уровня в диапазоне 5 В...2,5 В. В схеме адаптации питания и сопряжения, представленной на рис. 6, участвуют в качестве токовых ключей транзисторы LM3904TTIG (3904).

SRH-40 датчик с инфракрасным типом измерения имеет следующие технические характеристики:

- концентрация измерений загазованности CO₂: в диапазоне 0–40%;
- точность в диапазоне от 0–40%: отклонение ±10% от показаний;
- разрешение: 0,01%;
- время отклика: 25 с;
- рабочая температура: –20...+50°C;
- габариты: 20 (диаметр) × 16,6 мм.

Аналогичные датчики позиционируются как NDIR Gas Sensor, и различаются они по сериям SRH, SJH, SBH, SBtH. По форм-фактору и распиновке контактов эти датчики одинаковы (рис. 2), но имеют различия по модификациям.

Типичные условия применения датчиков серии SJH:

- шахты, металлургические производства, а также добыча нефти и газа;
- сигнализаторы утечки сжиженного газа;
- измерители концентрации газа;
- применение в устройствах контроля на станциях сжиженного газа, в том числе газозаправочных;
- транспортировка топливного газа. Типичные условия применения датчиков серии SBH:
- шахты, металлургические производства, а также добыча нефти и газа;
- сигнализаторы и мониторинг утечки сжиженного газа;
- в качестве датчика утечки хладагента;
- транспортировка топливного газа. Типичное применение датчиков серии SBгН:
- промышленная безопасность;
- фумигация;
- химическая промышленность, в том числе нефтегазовая;
- мониторинг контуров газоотвода;
- станция сжиженного газа;
- транспортировка топливного газа.

Принцип работы датчика по закону Бугера – Ламберта – Бера

Работа датчика основана на том, что молекулы CO₂ и CH₄ состоят из атомов разных типов, они имеют спектр поглощения в инфракрасном диапазоне. Интенсивность поглощения подчиняется закону Бугера: когда световая волна, соответствующая определённому газу со спектром поглощения, проходит через измеряемый газ, интенсивность световой волны значительно ослабляется, а уменьшение интенсивности непосредственно связано с концентрацией измеряемого газа. Это иллюстрирует рис. 7.

Большинство как органических, так и неорганических многоатомных газов имеет определённую длину волны поглощения в инфракрасной области. При прохождении инфракрасного спектра светопропускающая способность молекулы летучего газа на определённой длине волны выражена законом (зависимостью) Ламберта – Бера:

- I означает коэффициент пропускания света, $I = I_0 e^{-kpl}$;
- i означает интенсивность поглощения света, $i = I_0 - I = I_0(1 - e^{-kpl})$;
- I_0 – интенсивность падающего света;
- l – толщина газовой среды;
- p – концентрация газа;
- k – коэффициент поглощения.

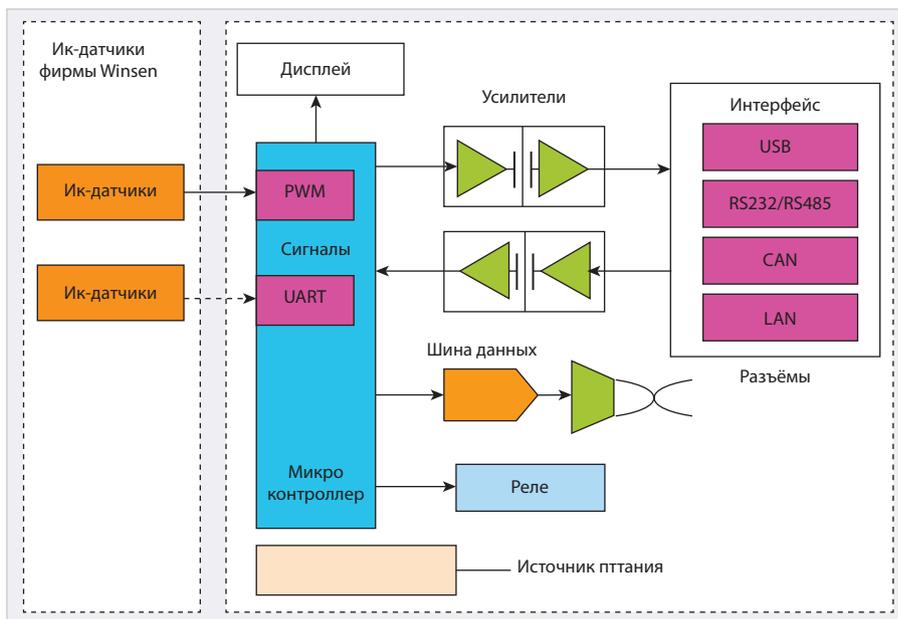


Рис. 5. Блок-схема включения датчиков CO₂

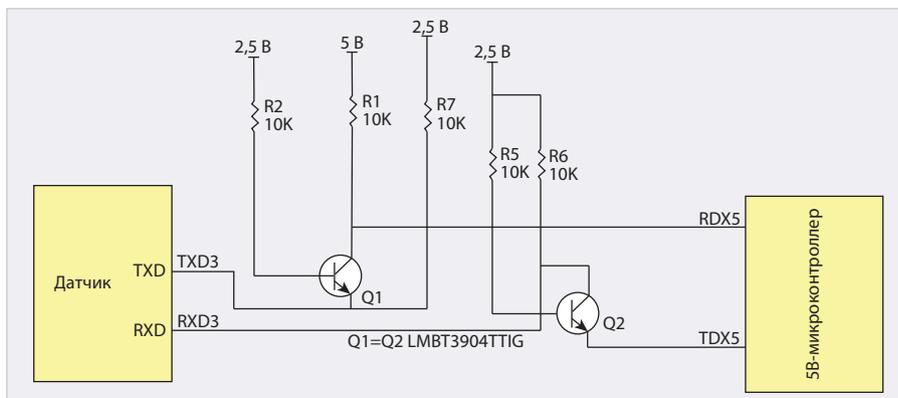


Рис. 6. Схема интерфейса сопряжения

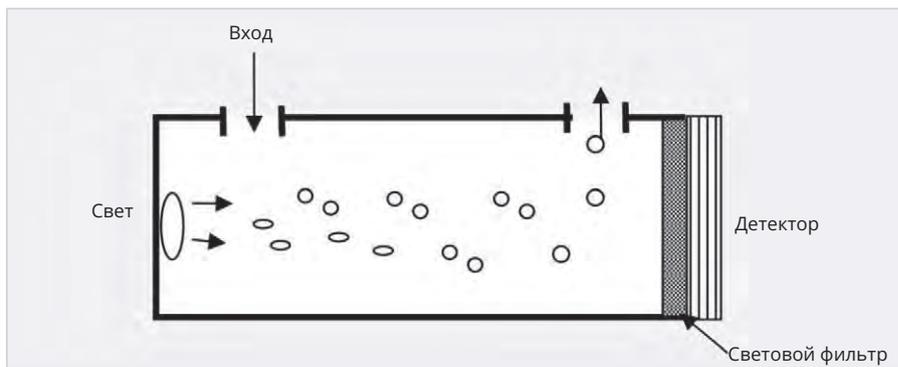


Рис. 7. Иллюстрация принципа работы датчика

При подключении внешнего питания и контроллера схема сопряжения UART-TTL к цепи RS-232 с назначением выводов представлена на рис. 8.

Пояснение к рис. 8:

- скорость передачи данных – 9600 бит/с;
- бит данных – 8;
- стоп-бит – 1;
- контрольный бит – null.

Уровень выходного сигнала на выводе датчика D (Vout) составляет 0–2,5 В постоянного тока, где 0,4–2 В соответствует 0–100% газа в контролируемом объёме. С помощью АЦП и преобразователя «напряжение-ток» электронного контроллера выходной может быть (по необходимости) преобразован в промышленный стандартный сигнал, где сила тока в электрической цепи 4–20 мА.

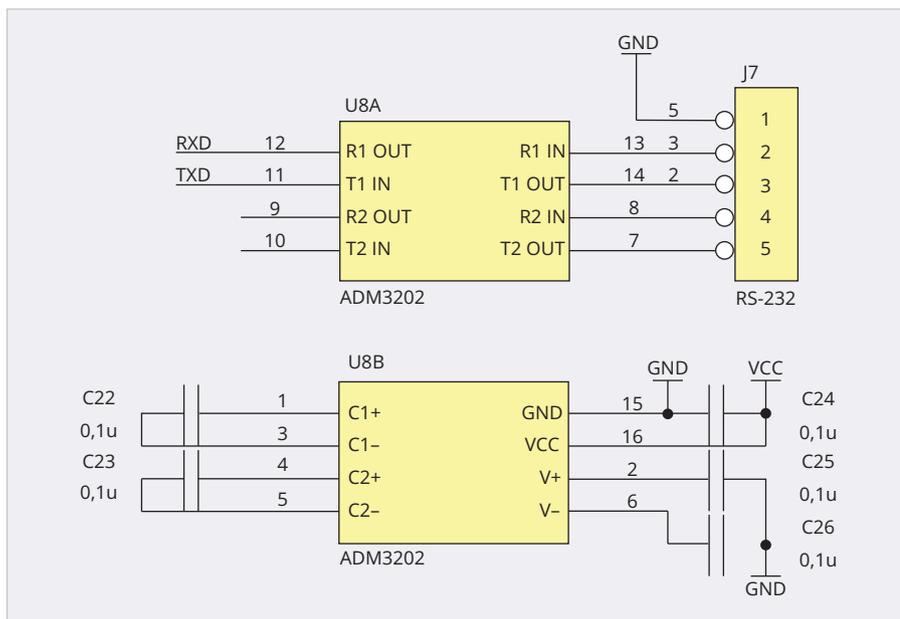


Рис. 8. Назначение выводов для подключения контроллера

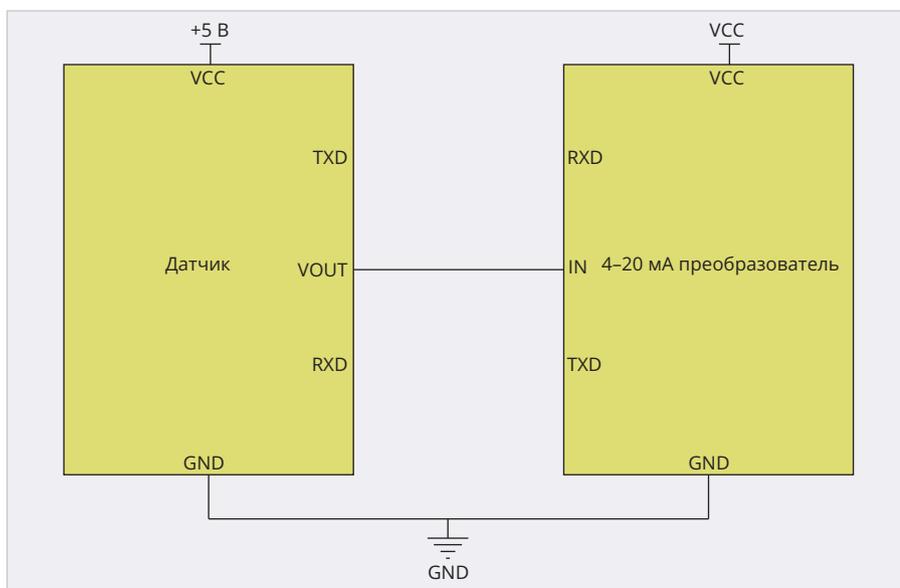


Рис. 9. Схема включения преобразователя «напряжение-ток» для ИК-датчика SRH-40

Схема интерфейса представлена на рис. 9.

Для корректной и долговременной работы датчиков рассмотренных серий производитель рекомендовал соблюдение следующих условий эксплуатации. Рабочая температура должна быть в пределах $-40^{\circ}\text{C} \dots +70^{\circ}\text{C}$. Для минимизации влияния электрических и магнитных помех соединительный кабель должен быть экранированным с изолирующей оболочкой, его защитный слой подлежит заземлению. Установка, использование и техническое обслуживание данного изделия должны соответствовать положениям инструкции по эксплуатации. Все данные в протоколе ПО являются шестнадцатиричными: [xx] – однобайтовые данные

(без символа, 0–255); (xx) – двухбайтовые данные, целое число со знаком (от -32768 до $+32767$), старший байт впереди. Более подробно о программировании и сопряжении датчика в [2] и [10]. С помощью изменения настроек через ПО контроллера (через параметр DF3) можно переключать датчик по чувствительности к разным газам: в значении параметра «0» датчик реагирует на $\text{CH}_4/\text{C}_3\text{H}_8/\text{C}_2\text{H}_6$; в значении параметра «1» датчик реагирует только на CO_2 . Изначально установлен «0». Параметр DF4 определяет единицы измерения процентного замера в промилле.

Датчик имеет диапазонную линейризацию и цифровой выходной сигнал, относительно быстрый отклик, высокую стабильность и длительный

срок службы более 15 лет, что позволяет применять его в аппаратных приложениях для контроля по технологии Silobag и др. Подробные характеристики датчика и рекомендации по его подключению представлены в [10]. Один из дополнительных и рекомендуемых вариантов контроля сред с помощью рассматриваемого датчика – для мониторинга газоотводных труб и закрытых коммуникациях различного назначения, в том числе для обеспечения безопасности жизнедеятельности в критической инфраструктуре. Предпосылки инженерных решений с применением датчиков контроля водорода рассмотрим далее.

Перспективы датчиков контроля водорода и других сред

Достоинна внимания специалистов информация о разработке и применении датчика диагностики водорода H_2 . Этот состав газа образуется в различных случаях, среди которых перспективное направление имеет разработка электрогенераторных установок на водородном топливе. Эта тема сейчас очень популярна как направление экологически чистого электричества. Кроме того, датчики контроля уровня водорода (и иного химического состава газа) востребованы везде, где имеется или возможна газообразная среда. К примеру, АПК, в том числе производство навоза и компоста, жизнедеятельность ферм крупного рогатого скота, и даже такое малоизученное направление, как изучение естественных выделений человека для диагностирования микрофлоры его кишечника с целью профилактики брюшных инфекций и очищения от паразитов. Наиболее безопасный газ – гелий, чьи месторождения имеются в России, также нуждается в контроле концентрации в таких, например, устройствах, как дирижабли и летающие (воздушные) шары с управлением человеком.

При зарядке аккумуляторных батарей рост концентрации водорода H_2 является предвестником эффекта «теплового разгона», что в дальнейшем при бесконтрольности процессов может приводить к деформации, разрыву корпуса и возгоранию аккумулятора. Так, совершенствование электродвигателей и применение электрической тяги привело к значительному спросу на литий-ионные (Li-ion) аккумуляторы, а также АКБ для электро-



Рис. 10. Внешний вид датчика SGX-BLD-1 компании SGX Sensortech

мобилей, электрокаров различного назначения и машин с гибридными силовыми установками (электромотор и ДВС), в том числе на транспортных средствах, перемещающихся по воздуху и воде. Тепловой разгон стал серьезной проблемой безопасности автомобильных, воздушных и морских транспортных средств, везде, где для соблюдения экономической выгоды переходят на использование энергии аккумуляторов [11].

К примеру, датчики водорода моделей SGX-BLD-1 и SGX-BLD-2 производства компании SGX Sensortech являются возможным и вариативным решением инженерных проблем разработчиков РЭА, поскольку по техническим характеристикам датчики весьма чувствительны не только к уровню водорода, но и к оксиду углерода CO. В практическом применении (на транспорте) такой датчик, подключенный к электронному контроллеру через шину CAN, сигнализирует о начале выделения в банках АКБ водорода H_2 , что позволяет вовремя принять меры и защитить оборудование. Модуль датчика располагают рядом с системой хранения водорода или в корпусе аккумуляторной батареи, что позволяет определять газообразный H_2 , образующийся при утечке или отказе литий-ионного аккумулятора в режиме термического разгона [3].

Основные преимущества:

- оперативное время отклика (1 с);
- датчик газа отличается по теплопроводности и создан по технологии высокой надёжности;
- диапазон обнаружения H_2 от 0 до 10%;
- способен обнаруживать уровень (изменяемость) вентиляции перед термическим разгоном;
- низкое энергопотребление (50 мА);

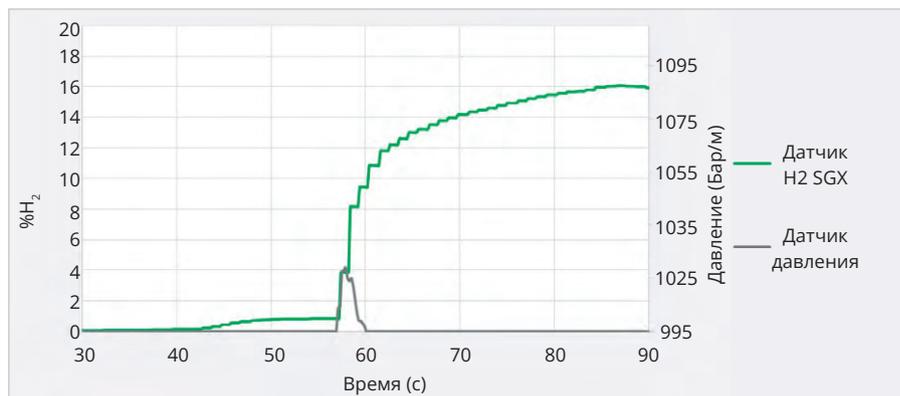


Рис. 11. Иллюстрация режимов отказа в сравнении датчика H_2 SGX и датчика давления

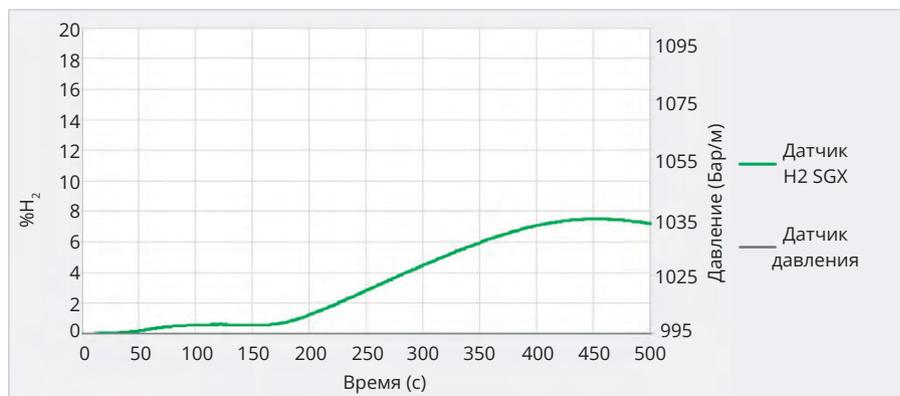


Рис. 12. Реакция датчиков в сравнении с течением времени эксперимента

- высокоскоростная связь CAN 500 кбит/с;
- имеет стандартный автомобильный 4-контактный разъём AMP-1-0967640-1A;
- водонепроницаемый корпус IP6K7.

На рис. 10 представлен внешний вид датчика SGX-BLD-1 компании SGX Sensortech. В системе с водородными топливными элементами или литий-ионными батареями (АКБ) возможны различные режимы отказа. Чтобы предотвратить опасную ситуацию для пользователей оборудования или пассажиров, система управления топливными элементами (АКБ) в критической ситуации формирует и отправляет сигнал тревоги в звуковом и световом формате, к примеру, с требованием «покинуть салон транспортного средства». Установленные внутри литий-ионных аккумуляторных батарей датчики типа SGX-BLD-1(2) надёжно и заблаговременно обнаруживают газообразный водород при различных режимах отказа в результате теплового выброса. Другие сенсорные технологии, такие как изменение давления, пока обнаруживают только некоторые из режимов отказа без гарантии их работы во всех архи-

тектурах АКБ, поскольку нестандартные вентиляционные решения препятствуют обнаружению повышения давления внутри корпуса АКБ.

Далее на рис. 11 представлены несколько примеров режимов отказа в сравнении датчика H_2 SGX и датчика давления.

Пояснение к рис. 11. Датчик H_2 реагирует (обозначение на графике H_2 TGX-sensor, зелёная кривая). Датчик давления (Pressure Sensor) не реагирует (серая кривая).

На рис. 12 представлены реакции датчиков при увеличении времени диагностики и опыта.

Датчик H_2 реагирует (зелёная кривая) быстрее, чем датчик давления (серая кривая – незначительное повышение давления за короткий период).

Некоторые электрические характеристики датчика SGX-BLD-1:

- время отклика <60 мс (T80);
- чувствительность по водороду H_2 (BLD-1, BLD-2): 0,4 ... 10 об. %, с чувствительностью по оксиду углерода CO (BLD-2); при уровне воспламеняемости >4% ± 0,4 об. % в воздухе и менее $H_2 \leq 4\% \pm 10\%$ в воздухе $H_2 \geq 4\%$; все параметры справедливы при температуре +23°C.

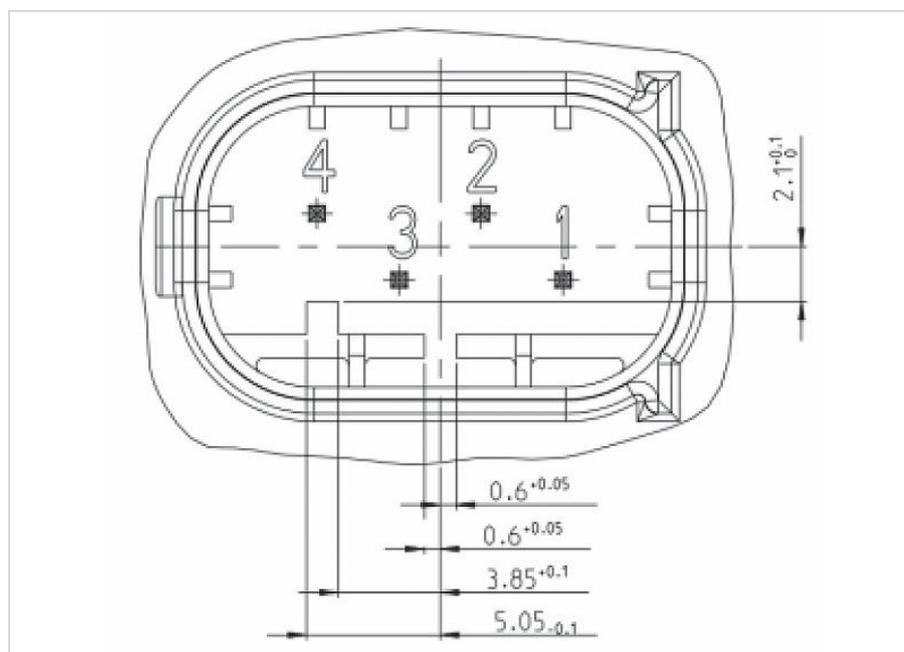


Рис. 13. Распиновка контактов датчика SGX-BLD-1

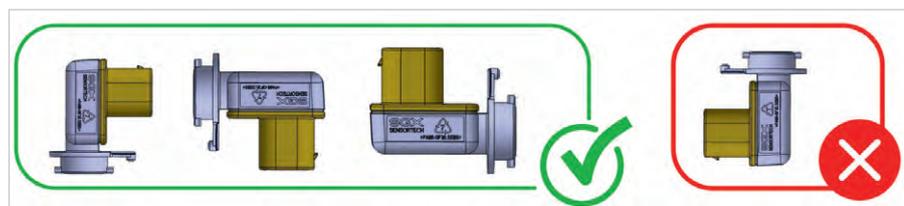


Рис. 14. Корректное положение фильтрующей мембраны при монтаже датчика

- скорость обмена по шине CAN: 500 кбит/с;
- напряжение питания 9...18 В;
- потребляемый ток 25...50 мА;
- диапазон рабочих температур: -40...+85 °С при отн. вл. 0...95%;
- соединитель: 4-контактный разъем Tусо Electronics AMP-1-0967640-1A;
- степень защиты корпуса IP6K7;
- время запуска (готовности) <400 мс;
- надёжность наработки до отказа 10 лет или 13 000 часов непрерывной работы;
- габаритные размеры: 39×35×27 мм;
- вес <15 г.

Рекомендации по интеграции датчика

Распиновка и обозначение выводов датчика SGX-BLD-1 представлены на рис. 13.

Уточнение к рис. 13.

Вывод 1: Напряжение питания DC (VBAT).

Вывод 2: Заземление, общий провод.

Вывод 3: Низкий уровень CAN.

Вывод 4: Высокий уровень CAN.

При корректном монтаже датчик открыт только для измерения расхода воздуха из аккумуляторной бата-

реи. Предпочтительно, чтобы фильтрующая мембрана, входящая в состав модуля, была направлена вниз. Если это невозможно, она должна быть смонтирована в любом положении, кроме положения «вверх», чтобы предотвратить скопление грязи, воды. Эту рекомендацию иллюстрирует рис. 14.

Дополнительные сведения о настройке и программировании системы сопряжения с датчиком SGX-BLD-1 и моделей SGX-BLD-1 и его модификацией моделей SGX-BLD-2 рассмотрены в [7], [11]. Посмотреть и изучить полные характеристики датчиков SGX-BLD1/SGX и BLD2 можно в [1], [11]. Сенсоры и датчики газа различного назначения и диапазона – с конвертацией измерений – можно подобрать с помощью сайта [10].

Среди сенсоров и датчиков газа промышленность предлагает электрохимические, оптические, инфракрасные, полупроводниковые, термокаталитические и другие виды анализаторов газовой среды. Почти к каждому составу газа уже созданы и применяются все из перечисленных типов датчиков. Отметим популярные термокаталитические модели: 1LEL-75 (PM999-600A-CIT) для

замера метана CH_4 , ацетилена C_2H_2 , сероводорода H_2S , бензола C_6H_6 , аммиака NH_3 , арсина AsH_3 , брома Br_2 , водорода H_2 и многих других углеводородов (горючие газы) химической группы СН от компании City Technology – ведущего мирового поставщика инженерных решений для обнаружения опасных для жизни и здоровья людей газов [1]. С учётом больших возможностей измерения в средах с различным газовым составом уместно говорить о том, что следующим шагом научной и прикладной мысли в области современной электроники будет разработка «датчиков нюха», способных отличать запахи и определять их соотношения в воздухе. Всё разнообразие датчиков невозможно охватить, приведём лишь наиболее востребованные модели, находящиеся в первых по востребованности позициях в каталогах. Уже сегодня компания Membrapor выпускает электрохимические датчики замера загазованности среды модели H2/SA-1000 (0–1000 мг/л) – для водорода. Для разных объёмов сред и помещений – серий H2/C (модели H2/C-2000, H2/C-20000, H2/C-40000 (0–40000 мг/л), H2/C-5000 и др.), серий H2/CB, H2/CT, H2/M, H2/S, H2/SA, H2-BF – модификации для разных объёмов, а также H2-AF для замера H_2 от производителя Alphasense. 2E-O2 в диапазоне 0...30 об. %.

Летучие органические соединения VOC, в том числе на основе пыли обыкновенной и мелкого песка, также подлежат анализу, в том числе благодаря оптическому датчику AM1002 от «ИнфорАналитики», реагирующего на пыль в диапазоне 0–5000 мг/м³ и 0–10 мг/л. Условный аналог от компании Cubik – оптический датчик 10 zero H2 Satellix, реагирующий также на арсин AsH_3 .

Компания Sensorix выпустила датчик для замера этилена C_2H_4 модели C2H4-LF-3V в широком диапазоне 0–27 000 мг/л. Компания ELT Sensor предлагает датчик для замера концентрации бромметана CH_3Br модели F3-042256-05004. ИК-датчик IRNET-P-32-CH4-NC (фирма NET) для газовых сред с метаном CH_4 и его аналог по близким техническим характеристикам ИК-датчик INP-20-CH4-NC от фирмы Smartgas. ИК-датчик компании NET модели NT-H2O2-PL300 для замера жидких сред, в том числе перекиси водорода H_2O_2 , и электрохимический NT-SO2-PL20 того же



Рис. 15. Внешний вид модуля МН-Z19 для замера CO_2

производителя для замера диоксида серы SO_2 (0–20 мг/л). Электрохимический датчик-газоанализатор М-2Е-О2 от компании NET для замера кислорода O_2 в объеме 0–30 об. %. Отечественный производитель «ИнформАналитика» предлагает датчик для замера дихлорэтана с химической формулой $\text{C}_2\text{H}_2\text{Cl}_2$ модели, позиционирующейся как «1,2-trans-DCE Satellix». Электрохимический датчик от Sensorix модели 1CO (АВ010-RO1А-СIT) для сред с угарным газом CO (оксид углерода в диапазоне 0,5–1000 мг/л). Датчики 1LEL75C (PM989-600A-CIT и PM999-600A-CIT) для замера углеводородов (и линейки горючих газов) CH, электрохимический датчик с диапазоном 0,5–200 мг/л для сероводородных сред 1H2S (AC400-R00A-CIT). Полупроводниковый датчик газа TGS2600 фирмы Figaro для замера концентрации в среде водорода H_2 тоже довольно популярен. Этот же датчик широко применяется в бытовых газоанализаторах и алкотестерах.

В дополнение к этому китайский поставщик радиоэлектронного оборудования компания Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co и её контрагент в России «АСТ Компонентс» распространяет электронный модуль МН-Z19 NDIR небольшого размера на основе ИК-датчика, использующий принцип недисперсионного инфракрасного излучения (NDIR) для обнаружения наличия CO_2 в воздухе [5]. Этот датчик не новый, однако, в отличие от других датчиков для замера CO_2 МН-Z19 не требует специфического источника питания и адаптирован к передаче данных через UART и PWM.

Интеллектуальный инфракрасный CO_2 -модуль

Датчик создан по передовой технологии обнаружения с помощью инфракрасного сканирования поглощающего газа, прецизионной оптической схемы и превосходного схемотехнического решения. Обладает конкурент-

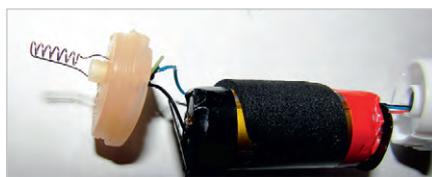


Рис. 16. Устройство вейпа, функционирующего на основе нагревания ароматизированной жидкости

ной (относительно аналогов) селективностью, не зависящей от примесей в контролируемой среде кислорода, и рассчитан на длительный срок службы. Имеет встроенный модуль для температурной компенсации с выходом UART, а также отдельный выход широтно-импульсного модулятора. Именно в связи с такими характеристиками датчик получил название «интеллектуального». Внешний вид модуля МН-Z19 представлен на рис. 15.

Инфракрасный модуль МН-Z19 NDIR для измерения и контроля загазованности CO_2 используется в системах кондиционирования воздуха и мониторинга качества воздуха в помещениях, в том числе жилых. Из основных функций и характеристик уместно отметить высокие чувствительность и разрешение датчика.

Из технических особенностей ИК-модуля МН-Z19 для разработчиков уместно отметить следующие. Выход ШИМ с диапазоном обнаружения CO_2 в пределах 0...2000 мг/л при цикличности измерения 1004 мс \pm 5%. Выход высокого логического уровня начале метрологического цикла 2 мс \pm 5%, в середине цикла – 1000 мс \pm 5%. Выходной сигнал низкого уровня для завершения цикла 2 мс \pm 5%. В режиме Hd калибровка нуля начнется, если на Hd более 7 с подается сигнал LOW. Вход SR не используется. Уровень сигнала на выводах TX и RX – 3,3 В. Vo – выходное напряжение 3,3 В, выходной ток не более 10 мА. Цифровые данные по выводу PWM: первые 2 мс всегда HIGH, последние – всегда LOW, а «середина» пропорциональна концентрации CO_2 в пределах 0–5000 мг/л (не 2000 мг/л, как ошибочно указано в документации китайского производителя).

Проблематика вдыхания пара и особенности конструкции вейпов

«Вейп» на условном сленге – электронная сигарета, для разжигания

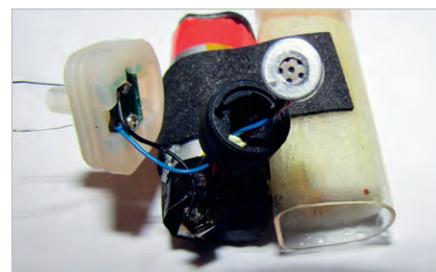


Рис. 17. Вид на простейший датчик, реагирующий на изменение температуры

содержимого которой не применяется открытый огонь, вместо этого она нагревается специальным элементом, состоящим из спирали по аналогии с ТЭНом. Только в данном случае он небольшой мощности и питается от встроенного в девайс аккумулятора напряжением 3,7 В и ёмкостью не менее 1200 мА/ч. Такое устройство нередко не имеет даже включателя питания. Как правило, тип аккумулятора 14650 и 18650. Как устроен девайс для жидких смесей, можно увидеть в его разобранном состоянии. Из составных частей: аккумулятор, нагревательный элемент – спираль из тонкой нихромовой проволоки, резервуар для ароматизированной жидкости с простейшим фильтром и датчик температуры.

Устройство вейпа, функционирующего на основе нагревания ароматизированной жидкости, представлено на рис. 16.

На рис. 17 представлен вид на простейший датчик, реагирующий на изменение температуры.

При незначительном понижении температуры (когда за счёт «затяжки» уменьшается температура в потоке воздуха) датчик замыкает контакты в цепи электрического питания нагревательного элемента (и иногда индикаторного светодиода), который подогревает ароматизированную смесь с пропиленгликолем. В результате испарения жидкой смеси человек вдыхает «облако» дыма. Пока воздух из устройства тянется через специальное отверстие и резервуар с жидкостью, нагревательный элемент работает. Затем цепь питания размыкается. Ограничений (в количестве затяжек) по использованию устройства не установлено, поэтому им пользуются, пока не иссякнет заряд аккумулятора (в условно дорогих моделях предусмотрено ЗУ) или ароматизированная жидкость в резервуаре устройства. Поэтому уместно рассуждать о том, чтобы в будущих подобных устройствах



Рис. 18. Вид на изолированный нагревательный элемент вейпа для использования коротких сигарет – стиков

обеспечить функцию сбережения здоровья человека, то есть датчик-газоанализатор с электронным контроллером, который ограничивает за определённое время пользование вейпом и тем самым регулирует количество условно вредной жидкости, в парообразном виде попадающей в лёгкие человека. Прототип датчика для испарений жидких сред NT-H₂O₂-PL300 обеспечивает контроль перекиси водорода H₂O₂, а для замера диоксида серы SO₂ применяется датчик NT-SO₂-PL20.

Вейпы для использования коротких сигарет – стиков устроены иначе, там главным элементом является нагревательный элемент с предустановленной регулировкой температуры нагрева, проникающий в табачную смесь при использовании девайса (рис. 18).

Недавно петербургские учёные разработали первую антивейп-систему для установки в общественных местах, таких как кинотеатры, средства транспорта, учебные заведения и иных. В электронной системе стационарной установки работают датчики-анализаторы воздуха, реагирующие на глицерин и пропиленгликоль (вредная жидкость), которые входят в состав жидкости для вейпа. При обнаружении этих веществ на мобильные гаджеты будет передаваться специальный сигнал, в том числе – как вариант – блокирующий сотовую связь. Некоторые деятели предполагают, что такая инициатива и её реализация снизят число случаев курения в учебных учреждениях. Ранее петербургские депутаты обсудили законопроект, запрещающий детям до 16 лет находиться в местах, где курят «электронные сигареты». В документе отмечается, что в законодательной базе прописаны только «традиционные курительные принадлежности». Мы не занимаемся табакокурением и

никому не советуем, однако обязательно подробно поднимем эту тему позже, а пока вы не лишены возможности ознакомиться с анонсом новинки электронной техники в [4].

Выводы

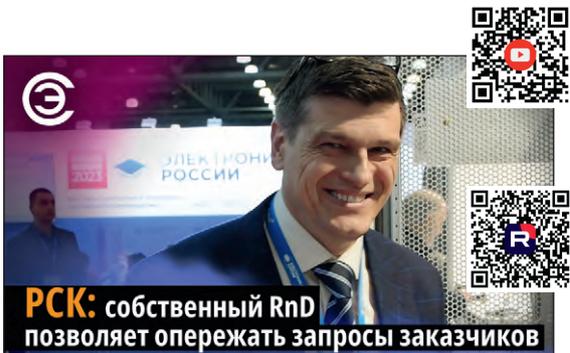
Из безусловных «плюсов» современных датчиков для газовых сред отметим термостабилизацию и влажостабилизацию, выполненные конструктивно в едином корпусе датчиков. Также и диаграммы испытаний подтверждают устойчивость рассмотренных датчиков к изменению окружающей среды.

Однако требовать от современных электронных датчиков «всего и вся» нелегко, ибо датчики продолжают быть несовершенны. Из отрицательных отзывов специалисты отмечают относительно медленное время измерения (корректного отклика); таким образом, в условиях динамически меняющихся обстоятельств среды метрологические измерения перестают быть актуальны. Есть сведения о том, как отечественные специалисты провели испытания на максимальный срок службы датчиков компании Alphasense моделей O₂-A2 и O₂-A3 в условиях измерения кислорода. При испытаниях по схеме от производителя «нагрузочный резистор и неинвертирующий усилитель на ОУ» на влияние изменения температуры выявлены периодически возникающие колебания выходного сигнала датчиков. Колебания возникали при температуре +10°C и ниже (иногда колебания возникали при температуре +20...+23°C). При статичной температуре повторялись как одиночные колебания, так и серии колебаний [9]. Насколько типично или часто повторяются ситуации с неустойчивостью датчиков, установить не удалось. Поэтому представляется крайне важным внимание к выбору професси-

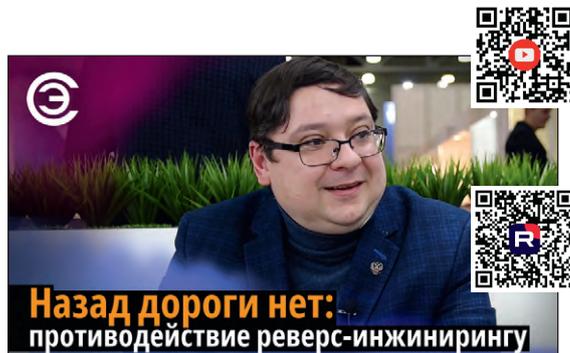
онального газоанализаторного оборудования для обеспечения безопасности. Значительные риски представляют токсичные газы, удушающие газы, такие как монооксид углерода и углекислый газ – двуокись углерода, и легковоспламеняющиеся газы, которые могут привести к взрывам или истощению в среде кислорода. Газовые датчики являются неотъемлемой частью критически важных приложений, где необходимы точность, условно быстрое время отклика и надёжность в условиях загрязнения, экстремальных температур и влажности окружающей среды. Уже в XXI веке с помощью портативных электронных анализаторов запахов можно будет дистанционно контролировать уровень свежести продуктов, не только на базах хранения, магазинах и на рынках, но и в домашнем холодильнике.

Литература

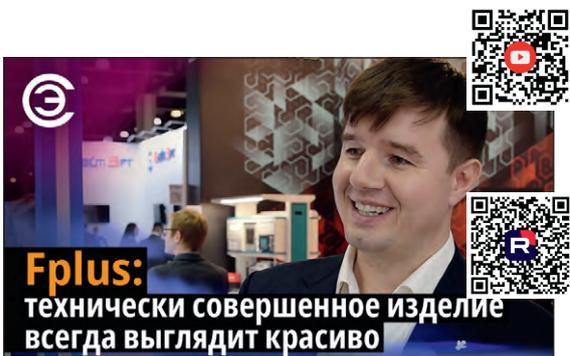
1. Датчики для контроля загазованности водородом. URL: <https://gassensor.ru/catalog/vodorod>.
2. Датчик фирмы Cubic модели NDIR SRH-40 для приложений мониторинга CO₂. URL: https://vc.ru/u/1769747-vladimir-dennica/733838-datchik-co2-cubic-ndir-srh-40-razrabotan-dlya-prilozheniy-monitoringa-co2-pri-hranenii-zernovyh-kultur#_top.
3. Информация о SGX- BLD1 и BLD2. URL: <https://electronix.ru/forum/index.php?app=forums&module=forums&controller=topic&id=171684#comment-1866103>.
4. Петербургские учёные разработали первую антивейп-систему. URL: <https://spb.mk.ru/social/2023/11/24/peterburgskie-uchenye-razrabotali-pervuyu-antiveypsystemu.html>.
5. Сайт компании Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co. URL: HYPERLINK "http://www.winsensor.com" www.winsensor.com.
6. Сайт компании SGX Sensortech с каталогом продукции. URL: <https://www.sgxsensortech.com>.
7. Самые знаменитые камни мира. URL: <https://emosurff.com/post/9628>.
8. Сенсоры и датчики газа компании «Газ-сенсор». URL: <https://gassensor.ru/catalog>.
9. Форум о неисправности датчиков-газоанализаторов. URL: <https://electronix.ru/forum/index.php?app=forums&module=forums&controller=topic&id=105808#comment-1858447>.
10. Data-Sheet NDIR SRH-40. URL: <https://gassensor.ru/pdf/products/1851.pdf?t=1648125642>.
11. Data-Sheet SGX-BLD1/SGX/ и BLD2. URL: <https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2021/01/DS-0459-SGX-BLD1.pdf>. 



Интервью с Егором Дружининым –
техническим директором ГК РСК



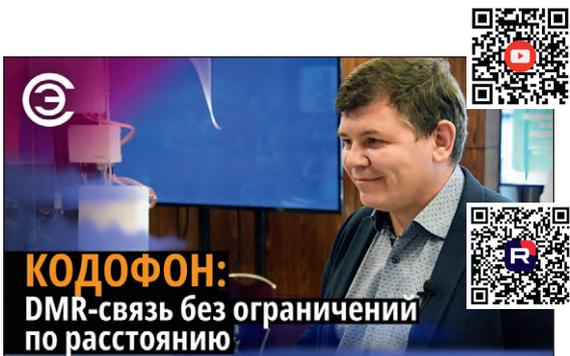
Интервью с Дмитрием Воруничевым – преподавателем кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств, заместителем директора Института радиоэлектроники и информатики РТУ МИРЭА



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



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



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

Квазипиковый измеритель уровня звукового сигнала

Александр Одинец

По виду индикации динамические измерители квазипикового уровня (ИКУ) делятся на устройства с индикацией изменяющейся в такт с уровнем сигнала светящейся полосой и с индикацией светящейся точкой. Базовый вариант устройства с индикацией светящейся точкой рассмотрен в [1], а развитие реализованной в нём идеи – в [2]. Значительно улучшить технико-эксплуатационные характеристики измерителя стало возможно путём введения режима с индикацией светящейся полосой, что делает процесс визуального наблюдения за показаниями прибора более наглядным.

Общие сведения

Как известно, во избежание заметных на слух искажений, вызванных кратковременными перегрузками канала записи, для контроля сигнала в магнитофонах наряду с измерителями среднего (промежуточного) уровня используют измерители так называемого квазипикового уровня (ИКУ). Согласно стандарту [3] время интеграции таких измерителей, т.е. время действия испытательного сигнала, за которое показание индикатора достигает 80% от показания, соответствующего его амплитудному значению, равно 5 мс (искажения, длящиеся менее 10 мс, ухо не замечает [4]).

Профессиональные измерители уровня разделяют на два типа [5]. Приборы первого типа должны иметь большой динамический диапазон – от –40 дБ до +4 дБ. Они предназначены для оперативного регулирования уровней. Более простые ИУ второго типа служат для оценки уровней при эксплуатационном контроле и имеют динамический диапазон измеряемых уровней от –20 дБ до +3 дБ. Время интеграции у них должно быть одинаковым, а время возврата различно. Чем больше время возврата, тем более завышенными получаются показания измерителей уровня на сигналах низкого уровня, следующих после высоких. Время возврата, измеряемое при спаде показаний от 0 на 20 дБ, для приборов первого типа должно составлять 1,4...2 с, а для второго – 2...4 с.

Различие времени возврата двух ИУ в одном блоке особенно заметно на глаз, и выравнивание этих характеристик просто необходимо, тем более что допуски позволяют изменять

временные параметры в больших пределах. Точность показаний ИУ также нормирована: номинальный уровень должен устанавливаться с погрешностью 1 дБ на уровне –30...2 дБ, а на –40 дБ показания могут отличаться на $\pm 3,5$ дБ.

ИКУ можно условно разделить на статические (одноуровневые) и динамические (многоуровневые). Первые индицируют превышение сигналом одного заранее установленного уровня, вторые позволяют наблюдать изменения контролируемого сигнала в пределах динамического диапазона измерителя. ИКУ с индикацией светящейся точкой целесообразно применять только в носимой радиоаппаратуре с автономным питанием, так как они уступают ИКУ с индикацией светящейся полосой в наглядности. И наконец, по характеру шкалы различают ИКУ с линейной, логарифмической и S-образной шкалой, у которой растянут наиболее важный участок вблизи 0 дБ.

Любой измеритель уровня имеет входное устройство, двухполупериодный детектор, времязадающую цепочку и показывающий прибор. Так как реальные звуковые сигналы несимметричны, в ИУ нужно применять двухполупериодное детектирование. Для стереофонических ИУ подойдёт двухканальная микросхема K157ДА1 с детекторами огибающей, работающими в диапазоне около 50 дБ, т.е. её можно использовать и в приборах первого типа. Следует заметить, что перегрев кристалла этой микросхемы, возможный при чрезмерно длительной пайке её выводов, приводит к необратимому возрастанию начального выходного напряжения и ограничению диапазона измерения.

Схема электрическая принципиальная

Принципиальная схема устройства показана на рис. 1. Контролируемый сигнал через разделительные конденсаторы C1, C2, подстроечные резисторы R1, R2 поступает на двухполупериодный выпрямитель переменного напряжения, собранный на двухканальной микросхеме DA1. С выхода этой микросхемы преобразованные сигналы через цепи с фильтрующими конденсаторами C4, C5 поступают на коммутатор, выполненный на ключах DD4.1, DD4.3. Коммутатор переключается сигналами с выходов элементов DD3.1, DD3.3, работающих в инвертирующем включении. В результате его работы сигналы с левого и правого каналов поочередно поступают на неинвертирующий вход компаратора DA2.1. Стабилитроны VD1, VD2 выполняют функцию ограничителей при превышении сигналом уровня +4,9 дБ. Компаратор сравнивает входящий сигнал с образцовым напряжением, поступающим на его инвертирующий вход.

Образцовое напряжение формирует цифровоаналоговый преобразователь (ЦАП), выполненный на инверторах DD1.3...DD1.6 и резисторах R9–R16. На инверторах DD1.1, DD1.2 собран тактовый генератор, сигналы с которого поступают на двоичный счётчик DD2.1, а с его выхода старшего разряда на вход DD2.2. Каждый импульс генератора увеличивает состояние счётчика, сигналы которого поступают на ЦАП, на единицу.

Весь цикл индикации состоит из 16 ступеней. Каждой ступени соответствует определённое напряжение на входе измерителя (см. таблицу и рис. 2). Если на неинвертирующем входе компаратора DA2.1 напряжение меньше образцового – его выходное напряжение отрицательно. При этом в первый разряд регистра DD6 записывается уровень логического нуля. Сигналы синхронизации снимаются с выхода младшего разряда счётчика DD2.1. Первые же шестнадцать счётных синхроимпульсов приведут к записи выходных состо-

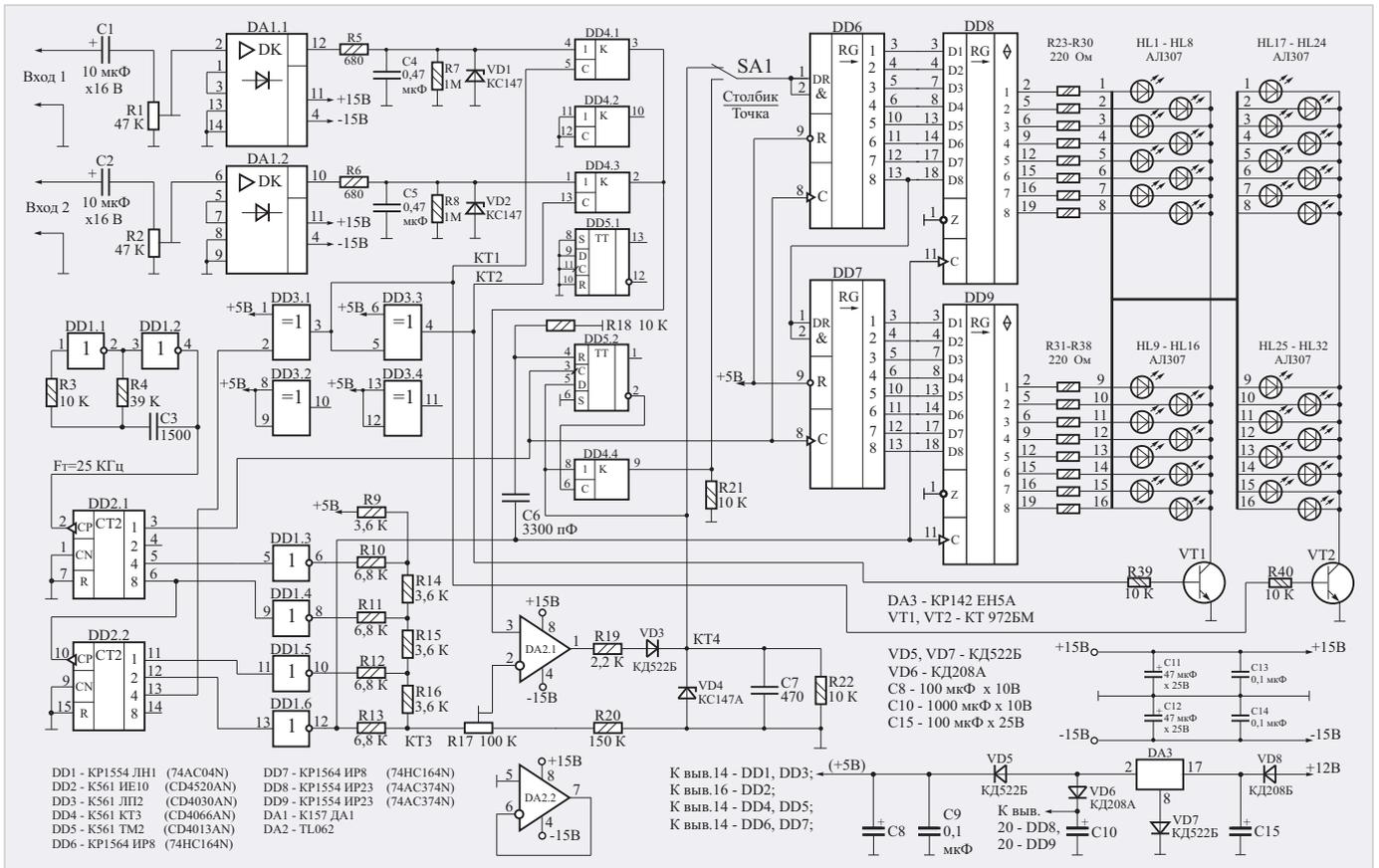


Рис. 1. Квазидигитальный измеритель уровня звуковых сигналов. Схема электрическая принципиальная

ний компаратора в регистры DD6, DD7, а положительным перепадом с выхода элемента DD1.6 состояние этих регистров будет переписано в регистры DD8, DD9 и отображаться на линейке светодиодов HL1...HL16 либо HL17...HL32. Какая светодиодная линейка будет задействована в данный момент, зависит от ключевого транзистора VT1 или VT2, открытого в данный момент времени. Управляющими для ключевых транзисторов являются сигналы с выходов элементов DD3.1 и DD3.3.

В режиме индикации столбиком переключатель SA1 находится в верхнем по схеме положении. При появлении на неинвертирующем входе компаратора напряжения с уровнем в промежутке от 220 до 480 мВ, что соответствует уровню -23,5 дБ (см. таблицу), на выходе компаратора DA2.1 сформируется положительный импульс длительностью первой и второй ступеней (рис. 3, KT4). Шестнадцатый синхроимпульс этот высокий логический уровень будет записан в первый разряд регистра DD6 и после перезаписи в регистр DD8 будет отображаться светодиодом HL1 (или HL17 в зависимости от того, на какой вход подано измеряемое напряжение).

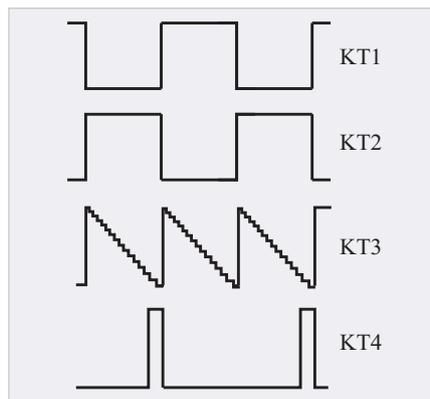


Рис. 2. Временные диаграммы

Чем больше напряжение, подаваемое на вход измерителя, тем больше длительность положительного импульса, формируемого на выходе компаратора, а значит, больше светодиодов загорается в данный момент времени.

В режиме индикации точкой переключатель SA1 находится в нижнем по схеме положении. При этом в регистр DD6 записывается только один бит информации (лог. 1) и сдвигается на необходимое число разрядов. Если на выходе компаратора будет сформирован импульс длительностью первой и второй ступеней, как в рассмотренном выше случае, уровень логической единицы поступит через ключ DD4.4

Таблица. 16 ступеней индикации и соответствующие им напряжения на входе измерителя

Обозначение на схеме	Индцируемый уровень, дБ
HL1 (HL17)	-46,5
HL2 (HL18)	-26,8
HL3 (HL19)	-17,9
HL4 (HL20)	-14,3
HL5 (HL21)	-10,7
HL6 (HL22)	-8,7
HL7 (HL23)	-6,9
HL8 (HL24)	-5,5
HL9 (HL25)	-3,7
HL10 (HL26)	-2,9
HL11 (HL27)	-1,8
HL12 (HL28)	-1
HL13 (HL29)	0
HL14 (HL30)	+0,6
HL15 (HL31)	+1,5
HL16 (HL32)	+3,9

на информационные входы регистра DD6 и на информационный вход триггера DD5.2. Первый же положительный перепад по входу «С» (вывод 3) триггера DD5.2 защёлкнет логическую единицу, и уровень логического нуля с инверсного выхода этого триггера закроет ключ

DD4.4. Во второй разряд регистра DD6, а вслед за ним и во второй разряд регистра DD8 будет записан только один бит с уровнем логической единицы. Таким образом и обеспечивается режим индикации перемещающейся точкой.

Конструкция и детали

Устройство собрано на печатной плате из двухстороннего стеклотекстолита толщиной 1,5 мм размерами 140×90 мм. В устройстве применены микросхемы серий К561, КР1564 и КР1554. Интегральный стабилизатор типа КР142ЕН5А. Компаратор выполнен на ОУ TL062. Его возможная замена TL072, TL082. В устройстве применены постоянные резисторы типа МЛТ-0,125, МЛТ-0,25. Резисторы R9–R16 должны иметь допуск $\pm 5\%$, остальные $\pm 10\%$. Подстроечные резисторы R1, R2, R17 типа СПЗ-38б. Диоды VD3, VD5, VD7 могут быть любыми кремниевыми маломощными, например, типа КД521, КД522 с любой буквой, диоды VD6, VD8 кремниевые средней мощности. Электролитические конденсаторы могут быть типа К50-35 или импортные, неполярные типа К10-17.

При налаживании индикатора необходимо проверить соответствие осциллограмм (рис. 3) в обозначенных контрольных точках (осциллограммы приведены для случая подачи на один из входов сигнала с уровнем $-23,5$ дБ). Затем следует установить номинальные уровни подстроечными резисторами R1 и R2. Для этого на оба канала подают сигнал с амплитудой 0,775 В (частота 1000 Гц) и резисторами R1 и R2 устанавливают светящуюся точку (в соответствующем режиме) на уровень 0 дБ по шкалам в обоих каналах. После этого повышают входной уровень до величины $+6$ дБ и подстройкой

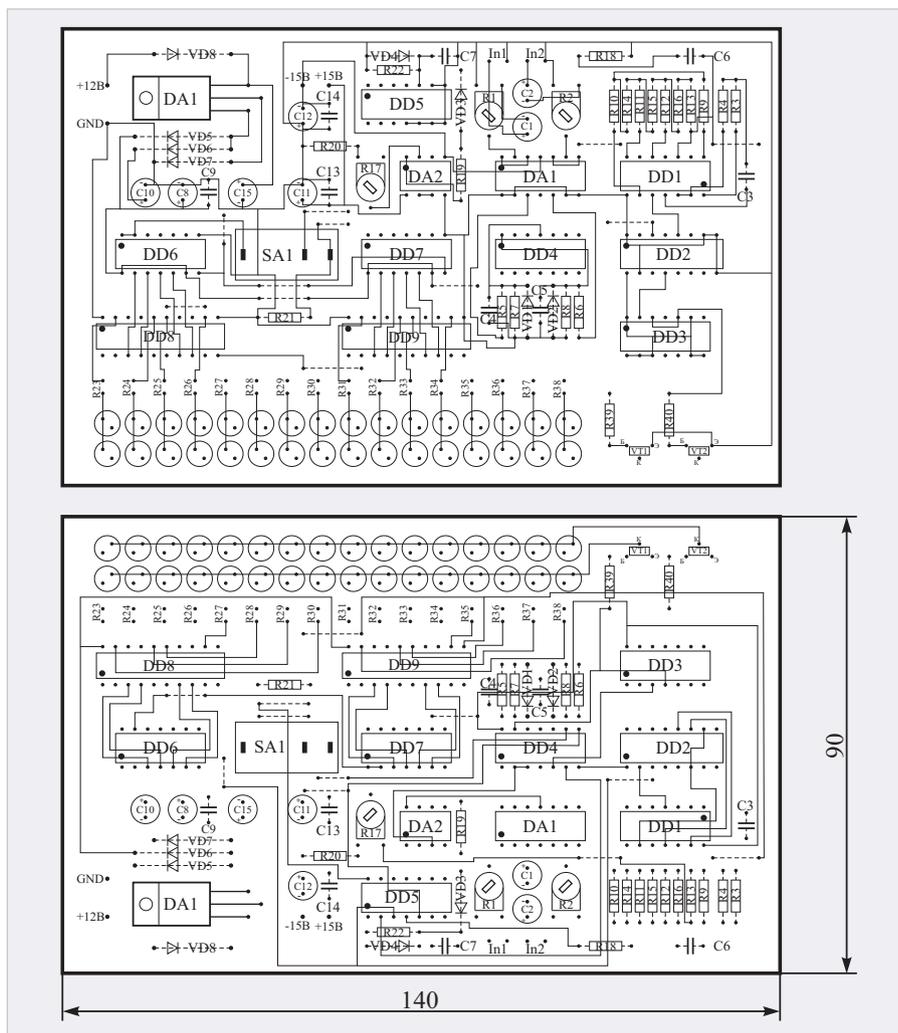


Рис. 2. Квазидигитальный измеритель уровня звуковых сигналов. Рисунок печатной платы

резистора R17 добиваются постоянного свечения сегмента $+6$ дБ индикатора.

Литература

1. Светодиодные измерители уровня сигнала // За рубежом. Радио. 1987. № 10. С. 59–60.
2. Пономаренко О., Пономаренко А. Логарифмический индикатор уровня сигнала с перемещающейся точкой // Радио. 1994. № 3. С. 16–17.

3. ГОСТ 21185-75. Измерители уровня квазидигитальные. Типы и основные параметры. Методы испытаний.
4. Неманов В.С. О времени интеграции индикаторов уровня // Вопросы радиоэлектроники. 1965. Сер. VIII, вып. 1. С. 57–63.
5. Кузнецов Э.Б. Измерители уровня звуковых сигналов // Радио. 2001. № 2. С. 16–17.



НОВОСТИ МИРА

Память HBM уже в пять раз дороже DRAM. Всё из-за огромного спроса на ускорители для ИИ

На фоне бума искусственного интеллекта возрос спрос не только на соответствующие ускорители, но и на память HBM, так как она используется в большинстве таких ускорителей.

По данным исследовательской компании Yole Group, средние отпускные цены на чипы HBM в начале 2024 года были в пять раз выше, чем на обычные чипы памяти DRAM.

Yole Group прогнозирует, что поставки HBM будут расти в среднем на 45% в год в период с 2023 по 2028 год. Цены при этом, как ожидается, останутся высокими в течение некоторого времени из-за сложности увеличения производства такой памяти.

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

В России стартовало производство электроники на новом заводе под Москвой

ИТ-холдинг Fplus запустил мощное производство электроники в Подмоскowie. Еже-

годно на новой площадке будет производиться до 500 тыс устройств, включая ноутбуки, серверы, принтеры, СХД, смартфоны и др. Сообщается, что вложения в производство превысили 1 млрд рублей. При этом площадь предприятия составляет 25 тыс. кв. м.

Сейчас на новом заводе собирают ноутбуки, серверы и принтеры. В день предприятие выпускает до 1 тыс. устройств. В перспективе Fplus планирует расширить номенклатуру: на сборку поставят планшеты, системы хранения данных, коммутаторы, моноблоки, смартфоны.

[ferra.ru](https://www.ferra.ru)

Поисковое проектирование минимально-фазовых цифровых фильтров

Владимир Бугров

Рассматриваются вопросы моделирования цифрового БИХ-фильтра в дискретном параметрическом пространстве. Проводится анализ систематических ошибок аналитического проектирования цифровых фильтров, оперирующих с фиксированной точкой. Приведена постановка задачи синтеза каскадного БИХ-фильтра поисковыми методами нелинейного математического программирования в дискретном пространстве параметров. Иллюстрируется эффективность применения данного подхода на примере целочисленного синтеза 8-битового рекурсивного минимально-фазового и линейно-фазового фильтра нижних частот. Проведено сравнение с решением аналогичных задач билинейным преобразованием аналогового прототипа в пакете MATLAB.

Введение

Интересной разновидностью цифровых фильтров являются так называемые минимально-фазовые цифровые фильтры, которые широко применяются во многих приложениях цифровой обработки сигналов. Как известно, в минимально-фазовом фильтре все нули коэффициента передачи не выходят за пределы единичной окружности в z -плоскости, что, как правило, определяет меньший порядок фильтра и меньшее время обработки сигнала в сравнении с цифровыми линейно-фазовыми фильтрами. Для многих практических приложений это может иметь существенное значение. Условие минимальной фазы может быть реализовано как в цифровых фильтрах с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ-фильтрах), так и в фильтрах с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтрах), однако рекурсивные фильтры, являясь дискретными линейными системами с обратной связью, обладают значительно большими селективными возможностями в сравнении с КИХ-фильтрами и позволяют реализовать требуемые характеристики значительно меньшей разрядностью представления данных и меньшим порядком фильтра.

Как известно, классическая методология проектирования БИХ-фильтров реального времени, в том числе и минимально-фазовых, содержит два основных этапа: аппроксимации и практической реализации фильтра. На этапе аппроксимации формируется аналитическое представление

заданной характеристики фильтра-прототипа $K^T_{(\omega)}$ тем или иным аппроксимирующим полиномом, на базе которого в дальнейшем формируется передаточная функция проектируемого цифрового фильтра. Так, аппроксимация ФНЧ по Баттерворту (рис. 1а) определяется так:

$$B_n(\omega) = 1 / (1 + \omega^{2n}).$$

Таким образом, этапу аппроксимации свойственна систематическая ошибка, которую условно можно записать так:

$$\delta_a = \max_{\omega} |K^T_{(\omega)} - B_n(\omega)|.$$

Ошибка аппроксимации весьма ограничивает возможность реализации характеристик сложной формы приемлемым порядком аппроксимирующих полиномов. Поэтому аналитическое проектирование БИХ-фильтров по аналоговому прототипу ограничивается, как известно, только набором типовых форм требуемых характеристик (ФНЧ, ФВЧ, ППФ, ПЗФ), которые могут быть аппроксимированы с минимальной ошибкой.

Основными задачами этапа практической реализации фильтра как дискретной системы реального времени является, прежде всего, выбор арифметики цифровых вычислений и приемлемой длины слова коэффициентов фильтра для их реализации заданным числом двоичных разрядов. Наиболее часто для представления переменных в алгоритмах цифровой фильтрации используется вычисления в формате с фиксированной точкой $M.N$ при $M = 0$ (где M – целая часть, N – дробная часть

числа). В двоичном представлении фиксированная точка находится справа от самого старшего бита, который является обычно и битом знака. То есть все коэффициенты цифрового фильтра являются дробными вещественными числами, принадлежащими диапазону от -1 до $1 - 2^{-(Wk-1)}$, где Wk – число битов, используемых для двоичного представления числа (включая знак). Однако заданным числом двоичных разрядов можно реализовать только дискретный ряд определенных значений коэффициентов на заданном единичном интервале. Так, 4-битовое представление в формате с фиксированной точкой (ФТ) определяет следующий ряд дискретных значений коэффициентов: $Wk: \{-1; -0,875; -0,75; -0,625; -0,5; -0,375; -0,25; -0,125; 0; 0,125; 0,25; 0,375; 0,5; 0,625; 0,75; 0,875\}$. Для 5-битового представления добавляются промежуточные значения и так далее.

Однако аналитический расчёт коэффициентов проектируемого БИХ-фильтра, например, билинейным преобразованием аналогового прототипа в пакете MATLAB, осуществляется только в непрерывном вещественном пространстве, то есть коэффициенты фильтра определяются с неограниченной точностью на единичном интервале их определения. Поэтому на стадии реализации проектируемого фильтра необходима процедура квантования вещественных его коэффициентов, которая в формате с ФТ осуществляется следующим образом: целочисленный код (квант) C_{int} вещественного неквантованного коэффициента $|C| < 1,0$ в варианте округления до ближайшего целого (round) равен целой части выражения в скобках:

$$C_{int} = \text{int}(C \cdot 2^{Wk-1} + 0,5). \quad (1)$$

Тогда вещественный квант C_{float} данного коэффициента определяется так:

$$C_{float} = C_{int} / 2^{Wk-1}, \quad (2)$$

а ошибка квантования составляет

$$\varepsilon = C - C_{float}. \quad (3)$$

Что касается промежуточных вычислений, то в формате ФТ представление результата умножения вещественных чисел конечным числом разрядов

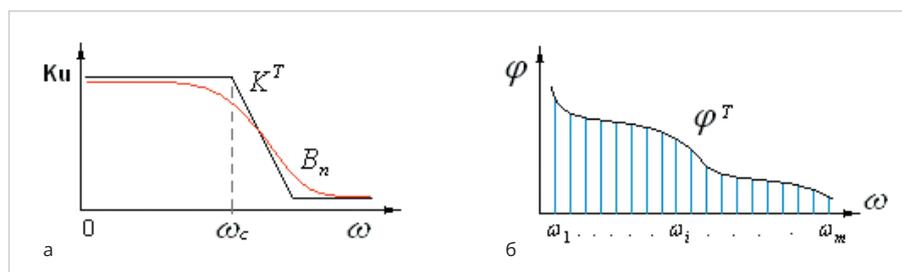


Рис. 1. Аппроксимация (а) и дискретизация (б) требуемой характеристики

носит стохастический характер и, естественно, также требует процедуры квантования, результатом которой является стохастическая ошибка ϵ_{MAC} (шум квантования). Вопросам квантования вещественных данных посвящено много работ [1–4]. В целом можно отметить, что при высоком порядке фильтра ($N > 10$) весьма существенные трудности возникают уже при квантовании вещественных коэффициентов до 10–12 бит. Для аналитических подходов ошибки квантования считаются неустраняемыми и приводят к искажению частотных характеристик цифрового фильтра, необходимости масштабирования его коэффициентов, появлению динамических шумов квантования, а также к возможности появления малых предельных циклов.

Однако ошибки аппроксимации и квантования могут быть устранены при проектировании цифрового БИХ-фильтра современными численными методами дискретного нелинейного программирования, позволяющими работать не с аналитическим, а с дискретным представлением характеристик фильтра (рис. 1б), когда как исходные требуемые, так и текущие характеристики табулированы с заданной дискретностью их представления в частотной области и в вычислительной системе представлены вещественными массивами. Это даёт возможность, с одной стороны, заменить процедуру аналитической аппроксимации простой оцифровкой требуемых частотных характеристик, причём ошибка оцифровки характеристик даже весьма сложной формы может быть минимизирована соответствующим выбором шага частотной дискретизации. С другой стороны, дискретное представление позволяет рассчитывать с заданной точностью все требуемые характеристики фильтра (включая и дисперсионные характеристики) применением численных методов. Каждая j -я характеристика фильтра, характеризующая совокупно-

стью (вектором) скалярных частотных выборок $Y_j(y_1, y_2, \dots, y_m)$, позволяет применять для синтеза технического решения эффективные поисковые методы векторной оптимизации.

Неустраняемую ошибку квантования коэффициентов также легко устранить полностью, осуществив дискретизацию и параметрического пространства коэффициентов фильтра перед его синтезом только теми значениями, при которых ошибка квантования (3) равна нулю. При этом математическое задание квантованного параметрического пространства возможно как вещественным (2), так и целочисленным кодом (1), что позволяет проектировать фильтры, использующие как вещественную, так и целочисленную арифметику вычислений и дискретизацию коэффициентов. Целочисленные цифровые фильтры (ЦЦФ) являются более универсальными и практически значимыми. Можно отметить следующие достоинства целочисленных цифровых фильтров.

1. Минимальная вычислительная сложность, так как в вычислительном алгоритме цифровой фильтрации любые операции над целочисленными операндами осуществляются значительно быстрее вещественных вычислений.

2. Целочисленные фильтры могут быть реализованы на любой цифровой платформе (MCU, DSP, FPGA) без наличия FPU (Floating Point Unit – сопроцессора) в структуре вычислителя.

3. Другим важным достоинством ЦЦФ является отсутствие процедуры квантования не только коэффициентов фильтра, но и результатов промежуточных вычислений, так как результат умножения целых чисел (например, текущего цифрового отсчёта и коэффициента фильтра) полностью детерминирован и не требует квантования для реализации на цифровой платформе с заданной разрядностью W_k представления данных. При заданной бито-

вой разрядности квантования входного сигнала W_x достаточно выделить внутренний аккумуляторный регистр с разрядностью $W_{ak} = W_x + W_k$ бит для хранения результата целочисленного «умножения с накоплением» (MAC). Колебаний переполнения, то есть возникновения больших предельных циклов, вызванных переполнением разрядной сетки регистра-аккумулятора, при таком расчёте его разрядности практически никогда не возникает. Умножение с накоплением характерно при реализации как БИХ, так и КИХ цифровых фильтров. Данной операцией определяется и производительность цифровой системы. При этом для реализации целочисленных вычислений разработано большое разнообразие умножителей как последовательного, так и параллельного типа.

4. При целочисленном описании цифровые фильтры наиболее просто реализовать без умножителей, так как из натурального параметрического множества I^n легко выделить целочисленные подмножества коэффициентов $I_s^V \subset I^n$, которые определяют замену умножителей сдвигowymi регистрами с заданным числом s сдвиговых сумматоров [5, 6].

5. Целочисленное решение легко преобразовать в вещественное квантованное решение формата ФТ, используя для этого их однозначную связь через соотношение (3).

Таким образом, при проектировании цифрового фильтра численными методами дискретного программирования осуществляется дискретизация как характеристик, так и параметров (коэффициентов) фильтра, что позволяет устранить как ошибки аппроксимации, так и ошибки квантования при практической реализации фильтра.

В данной статье рассматриваются вопросы дискретного моделирования рекурсивных каскадных фильтров, а также постановка и решение задачи синтеза по селективному и фазовому критериям в целочисленном пространстве коэффициентов как минимально-фазовых, так и линейно-фазовых БИХ-фильтров.

Целочисленная модель каскадного БИХ-фильтра

В настоящее время построение как БИХ-, так и КИХ-фильтров в форме каскадного соединения звеньев второго порядка на практике используется наиболее часто. Передаточная функция

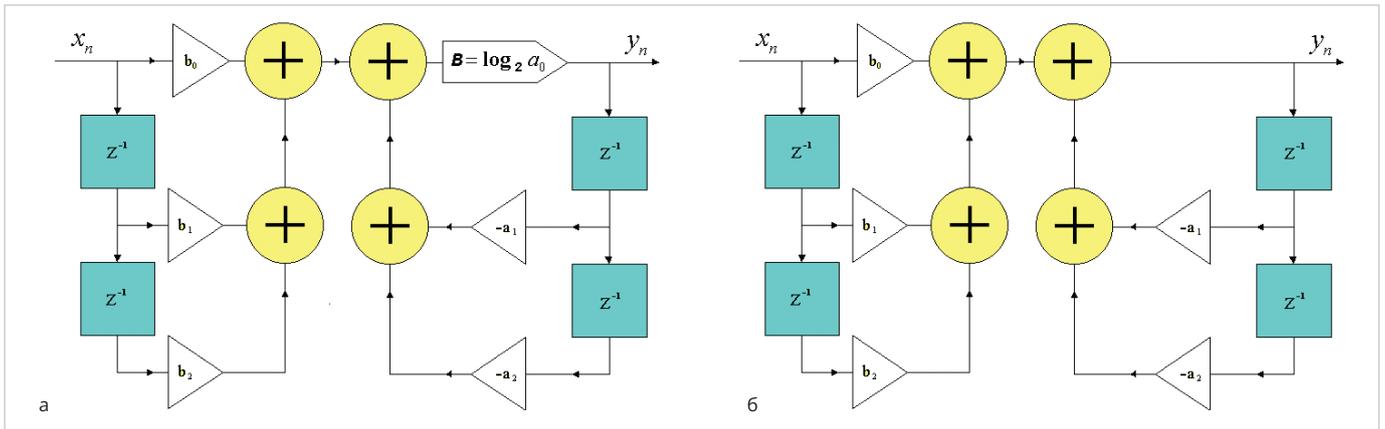


Рис. 2. Структура целочисленного (а) и вещественного (б) звена 2-го порядка

для рекурсивного ЦЦФ, состоящего из каскадного соединения m -звеньев второго порядка ($m = N/2$, где N – общий порядок фильтра), имеет следующий вид:

$$H(z) = \prod_{i=1}^m \frac{b_{0i} + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}}{a_{0i} + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}}, \quad (4)$$

где комплексная переменная z при переходе к описанию частотной характеристики $K(e^{j\omega T}) = |K(e^{j\omega T})| \cdot e^{j\varphi(\omega T)}$ принимает значение $z = e^{j\omega T}$, где T – период дискретизации.

Все коэффициенты передаточной функции (4) квантованы целочисленным её квантом (1), а их интервал изменения определяется заданной длиной битового слова (разрядностью) коэффициентов фильтра. Из соотношения (4) легко получается разностное уравнение для одного звена целочисленного фильтра:

$$y_n = (b_0x_n + b_1x_{n-1} + b_2x_{n-2} - a_1y_{n-1} - a_2y_{n-2})/a_0, \quad (5)$$

где x_n, y_n – целочисленные входная и выходная временные последовательности, a_0 – нормирующий коэффициент power-of-two:

$$a_{0i} \in \{2^q\}, q = 0, W_k - 1 \quad i = \overline{1, m}. \quad (6)$$

На рис. 2а приведена типичная структура звеньев рекурсивного целочисленного фильтра, соответствующая разностному уравнению (5). Как видно, при вычислении отклика фильтра кроме традиционных операций сложения, умножения и задержки на такт присутствует операция сдвига на $B = \log_2 a_0$ бит, с помощью которой реализуется целочисленное деление на нормирующий power-of-two коэффициент.

Для рекурсивного вещественного квантованного фильтра в каскадной форме построения передаточная функция имеет следующий вид:

$$H(z) = \prod_{i=1}^m \frac{b_{0i} + b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}}{1 + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}}, \quad (7)$$

а разностное уравнение звена выглядит так:

$$y_n = b_0x_n + b_1x_{n-1} + b_2x_{n-2} - a_1y_{n-1} - a_2y_{n-2}.$$

Здесь все значения коэффициентов задаются на единичном интервале их изменения вещественным квантованным значением (2). Структура звеньев прямой формы рекурсивного каскадного фильтра представлена на рис. 2б.

Условие устойчивости проектируемого БИХ-фильтра можно представить так:

$$|Zp_i| < r_{pole}^{max} < 1, \quad (8)$$

где r_{pole}^{max} – допустимый максимальный радиус полюсов передаточной функции фильтра в z -плоскости, при котором предельные циклы в рекурсивной системе не возникают.

Малые предельные циклы возникают, как известно, когда при отсутствии сигнала на входе амплитуда выходного сигнала затухает, но из-за вычислительных погрешностей не доходит до нуля, принимая зачастую колебательный характер. Возможность их возникновения возрастает с увеличением порядка рекурсивного фильтра и во многом определяется добротностью полюсов его передаточной функции (4), (7). В настоящее время провести теоретический анализ, расчёт предельных циклов непросто даже для БИХ-фильтров малого порядка. Поэтому действенной, а порой и единственной альтернативой является практическая реализация синтезированного фильтра на конкретной цифровой платформе (MCU, DSP или FPGA) и экспериментальный анализ амплитуды выходного сигнала при нулевом входе. В том же

случае, когда предельный цикл наблюдается, действенной мерой его устранения является проведение повторного синтеза фильтра под меньшую допустимую добротность его полюсов. А так как добротность полюсов пропорциональна их радиусу в z -плоскости, то достаточно задать меньшее значение допустимого радиуса полюсов передаточной функции в интервале условия (8) и вновь синтезировать фильтр.

При синтезе минимально-фазовых БИХ-фильтров аналогичное условие, как уже сказано, должно выполняться и для нулей коэффициента передачи

$$|Zz_j| < r_{zero}^{max} < 1, \quad (9)$$

где r_{zero}^{max} – допустимый максимальный радиус нулей в z -плоскости.

Синтез методами дискретного нелинейного программирования позволяет реализовать любое значение максимальных радиусов как полюсов, так и нулей коэффициента передачи при решении конкретной проектной задачи [7, 8]. Как показала практика, при синтезе с меньшим значением максимального радиуса полюсов практически всегда удаётся получить проектное решение без предельных циклов того или иного рода, хотя селективная способность рекурсивного фильтра при этом, естественно, снижается. Синтез со значением максимального радиуса нулей в интервале (9) позволяет получать различные варианты минимально-фазовых фильтров.

Как известно, в каскадных формах построения цифровых фильтров необходима процедура масштабирования сигнала, то есть равномерной раскладки усиления по каскадам. Это позволяет фильтру работать в широком динамическом диапазоне входных сигналов. Однако расчёт такого

масштабирования ЦЦФ гораздо легче осуществлять не стандартным применением L_p -нормы, а прямым введением требования обеспечения малого разброса коэффициентов передачи отдельных звеньев при дискретном синтезе фильтра [7]. Как показывает практика, существенного сужения динамического диапазона не происходит, если максимальные коэффициенты передачи его каскадов различаются не более чем в 3–5 раз. При более грубом покаскадном масштабировании сужение динамического диапазона фильтра становится заметным. Формально требования масштабирования сигнала записываются двусторонними функциональными ограничениями (15) экстремальной задачи дискретного синтеза.

Постановка задачи дискретного программирования

В общем виде задачу целочисленного нелинейного программирования (ЦНП) при машинном синтезе каскадного БИХ-фильтра с заданной разрядностью W_k представления коэффициентов можно записать так:

$$F^o(\mathbf{IX}^o) = \min F(\mathbf{IX}) \quad \mathbf{IX} \in I^{5m}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} -2^{W_k-1} < a_{di} < 2^{W_k-1} \quad d = \overline{1, 2} \quad i = \overline{1, m}, \\ -2^{W_k-1} < b_{di} < 2^{W_k-1} \quad d = \overline{0, 2} \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$a_{0i} \in \{2^q\}, \quad q = \overline{0, W_k-1} \quad i = \overline{1, m}, \quad (12)$$

$$|Zp_i| < r_{pole}^{\max} < 1 \quad i = \overline{1, m}, \quad (13)$$

$$|Zz_i| < r_{zero}^{\max} < 1 \quad i = \overline{1, m}, \quad (14)$$

$$K_i^{\min} \leq |K_i(e^{j\omega})| \leq K_i^{\max} \quad i = \overline{1, m}, \quad (15)$$

где m – число звеньев (каскадов) второго порядка, d – индекс коэффициента передаточной функции звена (4), \mathbf{IX} – вектор многомерного пространства квантованных целочисленных коэффициентов, $F(\mathbf{IX})$ – целевая функция, K_i^{\min} , K_i^{\max} – допустимые границы изменения коэффициента передачи i -го звена фильтра.

Как видно, экстремальная задача синтеза (10) записана относительно целочисленного пространства I^{5m} параметров (квантованных коэффициентов фильтра) размерностью $5m$. Прямые ограничения (11) задают границы их изменения, функциональные ограничения (13) контролируют в процессе синтеза условие устойчивости рекурсивного фильтра по всем полюсам коэффициента передачи с радиусами, не превышающими r_{pole}^{\max} , а ограничения (14) контролируют в процессе синтеза нули коэффициен-

та передачи при синтезе минимально-фазовых вариантов БИХ-фильтров. Ограничения (15) масштабируют коэффициенты передачи звеньев в заданный интервал. В алгоритме минимизации реализация функциональных ограничений осуществляется применением штрафных функций [9, 10].

Численное решение экстремальной задачи (10) в квантованном пространстве коэффициентов формата ФТ возможно только применением сеточных алгоритмов поисковой минимизации, когда дискретность сетки поиска задаётся числом двоичных разрядов W_k , которыми в кодовом пространстве отображается каждая i -я переменная. Этим требованиям вполне отвечает поисковый алгоритм глобальной минимизации полимодальных целевых функций на детерминированной сетке [7, 10]. Построение минимизирующей последовательности на дискретной сетке формата ФТ в данном алгоритме осуществляется при помощи так называемых сфер поиска с изменяющимися радиусами. Таким образом, при последовательном автоматическом расширении и сужении сфер поиска происходит направленное сканирование всей дискретной области поиска без полного её перебора. Характерными особенностями данного поискового алгоритма является высокая надёжность отделения глобального экстремума, малые потери на поиск, эффективная работа в пространстве высокой размерности, а также отсутствие априори настраиваемых параметров.

Многофункциональное задание целевой функции в проектных задачах обычно формируется в виде взвешенной суммы частных целевых функций $f_i(\mathbf{IX})$, которые определяют выполнение функциональных требований по той или иной частотной характеристике фильтра:

$$F(\mathbf{IX}) = \sum_i \beta_i \cdot f_i(\mathbf{IX}).$$

Коэффициент β_i задаёт значимость (вес) характеристики. Сами частные целевые функции $f_i(\mathbf{IX})$ наиболее часто формируют по критерию минимума среднеквадратичного отклонения

$$f_i(\mathbf{IX}) = \sqrt{\frac{1}{p} \cdot \sum_{n=1}^p [Y_n(\mathbf{IX}) - Y_n^T]^2}, \quad (16)$$

где $Y_n(\mathbf{IX})$ – текущее значение характеристики фильтра на n -й дискретной частоте диапазона определения, а Y_n^T – требуемое значение частотной характеристики фильтра.

В некоторых случаях для формирования частных целевых функций используется и критерий максимальной ошибки

$$f_i(\mathbf{IX}) = \max |Y_n(\mathbf{IX}) - Y_n^T|. \quad (17)$$

Вектор \mathbf{IX}^o , n минимизирующий скалярную полимодальную целевую функцию $F(\mathbf{IX})$ на допустимом дискретном множестве (11), является Парето-эффективным решением задачи ЦНП-синтеза целочисленного фильтра по совокупности противоречивых характеристик.

Следует отметить, что, в отличие от классического аналитического расчёта по аналоговому прототипу, поисковое проектирование является, безусловно, интеллектуальным процессом. Множество сценариев решения сложной проектной задачи может быть предложено, много специфических приёмов и навыков может быть применено опытным проектировщиком-поисковиком для успешного решения сложной задачи [7, 8]. Очевидно, что прямой сценарий решения сразу в многомерном пространстве параметров минимальной разрядности коэффициентов малоэффективен и не приведёт к приемлемому результату. Только в относительно простых задачах синтеза фильтров низкого порядка ($N \leq 10$) удовлетворительное решение может быть получено подобным образом. Типовым же сценарием поискового синтеза каскадных фильтров высокого порядка является сценарий динамического программирования как последовательность поисковых задач с поэтапным повышением порядка проектируемого фильтра. На первом, стартовом этапе используют структуру низкого порядка (4-го или 6-го, не выше). Естественно, выполнение совокупных требований таким фильтром будет низким. При этом для повышения надёжности отделения глобального экстремума в пакете ЦНП-синтеза на стартовом этапе желательно использовать максимальную или непрерывную модель поиска (рис. 3). На втором этапе уже данное решение используется в качестве исходного. Порядок фильтра при этом повышают добавлением ещё одного звена второго порядка, обычно путём дублирования найденных ранее коэффициентов одного из звеньев (что в пакете синтеза может делаться автоматически). После нескольких подобных итераций и определяется итоговый порядок проектируемого фильтра, при котором погрешность выполне-

ния сложных совокупных требований лежит в пределах заданного допуска.

В качестве примеров рассмотрим дискретный синтез рекурсивных ЦЦФ по критериям селективных требований фильтра нижних частот (ФНЧ) в минимально-фазовом и линейно-фазовом вариантах проектируемого БИХ-фильтра.

Синтез рекурсивного минимально-фазового ФНЧ

Дискретный синтез 8-битового минимально-фазового ФНЧ десятого порядка в целочисленном пространстве квантованных параметров осуществлялся согласно следующим спецификациям.

1. Полоса пропускания фильтра 0–1600 Гц
2. Коэффициент передачи в полосе пропускания 0 дБ с допуском ± 0,25 дБ
3. Переходная полоса 1600–2300 Гц
4. Уровень подавления на частотах выше 2300 Гц не менее 30 дБ
5. Фазовая нелинейность в полосе пропускания не выше 20°
6. Длина слова коэффициентов W_k – 8 бит, включая знак
7. Порядок рекурсивного фильтра: 10
8. Максимально допустимый радиус полюсов: 0,95
9. Максимально допустимый радиус нулей: 0,99
10. Частота дискретизации 10 кГц
11. Масштабирование коэффициентов передачи звеньев в интервал {0,9–5,0}

При синтезе БИХ-фильтра с требованиями фазовой линейности или, что то же самое, с постоянным временем группового запаздывания (ГВЗ) в полосе пропускания фильтра, целевая функция формировалась в виде взвешенной суммы двух частных целевых функций $f_{АЧХ}(IX)$ и $f_{ГВЗ}(IX)$, обеспе-

чивающих соответственно выполнение требований как к амплитудной селективности фильтра (рис. 4), так и к минимальной неравномерности его ГВЗ (рис. 5):

$$F(I\mathbf{X}) = \beta_1 f_{АЧХ}(I\mathbf{X}) + \beta_2 f_{ГВЗ}(I\mathbf{X}), \quad (18)$$

где частная целевая функция $f_{ГВЗ}(I\mathbf{X})$ определяется максимальным отклонением ГВЗ фильтра от требуемого значения τ^T в полосе пропускания фильтра $f_{ГВЗ}(I\mathbf{X}) = \Delta\tau_{MAX} = \max |\tau(I\mathbf{X}) - \tau^T|$, (19) а целевая функция $f_{АЧХ}(I\mathbf{X})$ задавалась среднеквадратичной ошибкой (16) выполнения требований к АЧХ фильтра при одинаковой значимости требований к АЧХ и ГВЗ фильтра ($\beta_1 = \beta_2$).

Относительно целевой функции (18) задача целочисленного программирования для многофункционального синтеза минимально-фазового 8-битового ФНЧ в форме каскадного соединения 5 звеньев прямой формы второго порядка записывалась так:

$$F^o(I\mathbf{X}^o) = \min F(I\mathbf{X}) \quad I\mathbf{X} \in I^{25} \quad (20)$$

$$-128 < a_i, b_i < 128 \quad i = \overline{1,5}, \quad (21)$$

$$a_{0i} = 128 \quad i = \overline{1,5}, \quad (22)$$

$$|Zp_i| < 0,95, \quad (23)$$

$$|Zz_j| < 0,98, \quad (24)$$

$$1,0 \leq K_i(e^{j\omega T}) \leq 3,0 \quad i = \overline{1,5}. \quad (25)$$

Таким образом, минимизация целевого функционала осуществлялась на 25-мерном целочисленном пространстве 8-битовых параметров в допустимой области (21) при выполнении функциональных ограничений устойчивости фильтра (23) по всем полюсам передаточной функции с радиусами, не превышающими 0,95 в z-плоскости, и всем нулям (24) с радиусами, не превышающими 0,98. Двусторонние ограничения (25) определяли масштабирование коэффициентов передачи звеньев фильтра в заданный интервал.

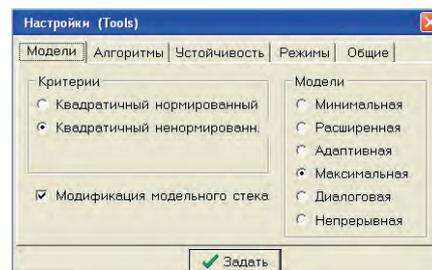


Рис. 3. Панель настроек пакета синтеза

Для ввода структуры проектируемого фильтра в программу используем встроенный топологический редактор ЦНП-пакета [7], позволяющий сформировать файл исходных данных к решению конкретной задачи синтеза с указанием порядка фильтра, числа варьируемых коэффициентов, их начальных значений и границ изменения, а также возможного дублирования коэффициентов в случае необходимости.

В табл. 1 приведены оптимальные значения целочисленных 8-битовых коэффициентов передаточной функции минимально-фазового ЦЦФ, а графики его частотных характеристик представлены на рис. 6.

Таблица 1. Оптимальные коэффициенты 8-битового ФНЧ

Звено фильтра	Коэффициенты передаточной функции фильтра					Усиление звена K_{max}
	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	
1	-34	-10	-97	5	42	1,0
2	0	-68	-90	32	31	1,5
3	-113	54	97	32	16	2,4
4	-6	-71	-79	-58	-8	2,8
5	-101	103	47	-7	41	1,5

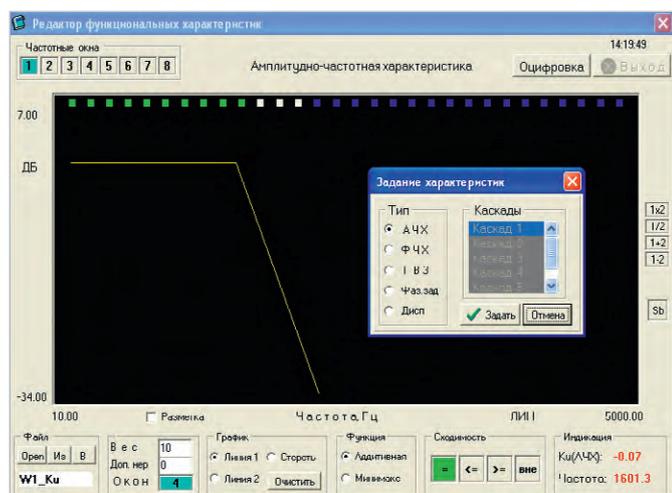


Рис. 4. Ввод требуемой АЧХ фильтра нижних частот

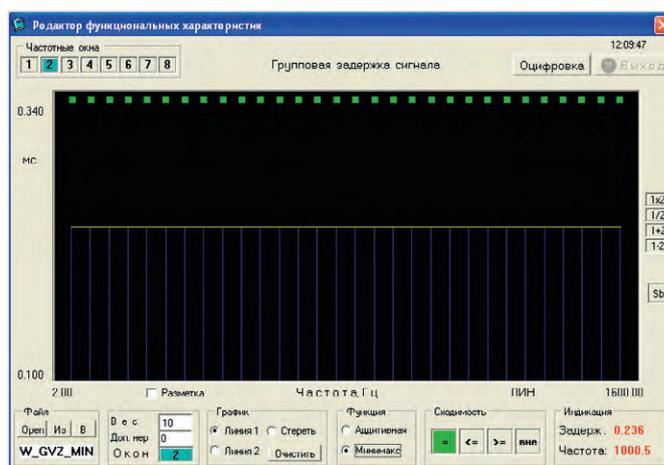


Рис. 5. Ввод и оцифровка требований по ГВЗ в полосе пропускания фильтра

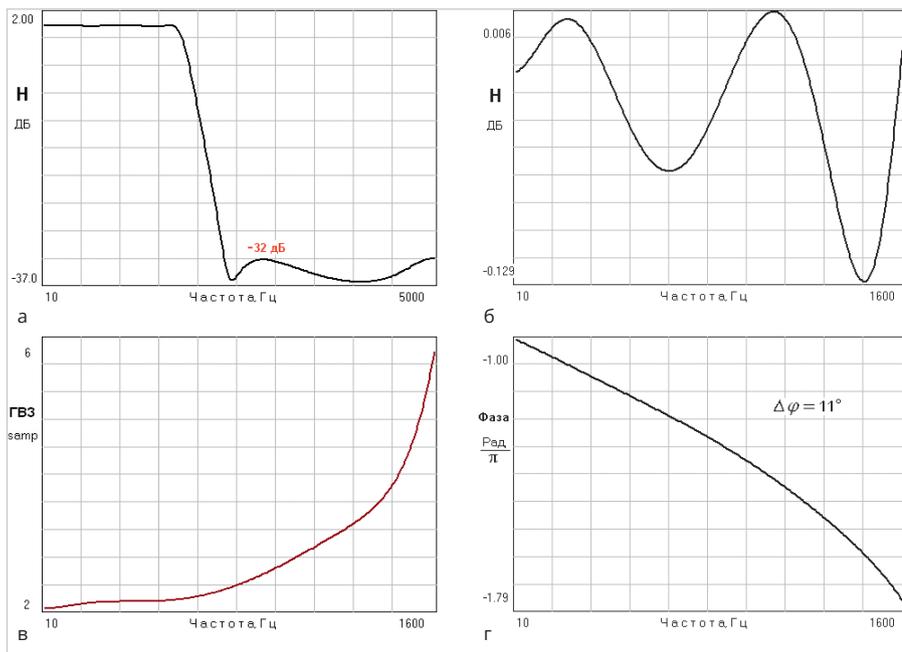


Рис. 6. Частотные характеристики ФНЧ: а) АЧХ по синтезу; б) неравномерность АЧХ в полосе пропускания; в) ГВЗ в полосе пропускания; г) ФЧХ в полосе пропускания

Таблица 2. Оптимальные вещественные коэффициенты 8-битового ФНЧ

Звено фильтра	Коэффициенты передаточной функции				
	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
1	-0,2656250	-0,0781250	-0,7578125	0,0390625	0,3281250
2	0,0000000	-0,5312500	-0,7031250	0,2500000	0,2421875
3	-0,8828125	0,4218750	0,7578125	0,2500000	0,1250000
4	-0,0468750	-0,5546875	-0,6171875	-0,4531250	-0,0625000
5	-0,7890625	0,8046875	0,3671875	-0,0546875	0,3203125

В данном случае неравномерность АЧХ в полосе пропускания 8-битового ФНЧ была равна $\Delta K = 0,23$ дБ, а нелинейность ФЧХ составляла 11 градусов, что характерно для широкополосных минимально-фазовых как рекурсивных, так и нерекурсивных дискретных цифровых систем.

Исследуем профиль целевого функционала в точке целочисленного оптимума (табл. 1) путём построения его координатных разрезов. Графики разрезов подтверждают, что целевые функции в задачах многофункционального синтеза ЦЦФ имеют сложный, полимодальный характер. Дискретная минимизация таких функций является весьма непростой задачей. Тем не менее разработанный программно-алгоритмический поисковый комплекс пакета ЦНП-синтеза успешно справился с этой задачей, показав высокую надёжность и эффективность.

Практическая реализация фильтра осуществлялась на многофункци-

ональном микроконтроллере MSP430 фирмы Texas Instruments с целочисленным RISC-ядром. Отличительными особенностями данного микроконтроллера является его низкое энергопотребление, невысокая стоимость, а также возможность только целочисленных вычислений. Измерение частотных характеристик фильтра осуществляется на реальном сигнале с помощью автоматизированной панорамной измерительной системы, разработанной в среде виртуальных приборов LabVIEW. Экспериментальные графики частотных характеристик фильтра на всём интервале Найквиста для частоты дискретизации $f_s = 2$ кГц приведены на рис. 7.

Анализ выходного сигнала при нулевом входе показал, что предельные циклы того или иного рода при максимальном радиусе полюсов 0,91 в синтезированном целочисленном ФНЧ отсутствуют.

Вариант вещественных коэффициентов формата 8.7 по данной задаче при-

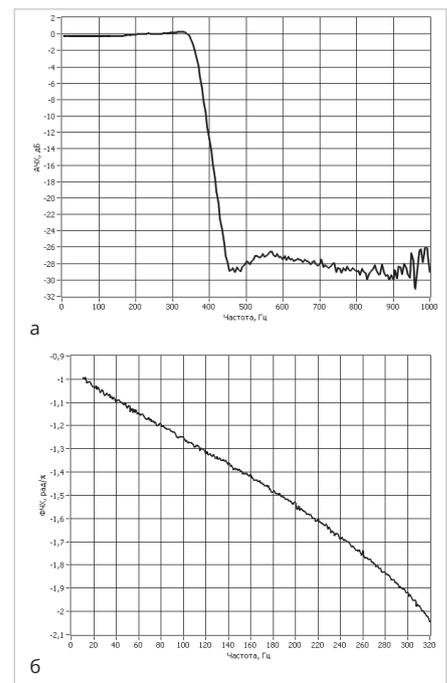


Рис. 7. Экспериментальные измерения АЧХ (а) и ФЧХ в полосе пропускания (б)

ведён в табл. 2. Квантованные вещественные коэффициенты получены из целочисленных с помощью соотношения (2), определяющего их однозначное соответствие. Контрольный анализ характеристик по квантованным 8-битовым вещественным коэффициентам осуществлялся уже в пакете MATLAB. На рис. 8а – рис. 8в приведены частотные характеристики, а на рис. 8г – импульсная характеристика рекурсивного минимально-фазового БИХ-фильтра.

Как видно, анализ в пакете MATLAB полностью подтверждает синтезированные характеристики минимально-фазового БИХ-фильтра. На рис. 9 приведено распределение полюсов и нулей передаточной функции в z-плоскости. Видно, что полюса передаточной функции не выходят за границы (23) допустимого по синтезу максимального радиуса, а нули лежат внутри единичной окружности в z-плоскости. Это подтверждает, что синтезированный фильтр является минимально-фазовой дискретной системой. Таким образом, все функциональные требования при ЦНП-синтезе 8-разрядного ФНЧ десятого порядка были выполнены.

Любопытно сравнить решение, полученное ЦНП-синтезом, с классическим решением данной задачи билинейным преобразованием аналогового прототипа в пакете MATLAB, используя аппроксимацию требуемой АЧХ фильтра-прототипа по Чебышеву-2.

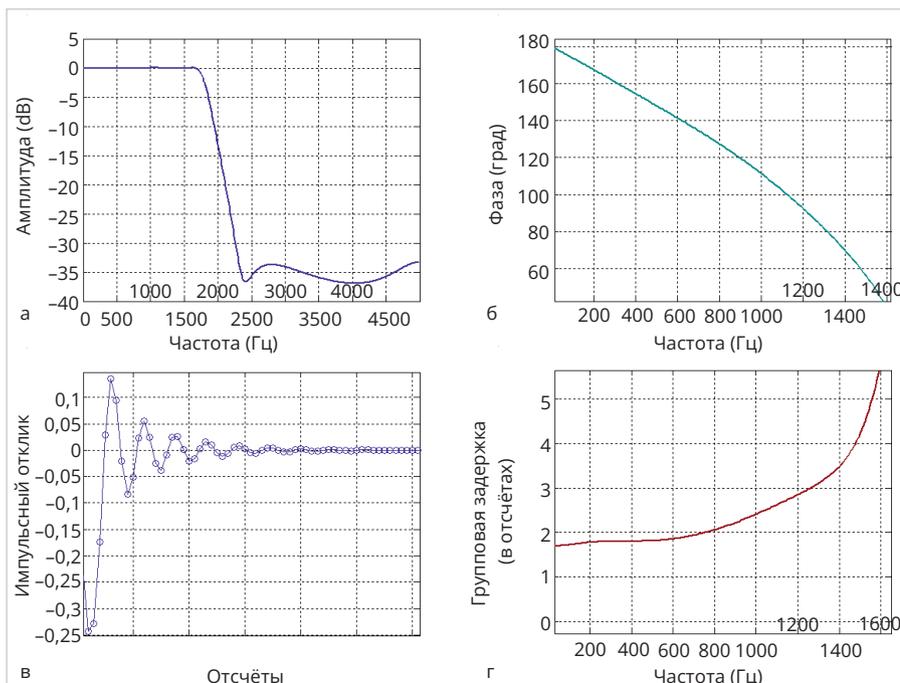


Рис. 8. Частотные характеристики: а) АЧХ; б) ФЧХ в полосе пропускания; в) импульсная характеристика; г) ГВЗ в полосе пропускания

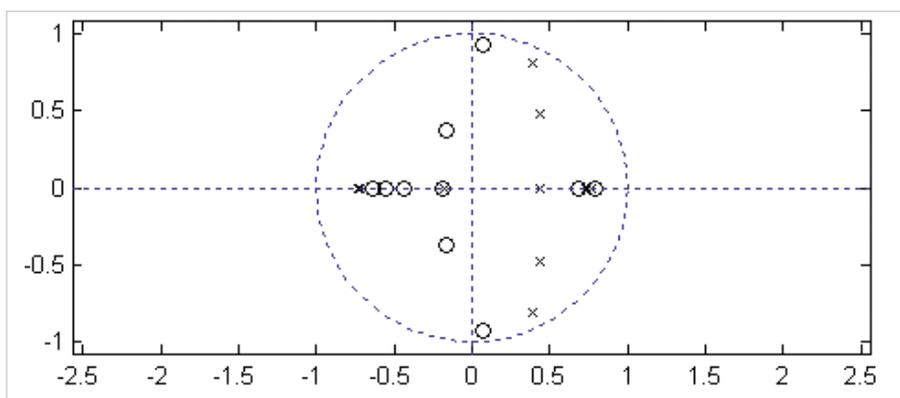


Рис. 9. Распределение полюсов и нулей в z-плоскости

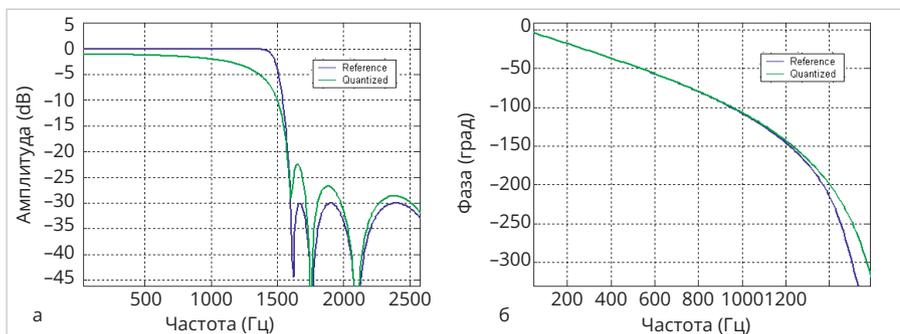


Рис. 10. Частотные характеристики фильтра: а) АЧХ; б) ФЧХ в полосе пропускания

На рис. 10 приведены характеристики по классическому синтезу рекурсивного ФНЧ десятого порядка с квантованием коэффициентов до 8 бит, а на рис. 11 – распределение его нулей и полюсов в z-плоскости для неквантованных коэффициентов.

Видно, что при квантовании до 8 бит частотные характеристики рекурсив-

ного ФНЧ 10-го порядка полностью не соответствуют спецификациям, а фазовая нелинейность превышает 70 градусов, что определяет чрезвычайно высокие дисперсионные искажения в полосе пропускания фильтра. Фазовые искажения очевидно меньше в варианте дискретного синтеза при распределении нулей как на, так и внутри

единичной окружности в z-плоскости (рис. 8б, рис. 9). Однако лучшим вариантом обеспечения фазовой линейности в заданной полосе пропускания является вариант синтеза со свободным распределением нулей коэффициента передачи в z-плоскости, что вполне возможно реализовать методами дискретного нелинейного программирования. Покажем это на конкретном примере.

Синтез линейно-фазового рекурсивного ФНЧ

Синтез 8-битового линейно-фазового ФНЧ десятого порядка в целочисленном пространстве квантованных коэффициентов осуществлялся согласно приведённым выше спецификациям по синтезу минимально-фазового ФНЧ за исключением ограничений на распределение нулей коэффициента передачи БИХ-фильтра в z-плоскости. Целевые требования также определялись соотношениями (18) и (19) к амплитудной селективности и постоянству ГВЗ линейно-фазового фильтра в полосе пропускания.

Таким образом, относительно целевой функции (18) задача целочисленного программирования для многофункционального синтеза рекурсивного 8-битового ФНЧ в форме каскадного соединения 5 звеньев прямой формы второго порядка записывалась так:

$$F^o(\mathbf{IX}^o) = \min F(\mathbf{IX}) \quad \mathbf{IX} \in I^{25} \quad (26)$$

$$-128 < a_i, b_i < 128 \quad i = \overline{1,5}, \quad (27)$$

$$a_{0i} = 128 \quad i = \overline{1,5}, \quad (28)$$

$$|Z_{pj}| < 0,95, \quad (29)$$

$$0,9 \leq K_i(e^{j\omega T}) \leq 5,0 \quad i = \overline{1,5}. \quad (30)$$

Время решения этой задачи на стандартном персональном компьютере не превышало 10 мин при использовании в качестве стартовой точки минимально-фазового решения. В табл. 3 приведены оптимальные значения целочисленных 8-битовых коэффициентов передаточной функции линейно-фазового ФНЧ, а в табл. 4 – их вещественный вариант.

Оптимальные коэффициенты с помощью m-файла загружались в пакет MATLAB для анализа характеристик синтезированного каскадного 8-битового БИХ-фильтра во временной и частотной области (рис. 12). Как видно, требования амплитудной селективности при квантовании коэффициентов до 8 бит были полностью выполнены, причём неравномерность АЧХ в полосе пропускания ФНЧ не превыша-

ла 0,2 дБ при фазовой нелинейности менее одного градуса. Масштабирование каскадного фильтра осуществлено в заданном интервале, а Z-диаграмма (рис. 13) подтверждает свободное распределение нулей коэффициента передачи фильтра в z-плоскости, что и позволило обеспечить линейность его фазочастотной характеристики.

Практическая реализация фильтра в целочисленном варианте на МК MSP430F1611 полностью подтвердила синтезированные характеристики (рис. 14).

Анализ выходного сигнала при нулевом входе показал, что предельные циклы того или иного рода при максимальном радиусе полюсов 0,91 в синтезированном ЦЦФ также отсутствуют. Таким образом, все функциональные требования по синтезу 8-рядного линейно-фазового ФНЧ были выполнены.

Сопоставляя результаты дискретного синтеза рекурсивного минимально-фазового и линейно-фазового ФНЧ, можно отметить, что при квантовании коэффициентов до 8 бит характеристики фильтров вполне соответствуют требуемым спецификациям, однако у минимально-фазового фильтра среднее время групповой задержки (4 семпла) существенно меньше, чем у линейно-фазового варианта (почти 13 семплов), что позволяет существенно уменьшить инерционность минимально-фазовой системы реального времени, сократить время расчёта отклика фильтра. Негативным же фактором является возрастание нелинейности фазочастотной характеристики минимально-фазового БИХ-фильтра вследствие существенного ограничения радиусов нулей его передаточной функции.

Обсуждение результатов

Методы дискретного нелинейного программирования в приложении к задачам проектирования линейных цифровых фильтров являются современной и перспективной альтернативой традиционным методам синтеза. Классическое проектирование базируется, как известно, на аналитическом представлении функциональных зависимостей, начиная с аналитической аппроксимации требуемой частотной характеристики фильтра, что, естественно, приводит к чрезвычайной сложности аналитических вычислений даже в относительно простых

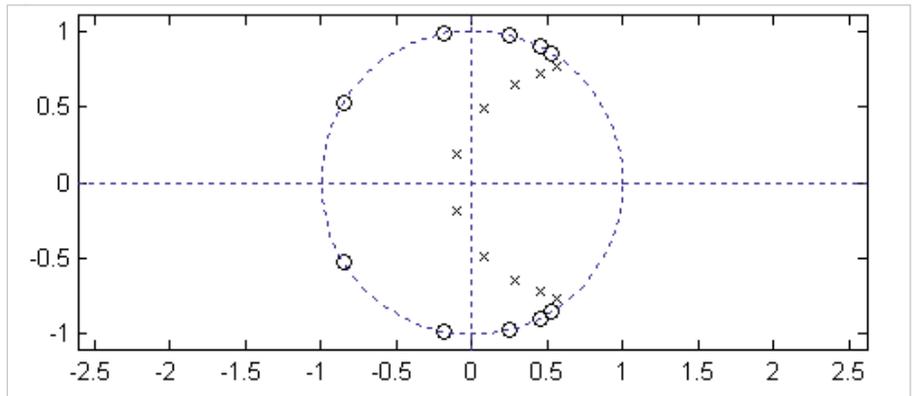


Рис. 11. Распределение полюсов и нулей в z-плоскости

Таблица 3. Оптимальные целочисленные коэффициенты линейно-фазового ФНЧ

Звено фильтра	Коэффициенты передаточной функции фильтра					Усиление звена K_{max}
	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	
1	-87	105	18	-5	-91	4,9
2	-108	67	-72	8	-72	1,8
3	-120	40	2	12	-57	0,9
4	-127	42	59	-119	-2	1,6
5	-123	28	-21	51	-60	0,9

Таблица 4. Оптимальные вещественные коэффициенты линейно-фазового ФНЧ

Звено фильтра	Коэффициенты передаточной функции				
	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2
1	-0,6796875	0,8203125	0,1406250	-0,0390625	-0,7109375
2	-0,8437500	0,5234375	-0,5625000	0,0625000	-0,5625000
3	-0,9375000	0,3125000	0,0156250	0,0937500	-0,4453125
4	-0,9921875	0,3281250	0,4609375	-0,9296875	-0,0156250
5	-0,9609375	0,2187500	-0,1640625	0,3984375	-0,4687500

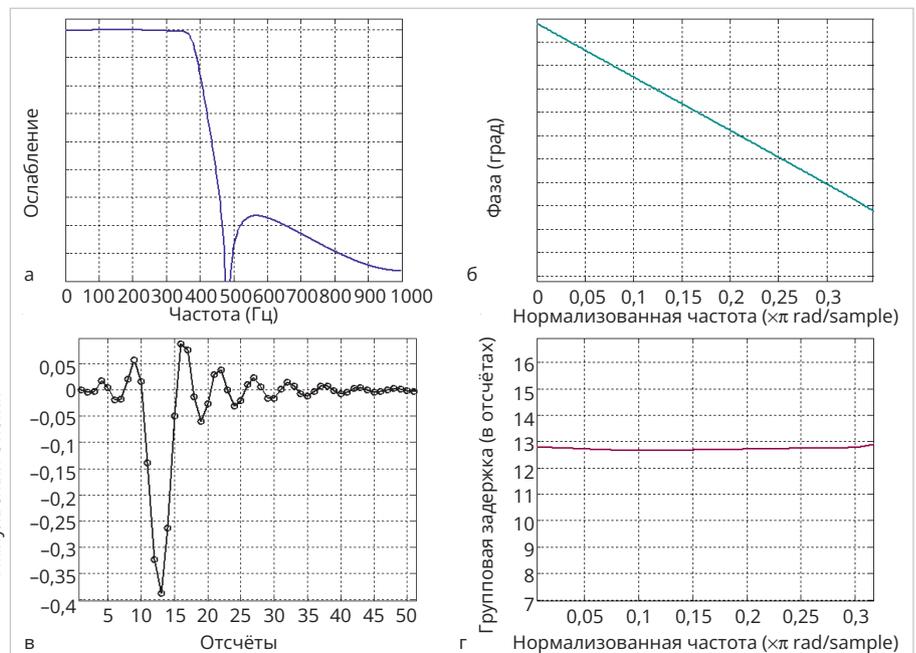


Рис. 12. Частотные характеристики линейно-фазового ФНЧ: а) АЧХ; б) ФЧХ в полосе пропускания; в) импульсная характеристика; г) ГВЗ в полосе пропускания

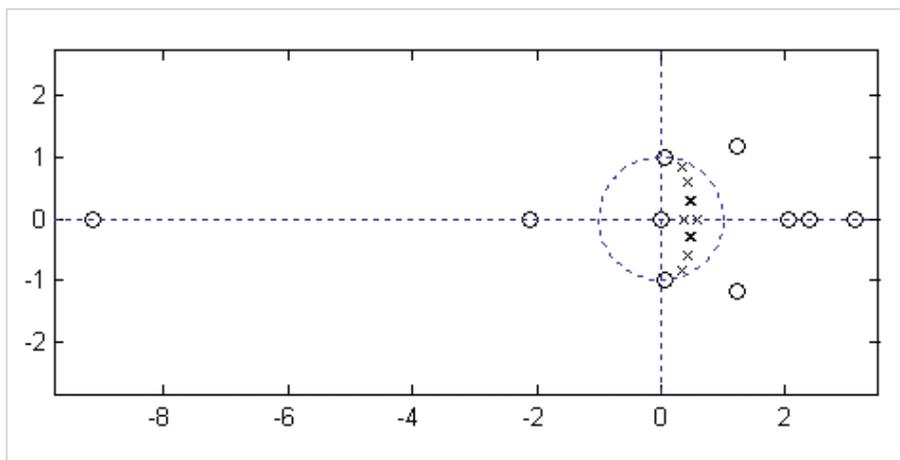


Рис. 13. Карта полюсов и нулей в z-плоскости

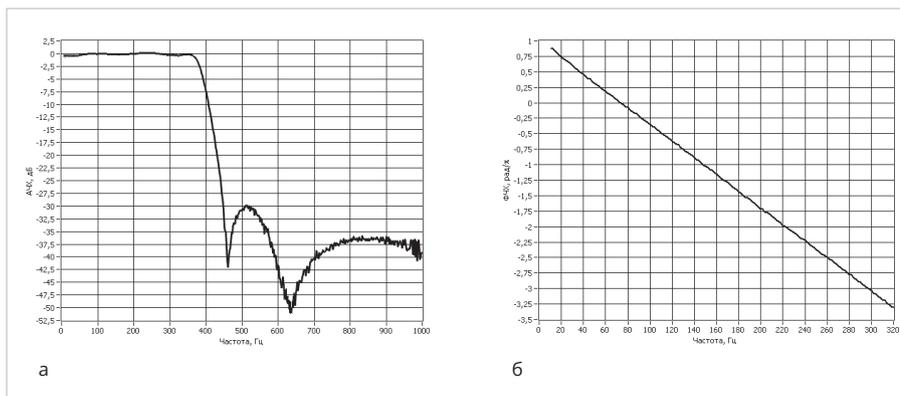


Рис. 14. Экспериментальные измерения АЧХ (а) и ФЧХ в полосе пропускания (б)

проектных задачах. Если же необходимо реализовать некий сложный закон изменения характеристики, например, фазы коэффициента передачи либо её производных (ГВЗ и частотной дисперсии), то аналитический расчёт фильтра становится невозможен. При этом можно отметить недопустимо низкое качество проектирования БИХ-фильтров в пакете MATLAB, никак не соответствующее современным требованиям. Ошибки аппроксимации фильтров-прототипов не позволяют проектировать рекурсивные фильтры со сложной, произвольной формой характеристик, а ошибки квантования на стадии реализации практически «рассыпают» частотные характеристики БИХ-фильтра, начиная уже с уровня 12-битового представления его коэффициентов даже при малом порядке фильтра, как это наглядно видно на приведённом в статье примере. Весьма негативным обстоятельством является и тот факт, что при любой аппроксимации в пакете MATLAB проектируются только минимально-фазовые версии БИХ-фильтров, причём в наихудшем их варианте с фиксацией всех нулей передаточной функции на единичной

окружности в z-плоскости (рис. 11), что и определяет чрезвычайную нелинейность фазочастотной характеристики фильтра (рис. 10б). Фазовые искажения очевидно меньше в варианте дискретного синтеза при распределении нулей как на, так и внутри единичной окружности в z-плоскости (рис. 8б, рис. 9). Однако лучшим вариантом обеспечения фазовой линейности в заданной полосе пропускания является вариант синтеза со свободным распределением нулей коэффициента передачи в z-плоскости, что вполне возможно реализовать методами дискретного программирования. Таким образом, декларируемая нелинейность фазочастотных характеристик БИХ-фильтров никак не является их характерной особенностью, а определяется только несовершенством методик проектирования БИХ-фильтров через аналоговый прототип. Принципиальное отличие дискретного синтеза состоит в применении современных численных методов машинного проектирования, позволяющих работать не с аналитическим, а с дискретным представлением как характеристик проектируемого фильтра, так и его коэффициентов, что позволяет

устранить систематические ошибки аппроксимации и квантования параметров. Применение алгоритма поиска на дискретной сетке квантованных параметров позволяет получать решения с нулевой ошибкой реализации на цифровой платформе или кристалле с заданной длиной слова коэффициентов. Поисковые методы дискретного программирования позволяют проектировать как минимально-фазовые, так и линейно-фазовые версии БИХ-фильтров, что важно в случаях, когда приходится устранять дисперсионные искажения, связанные с фазовой нелинейностью (например, при обработке речи и передаче данных). Современные алгоритмические комплексы дискретной минимизации позволяют решать такие проектные задачи надёжно и эффективно при выполнении всех внешних требований и ограничений к работе цифрового фильтра, что даёт возможность существенно повысить качество проектируемых БИХ-фильтров и сократить время их разработки.

Из материалов, приведённых в статье, видно, что, в сравнении с классическими аналитическими подходами, дискретный синтез численными методами нелинейного программирования позволяет следующее.

1. Осуществлять проектирование фильтра по совокупности требуемых его частотных характеристик при произвольной форме их задания и заданной частотной шкале (линейной, логарифмической и др.).
2. Гарантировать устойчивость рекурсивного решения приоритетным выполнением функциональных условий устойчивости в процессе дискретного синтеза фильтра. При этом возможно задание требуемого максимального радиуса полюсов передаточной функции, что позволяет эффективно управлять добротностью проектируемого фильтра в случае возникновения предельных циклов того или иного рода.
3. Проектировать как минимально-фазовые варианты фильтров с нулями передаточной функции на или внутри единичной окружности, так и фильтры со свободным расположением нулей в z-плоскости, что позволяет значительно снизить фазовые и дисперсионные искажения.
4. Проектировать БИХ-фильтры с заданной разрядностью представления данных (вплоть до минимальных 3 бит) непосредственно

- на квантованном пространстве параметров (коэффициентов) фильтра.
5. Глобальная модельная идеология поиска определяет высокую надёжность отыскания эффективного решения экстремальной задачи нелинейного программирования. Хорошего начального приближения (прототипа) здесь не требуется. Как правило, в проектных задачах со сложными селективными требованиями оптимальное решение определяется не из начальной точки, заданной пользователем, а из точки, сгенерированной самим поисковым алгоритмом дискретной минимизации.
 6. Необходимое масштабирование сигнала в каскадных структурах может быть обеспечено непосредственно в ходе дискретного синтеза фильтра. Здесь нет необходимости использования косвенных приёмов масштабирования усиления применением, например, Лр-нормы.
 7. Целочисленная дискретизация пространства параметров (коэффициентов) фильтра позволяет полу-

чать проектные решения в целых числах, что обеспечивает минимальные вычислительные затраты при работе ЦЦФ в реальном времени и снимает все ограничения по арифметике вычислений при их реализации на любых цифровых платформах (сигнальных процессорах, контроллерах, FPGA) с заданной разрядностью представления данных, а также на кристаллах заказных или полузаказных СБИС.

Литература

1. Emmanuel Ifeachor, Barrie Jervis. Digital Signal Processing: A Practical Approach (2nd Edition). Harlow: Pearson Education, 2002.
2. Rabiner L.R., Gold B. Theory and Applications of Digital Signal Processing. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, 1975.
3. Antoniou A. Digital Filters Analysis and Design. New York: McGraw-Hill, 1979.
4. Мингазин А.Т. Синтез передаточных функций цифровых фильтров в области дискретных значений коэффициентов (обзор) // Электронная техника. Сер. 10. 1993. № 1, 2.
5. Бугров В.Н., Артемьев В.В. Синтез целочисленных рекурсивных фильтров без умножителей на неэквидистантном множестве параметров // Успехи современной радиоэлектроники. 2017. № 7.
6. Артемьев В.В. Проектирование рекурсивных цифровых целочисленных фильтров: дис. ... канд. техн. наук. Н. Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, 2018.
7. Бугров В.Н. Целочисленные цифровые фильтры: монография. Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2017.
8. Бугров В.Н. Синтез целочисленных БИХ-фильтров минимальной длины слова коэффициентов // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 2.
9. Zangwill W.I. Non-linear programming via penalty functions. Management Science. Jan 1967, Vol. 13 Issue 5.
10. Воинов Б.С., Бугров В.Н., Воинов Б.Б. Информационные технологии и системы: поиск оптимальных, оригинальных и рациональных решений. М.: Наука, 2007.





OLED-дисплеи Raystar



Специсполнение по ТЗ заказчика



Прозрачные модели

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

Характеристики

- Яркость экрана до 150 кд/м² обеспечивает считывание изображения при ярком солнечном свете
- Высокая контрастность 10 000:1
- Широкий угол обзора до ±175°
- Цвет свечения: жёлтый, зелёный, красный, белый, синий
- Формат изображения: 122×32, 128×64, 240×64, 256×64 и 96×64 точки
- Низкая потребляемая мощность 10 мА (схемы управления – токовые)
- Светоэмиссионная схема: не требуется система подсветки
- Короткое время отклика: 10 мкс при температуре +25°C
- Широкий диапазон рабочих температур от -40 до +80°C
- Малая толщина модуля дисплея, небольшой вес
- Срок службы: 50 000 ч для белого и синего цвета; 100 000 ч для жёлтого, зелёного, красного цветов



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

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



Консолидируем
усилия для развития
российской
электронной
промышленности!



АССОЦИАЦИЯ
РАЗРАБОТЧИКОВ
И ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

Вместе
мы сила!

Иван Покровский, АРПЭ

Смотрите на канале
СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

RUTUBE



YouTube



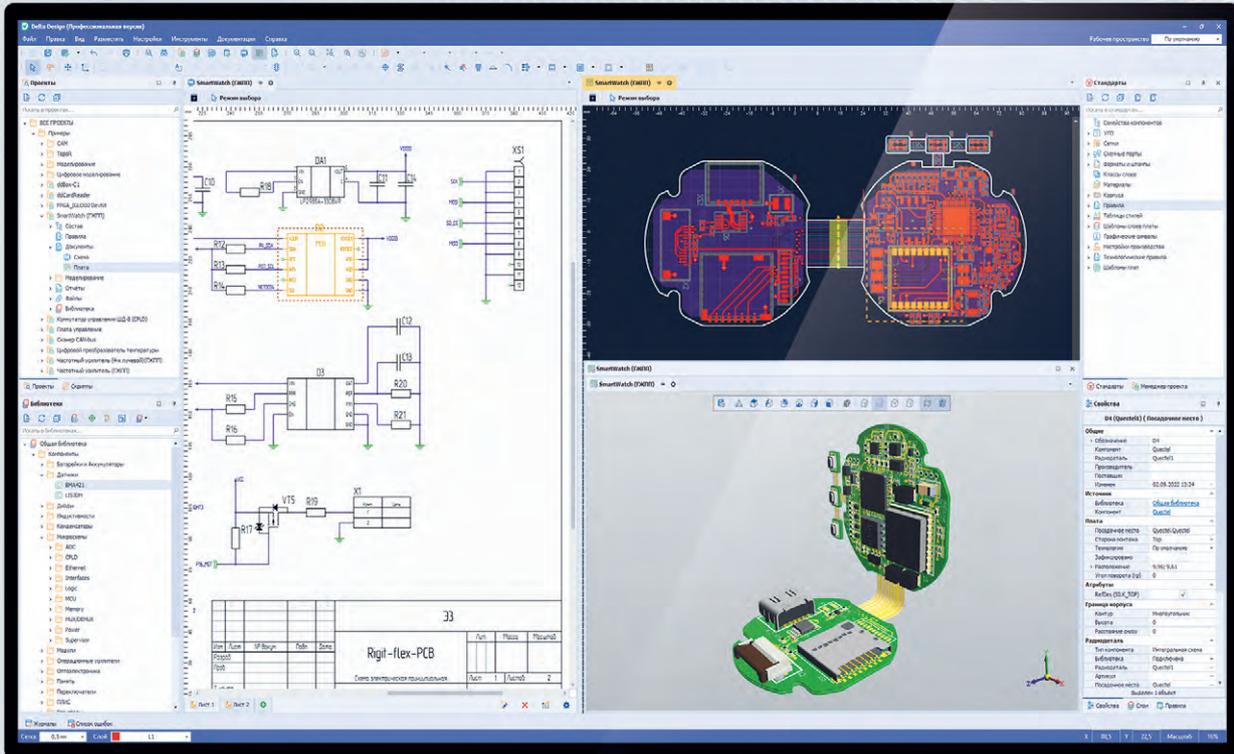
ВКонтакте





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