WWW.CTA.RU

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

8
2026

Электронная версия этого журнала



КОГДА ЭНЕРГИЮ ДЕВАТЬ НЕКУДА:
BESS сегодня и завтра

ЭЛЕКТРОНИКА – НАУКА О КОНТАКТАХ:
конструкции современных разъёмов

DEUS EX MACHINA:
что можно доверить автономному ИИ

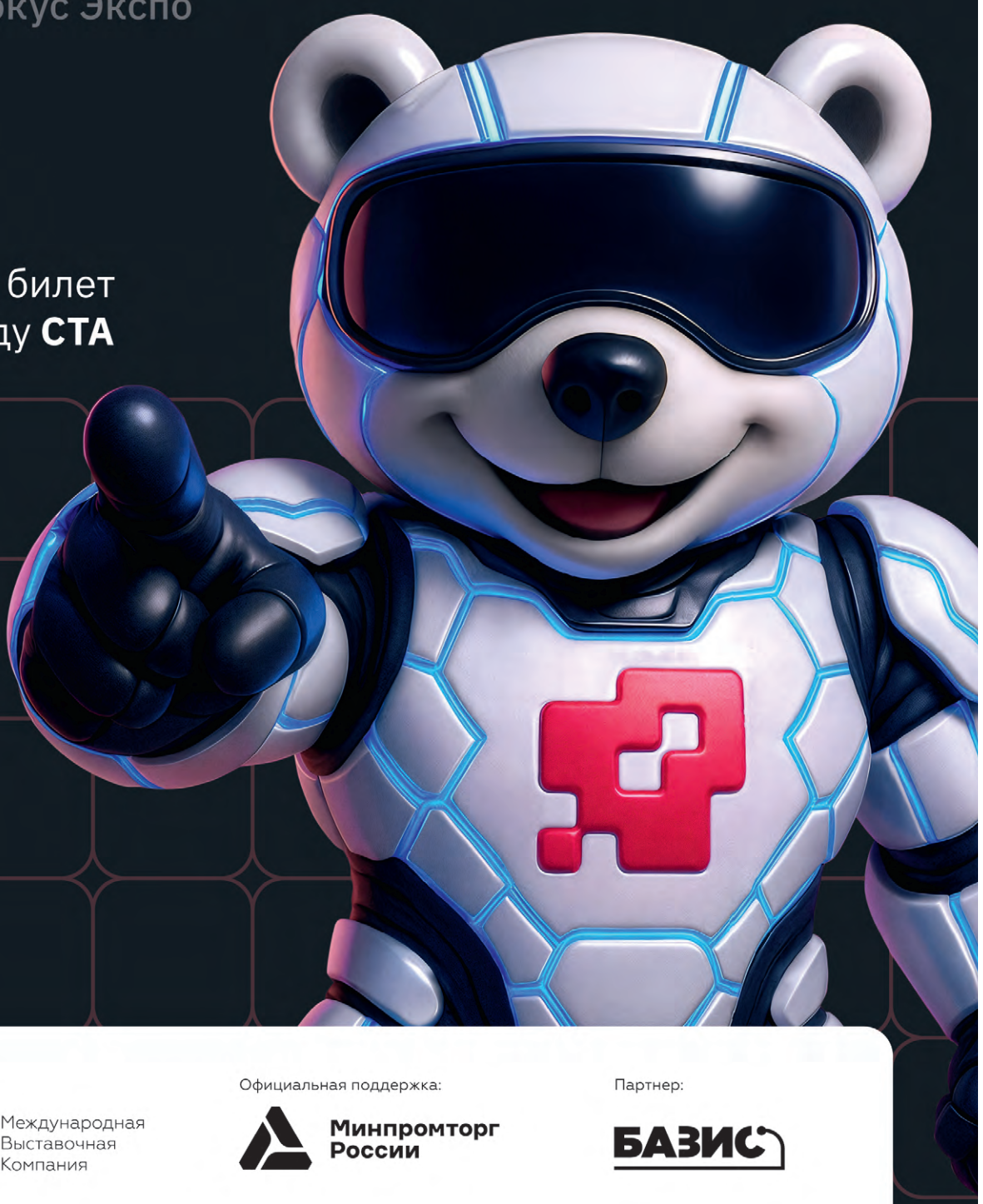
ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ 5 ЛЕТ ВМЕСТЕ

Международная выставка-форум
rus-elektronika.ru

24–26/11/2026

Москва, Крокус Экспо

Получите бесплатный билет по промокоду **СТА**



12+

Реклама

Организатор:
Международная Выставочная Компания

Официальная поддержка:
Минпромторг России

Партнер:
БАЗИС

III ежегодная всероссийская конференция

Генеральный партнёр
Postec
группа компаний

ПРОИЗВОДСТВО МИРОВОГО УРОВНЯ – 2027

8–11 ФЕВРАЛЯ 2027 ГОДА

**ЛЕНОБЛАСТЬ,
КУРОРТ ПРЕМИУМ-КЛАССА
«ОХТА ПАРК»**

ПРОГРАММА

ДЕНЬ 1 Пленарное заседание и панельные дискуссии

ДЕНЬ 2 Треки по темам: экономика / технологии / кадры

ДЕНЬ 3 Круглые столы и мастер-классы

250+ УЧАСТНИКОВ

30+ РЕГИОНОВ РФ

СПИКЕРЫ

Практики ведущих предприятий радиоэлектронного комплекса России

СТОИМОСТЬ УЧАСТИЯ

В пакет входит:

- Полный доступ к деловой программе
- Проживание на курорте «Охта Парк»
- Питание (завтрак, обед, ужин)
- Развлекательная программа
- Обратный трансфер

ОТЕЛЬ 3*	120 000 ₽
ШАЛЕ 4*	140 000 ₽
ОТЕЛЬ 5*	180 000 ₽

Вкл. НДС 22%

КОЛИЧЕСТВО МЕСТ ОГРАНИЧЕНО

Заполните форму, чтобы принять участие

Сайт конференции

pmu-conf.ru

ПОСТРОИМ ПРОИЗВОДСТВО МИРОВОГО УРОВНЯ

Реклама



Здравствуйте, уважаемые друзья!

В этом номере мы собрали материалы, посвящённые практической электронике, технологиям межсоединений, накоплению энергии, искусственному интеллекту и научному наследию отечественных исследователей. Их объединяет стремление решать конкретные инженерные задачи, эффективнее работать с энергией и данными и находить новое применение фундаментальным научным идеям.

Мы представляем результаты разработки быстродействующего устройства защиты от короткого замыкания. Эту тему дополняют материалы о соединении печатных плат без пайки и выборе разъёмов. Рассматриваются пружинные контакты, соединители на основе интерпозеров и практические особенности подбора разъёма: совпадение шага и числа контактов ещё не гарантирует совместимость с конкретной конструкцией.

Отдельный материал посвящён современным системам накопления энергии BESS. На примере решений EVE Energy, HiTHIUM и BYD рассматривается роль PCS, EMS и искусственного интеллекта.

Искусственный интеллект всё активнее перемещается на уровень электронных устройств. Статья о машинном обучении на микроконтроллере STM32F407 – практический опыт создания модели обнаружения вибраций. Автор сравнивает её с решением NanoEdge AI Studio. В другом материале рассматривается архитектура проверяемого автономного управления SEACS, в которой наблюдение, принятие решения, исполнение и проверка результата разделены, а для критических ситуаций предусмотрены резервные сценарии и передача управления человеку.

Этим выпуском мы завершаем цикл публикаций к 130-летию со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма. В заключительной части серии прослеживается развитие идей от теории таммовских поверхностных состояний до оптических состояний Тамма и плазмон-поляритонов Тамма, находящих применение в современной фотонике и сенсорике.

Историко-научную тему продолжает статья о Сергее Яковлевиче Соколове – одном из основоположников электронного метода неразрушающего контроля и устройств обнаружения объектов по отражённой акустической волне. Заложенные им направления получили развитие в электронной дефектоскопии, гидролокации и акустике и сохраняют актуальность и сегодня.

Надеемся, что материалы номера будут интересны инженерам, разработчикам и исследователям, а также всем, кто интересуется современной электроникой и историей её развития.

Спасибо, что остаётесь с нами!

Всего вам доброго.
Юрий Широков, главный редактор



Журнал «Современная электроника»
Издаётся с 2004 года

Главный редактор Ю. В. Широков
Заместитель главного редактора А. В. Малыгин
Редакционная коллегия В. К. Жданкин, С. А. Сорокин, Р. Х. Хакимов
Вёрстка М. Ю. Соколов
Распространение Ю. А. Фенчева (shop@cta.ru)
Реклама Н. А. Антипов +7 (968) 567-30-06 (antipov.n@cta.ru)

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

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

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

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».
Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19, бизнес-центр 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, 2026

Мы в соцсетях

СОДЕРЖАНИЕ 8/2026

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

04 **Устройство защиты**
Юрий Андреев, Юрий Кремзуков

06 **Машинное обучение на микроконтроллере STM32F407 – обнаружение вибраций**
Валентин Юрзин

ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

12 **Соединение печатных плат без пайки. адаптеры EZICOAX – новый этап в технике межсоединений печатных плат. Часть 1. Пружинные контакты и контактные соединители**
Кива Джуринский

18 **Как выбрать разъём для электронного устройства**
Денис Родионов

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

20 **Когда энергию девать некуда: BESS сегодня и завтра**
Юрий Широков

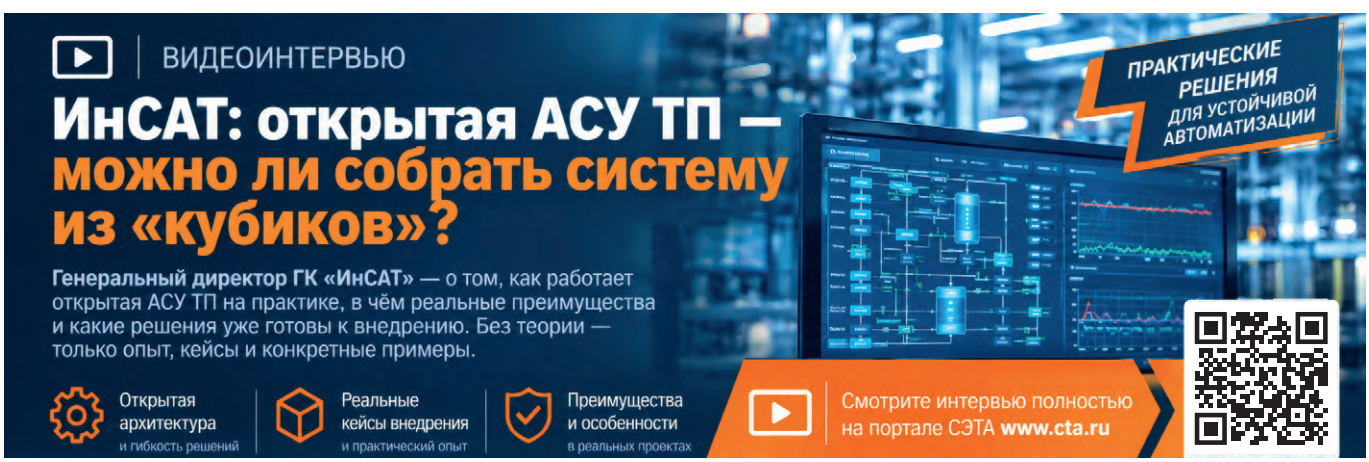
СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

32 **К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Часть 7. Оптические уровни и плазмон-поляритоны Тамма**
Виктор Алексеев

44 **Сергей Яковлевич Соколов и его наследие в электронной дефектоскопии, гидролокации и акустике**
Андрей Кашкаров

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

50 **Проверяемое автономное управление: архитектура контроля решений ИИ в киберфизических и распределённых системах**
Игорь Рыбаков



Устройство защиты

Юрий Андреев, Юрий Кремзуков

Представлены результаты разработки быстродействующего устройства защиты от короткого замыкания в процессе проведения испытаний источника энергии на базе аккумуляторных батарей.

Использование солнечной энергии для электропитания систем космического аппарата (КА) предполагает наличие совместно с солнечной батареей (СБ) аккумуляторной батареи (АБ) для обеспечения работы электромеханических систем КА при заходе в тень.

При наземных испытаниях, как в лабораторных условиях, так и в барокамере, все системы КА подвергаются множеству различных типов проверок. Нарушение функционирования какого-либо электрического оборудования или ошибки, связанные с так называемым «человеческим фактором», могут привести к возникновению короткого замыкания (КЗ), а в некоторых случаях и к возникновению пожара. Особо опасным является КЗ на шинах питания, идущих непосредственно от АБ.

Для исключения подобных ситуаций необходимо включение между выходом АБ и потребителями устройства защиты (УЗ). Быстродействие такого УЗ должно быть порядка единиц или десятков микросекунд вследствие высокого темпа развития КЗ, особенно для энергоёмких АБ [1]. Устройство защиты с такими временны́ми характеристиками можно создать только с использованием средств полупроводниковой электроники.

Такие УЗ и АБ были созданы в Томском НИИАЭМ ТУСУР. Аккумуляторная батарея предназначена для обеспечения электроснабжением КА среднего класса со следующими энергетическими характеристиками:

- напряжение бортовой сети 23…34 В;
- номинальный ток разряда 8 А;
- разрядная энергия, не менее 285 Вт·ч.

АБ состоит из 45 аккумуляторных литий-ионных элементов и имеет встроенную систему балансировки их напряжений. В настоящее время такой АБ оснащён КА, запущенным в космос в начале 2026 г.

Функциональная схема разработанного быстродействующего УЗ приведена на рис. 1.

Напряжение от АБ поступает в нагрузку через электронный ключ в виде двух встречно-последовательно соединённых полевых транзисторов N-типа IRFP4368 с сопротивлением канала в открытом состоянии, равным 1,46 мОм, и токового шунта ШИ 15А-001-М, специально разработанного белорусской фирмой «Аякс» с использованием материалов – фольги из никель-молибденового сплава и сплава «церазин» для блоков подвода мощности, обеспечивающих подогрев различных приводов КА в барокамере [2]. Шунт имеет сопротивление 10 мОм, малые значения индуктивности и температурной нестабильности, позволяющие получить требуемые характеристики точности и быстродействия УЗ.

Общая мощность тепловыделения на транзисторах ключа и шунте при номинальном разрядном токе составляет около 0,83 Вт, что позволяет разместить конструкцию УЗ в корпусе с минимальными требованиями к рассеиванию тепла. Управление транзисторами электронного ключа осуществляется через оптоизолированный драйвер, запитанный от изолированного DC/DC-преобразователя. Остальные части схемы УЗ имеют также изолированное от сети однополярное питание напряжением величиной 12 В.

Усилитель напряжения с шунта имеет небольшое положительное смещение, удерживающее его

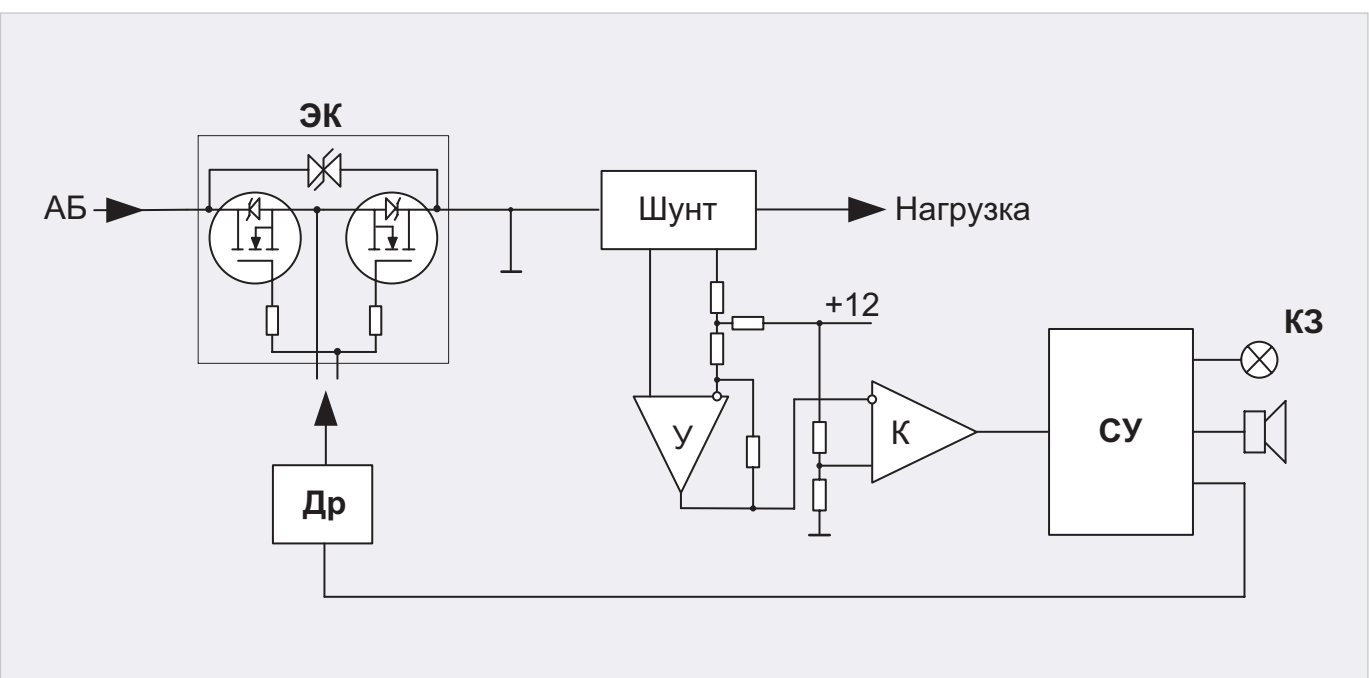


Рис. 1. Функциональная схема разработанного быстродействующего УЗ



Рис. 2. Внешний вид УЗ

выход в состоянии низкого уровня напряжения в рабочей области тока нагрузки. При дальнейшем увеличении тока усилитель включается в работу, и выходной сигнал поступает на компаратор, срабатывающий при достижении заданного порога в 16 А. Этот сигнал подаётся на вход таймера NE555, на основе которого реализовано управление устройством защиты.

Схемой обрамления таймера реализованы нужные выдержки времени и два режима работы: однократно – после срабатывания защиты и устранения причины КЗ необходимо выключить питание УЗ для приведения устройства в исходное состояние и автоматически – после выдержки времени происходит повторное включение устройства.

Основные характеристики УЗ:

- напряжение питания 24 В ±10%;
- ток потребления 35–40 мА;
- ток срабатывания по перегрузке 16 А ±10%;
- время срабатывания по КЗ 15 мкс.

Внешний вид УЗ представлен на рис. 2.

Литература

1. Проблемы защиты системы электроснабжения космических аппаратов от короткого замыкания при наземных испытаниях / Ю.А. Андреев, С.Ю. Буров, Ю.А. Кремзуков // Доклады ТУСУР. 2020. Т. 23. № 1. С. 85–91.
2. Пат. RU 152583 U1, МПК G05D 23/00, (2006/01). Регулятор мощности имитатора теплового потока для испытаний космических аппаратов / Мишин Вадим Николаевич (RU), Андреев Юрий Александрович (RU), Буров Сергей Юрьевич (RU). – № 2014145334/08; заявл. 11.11.2014, опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16, 2 с.

Авторы – сотрудники НИИАЭМ ТУСУР, г. Томск
E-mail: kremzukov@niiaem.tomsk.ru

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ЭЛЕКОНД
РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы К50-...
Номинальное напряжение, Uном, В, 3,2 ... 485
Номинальная емкость, Cном, мкФ, 1,0 ... 470 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, Tср, °С -60 ... 125

Объемно-пористые танталовые конденсаторы К52-...
Номинальное напряжение, Uном, В, 3,2 ... 200
Номинальная емкость, Cном, мкФ, 1,5 ... 60 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, Tср, °С -60 ... 175

Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы К53-...
Номинальное напряжение, Uном, В, 2,5 ... 63
Номинальная емкость, Cном, мкФ, 0,033 ... 2 200
Диапазон температур среды при эксплуатации, Tср, °С -60 ... 175

Суперконденсаторы К58-...
Номинальное напряжение, Uном, В, 2,5 ... 2,7
Номинальная емкость, Cном, Ф, 1,0 ... 4 700
Диапазон температур среды и эксплуатации, Tср, °С -60 ... 65

Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ
Номинальное напряжение, Uном, В, 5,0 ... 48
Номинальная емкость, Cном, Ф, 0,08 ... 783
Диапазон температур среды при эксплуатации, Tср, °С -60 ... 65

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

Реклама

Машинное обучение на микроконтроллере STM32F407 – обнаружение вибраций

Валентин Юрзин

В статье подробно описан процесс создания модели и архитектура библиотеки MML, а также приведено прямое сравнение точности работы библиотеки от NanoEdge AI Studio и модели MML, созданной автором на целевом микроконтроллере STM32F407VET6.

Современная концепция Edge AI [1] кардинально меняет подход к мониторингу промышленного оборудования. Традиционная передача сырых данных в облако требует высокой пропускной способности сети и увеличивает задержки. Внедрение машинного обучения непосредственно на микроконтроллеры TinyML [2] позволяет анализировать сигналы локально. Это обеспечивает мгновенную реакцию системы и полную автономность датчиков.

В качестве аппаратной платформы для таких задач отлично подходят микроконтроллеры серии STM32F4. Они обладают оптимальным балансом производительности ядра ARM Cortex-M4 и имеют аппаратный блок вычислений с плавающей точкой (FPU).

Реализация нейросетевых алгоритмов на «голом железе» (Bare Metal) требует специализированных инструментов. В данной статье рассматривается практический опыт создания системы обнаружения аномальных вибраций с использованием платформы автоматизации: NanoEdge AI Studio – программной среды от STMicroelectronics для генерации оптимизированных библиотек аномалий.

NeyrinoAI – авторская программа для мониторинга работы компактных ML-моделей на микроконтроллере STM32F407.

Использование готовых систем генерации библиотек накладывает ограничения в виде закрытого исходного кода. Для решения этой проблемы автором была разработана собственная библиотека MML (Micro Machine Learning) [3].

Главная цель создания MML – обеспечение полной технологической независимости разработки и возможность гибкой настройки всей системы под конкретную инженерную задачу.

Применение ИИ и машинного обучения

Машинное обучение на микроконтроллерах – это разновидность моделей искусственного интеллекта, запускаемых непосредственно на миниатюрных электронных компонентах с ограниченными вычислительными ресурсами (микроконтроллерах или специализированных чипах), например, на STM32A407.

Модель реализуется непосредственно на микроконтроллере, обучается данными, поступающими с датчиков, и затем распознаёт полезные (обученные) данные в потоке сигнала или группы сигналов без помощи Интернета.

Рассмотрим созданные библиотеки модели MML с помощью NanoEdge AI Studio и протестируем их работу от вибраций мотора. Оценим поведение трёхкомпонентного сигнала акселерометра и метрики схожести на экране ПК в приложении NeyrinoAI, специально созданном автором для мониторинга работы моделей MML. Создадим свою модель MML и также протестируем её работу.

Программное обеспечение NanoEdge AI Studio

NanoEdge AI Studio – это бесплатное программное обеспечение от ST, позволяющее легко интегрировать искусственный интеллект в любые встроенные проекты, работающие на любом микроконтроллере Arm® Cortex®-M.

Программное обеспечение NanoEdge AI Studio, работающее локально на ПК, принимает входные данные и генерирует библиотеку, которая включает в себя модель, её предварительную обработку и функции для лёгкой интеграции в новые или существующие встроенные проекты.

Проект обнаружение аномалий с библиотекой, сгенерированной NanoEdge AI Studio, обеспечивает обучение модели для различия двух типов поведения: номинального и аномального.

Этот тип проекта также обладает уникальной возможностью переобучения непосредственно на микроконтроллере.

Для создания проекта нам потребуется набор данных, созданных с помощью NanoEdge AI или записанных с определённым форматом данных и сохранённых в виде текстового файла.

Формат записи в файл: минимум 20 строк, 255 значений в строке. Данные в строке имеют вид: значение X, значение Y, значение Z: «2 1 9 2 1 9 2 1 9 … и т.д.», где значение X = 2; значение Y = 1; значение Z = 9.

Этапы создания библиотеки MML.

- Настройка и загрузка аномальных и стандартных сигналов.
- Тест производительности будущей модели MML.
- Валидация – оценка «лучшей библиотеки».
- Компиляция библиотеки MML.

В результате NanoEdge AI создаёт библиотечный файл «libneai.a» с расширением *.a. Файл «libneai.a» – это откомпилированная библиотека, в которой невозможно изменить или отредактировать код. Этот файл необходимо встроить в проект для использования функций машинного обучения.

Более подробная информация о работе с ПО NanoEdge AI Studio доступна здесь [4].

Следует отметить, что перестроить или скорректировать созданную модель уже нельзя.

Настройка модели происходит только на этапе сбора сигналов путём изменения амплитуды значений осей X, Y, Z.

Программное обеспечение NeyrinoAI

Проверку и сравнение поведения сгенерированных моделей будем про-

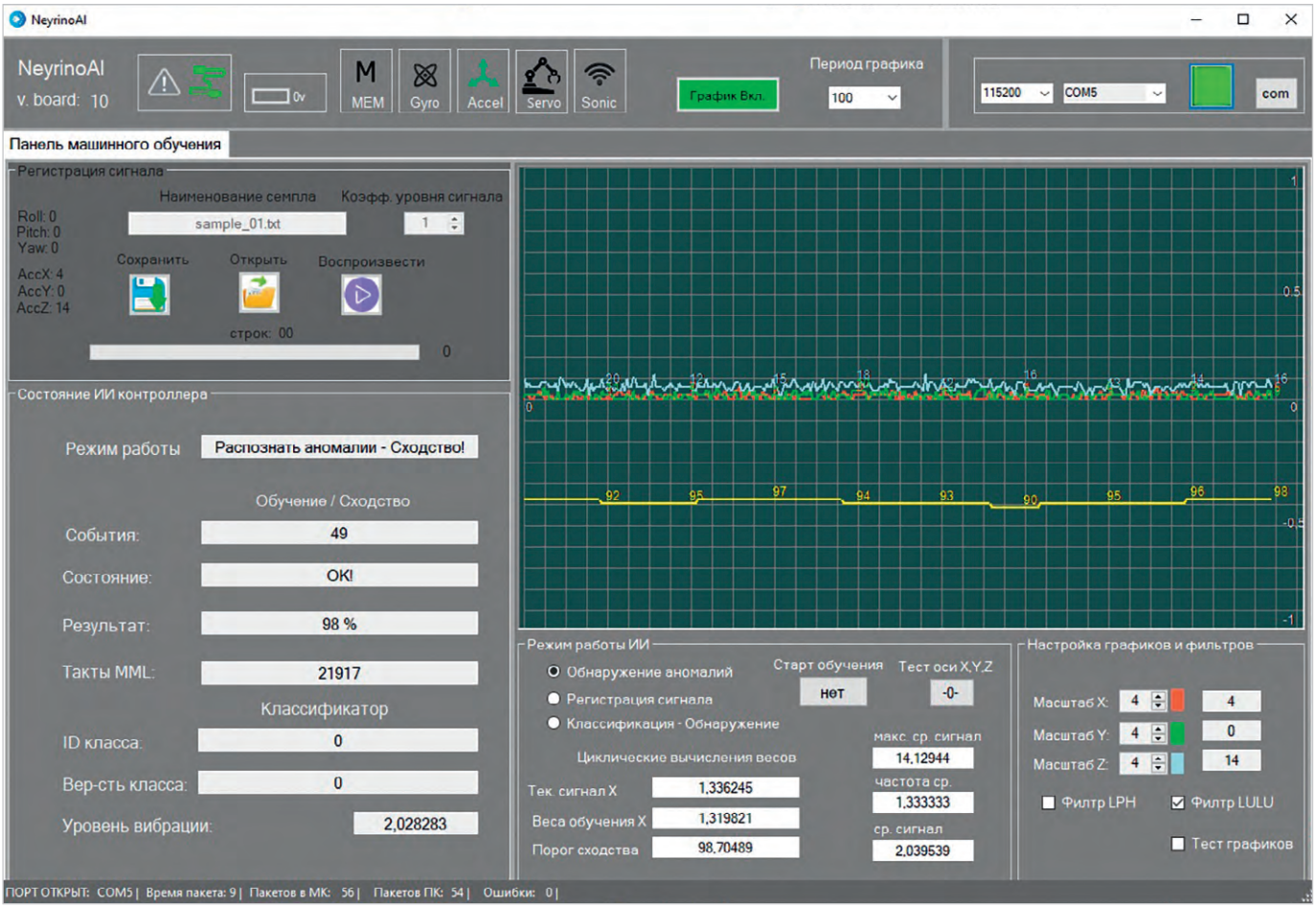


Рис. 1. Визуальное оформление NeyrinoAI

водить с помощью программного обеспечения NeyrinoAI, созданного для мониторинга работы MML. Визуальное оформление NeyrinoAI представлено на рис. 1.

Панель машинного обучения содержит следующие параметры.

1. Окно графиков визуализации данных акселерометра и коэффициента схожести.
2. Группа параметров «Режим работы ИИ контроллера».
   Здесь происходит переключение режимов работы приложения:
   - обнаружение аномалий, регистрация сигнала, классификация;
   - текущее значение сигнала на оси X в модели MML;
   - веса [5] обучения оси X, соответствующие циклу обучения;
   - порог сходства;
   - кнопки «Старт обучения» и «Тест оси», значения пиков сигнала всех осей, средней частоты и общее среднеквадратичное значение осей.
3. Группа параметров «Состояние ИИ контроллера».
   - Здесь отображаются: события модели, состояние, результат, количество тактов в MML.
   - если работает классификатор сигнала, отображается ID класса и вероятность класса.
4. Группа параметров «Регистрация сигнала».
   - Здесь происходит управление созданием файлов с записанными значениями осей X, Y, Z в формате приложения NanoEdge AI Studio, которые приведены выше.
5. В группе «Настройка графиков и фильтров» можно изменить масштабирование сигналов в окне графиков и управлять работой фильтров в самом контроллере.
   - Дополнительные фильтры: LPH – низкой частоты, LULU – фильтр от резких случайных выбросов – работают после получения сырых данных с акселерометра и не относятся к модели MML.

Для запуска модели MML используется плата контроллера Neyrino, созданного на основе микроконтроллера STM32F407VET6, который имеет 512 Кбайт флеш-памяти и 192 Кбайт оперативной памяти.

На плате контроллера установлен акселерометр L3G4200D, подключённый по интерфейсу I^2C.

Программное обеспечение для STM32F407 будет создаваться в среде разработки IAR system.

Внутренняя организация программы для микроконтроллера STM32F407VET6.

Задача 1. Поток USB (асинхронный, событийный).

Функция: передача потоковых пакетов с ПК на плату контроллера и обратно. Размер пакета 64 байта.

Задача 2. Поток акселерометра (высокий приоритет, постоянный). Периодичность: каждые 20 миллисекунд (в зависимости от требований модели).

Функция: считывает «сырые» данные (X, Y, Z) через интерфейс I^2C.

Оптимально запускать задачу по аппаратному прерыванию от вывода INT акселерометра (Data Ready), чтобы не тратить ресурсы на постоянный опрос.

Задача 3. Поток модели MML (средний приоритет). Периодичность: каждые 20 миллисекунд (в зависимости от требований модели). Запускается сразу после получения новых данных от акселерометра.

Функция: принимает буфер данных, выполняет математическую обработку (фильтрация, вычисления, обуче-



Рис. 2. Модель MML NanoEdge AI Studio в работе



Рис. 3. Модель NanoEdge AI Studio, обученная на сигнале оси X = 55 и значениях шума на осях Y, Z

ние и распознавание MML). Результат (например, состояние оборудования) записывает в регистры модели.

Задача 4. Поток MODBUS-RTU (средний/низкий приоритет).

Функция: обрабатывает запросы от мастер-устройства по UART. Читает данные из общей карты регистров MML и отправляет обратно.

Важно: поток USB работает асинхронно по отношению к другим задачам программы.

Скорость потока пакетов составляет 60–50 пакетов в секунду, что составляет от 16 до 20 миллисекунд на пакет. В пакетах передаются данные для визуального отображения на экране ПК.

Модель MML – обнаружение вибраций

На рис. 2 представлена работа модели MML NanoEdge AI Studio. На экране четырёхканального осциллографа отображаются сигналы с трёх измерительных осей акселерометра X, Y, Z и результирующий вектор схожести:

- ось X – красного цвета;
- ось Y – зелёного цвета;
- ось Z – светло-голубого цвета.

Схожесть сигналов – жёлтый цвет (0–100%). Значение более 90% – можно считать, что модель MML распознала совокупный сигнал.

Сигналы на экране разнесены по оси Y на несколько пикселей для лучшего наблюдения, чтобы они как можно меньше перекрывали друг друга.

Методика измерений.

- Движение графиков происходит справа налево.
- В начале осциллограммы идёт суммарный сигнал из трёх осей. Это часть сигналов, на которую обучена модель MML.
- В средней части происходит изменение сигналов от воздействия вибраций или программной подмены значений. Последовательное программное изменение значений осей применяется для визуального отклика модели.
- В конце графиков суммарный сигнал осей восстанавливается до обученного моделью уровня.

Таким образом, на одном экране можно наблюдать реакцию модели на обученный и альтернативный сигнал.

Время движения графиков справа налево занимает 40 секунд.

Этого достаточно для того, чтобы оценить поведение модели MML.

Следует отметить, что значения схожести появляются с некоторой задержкой по отношению к изменению сигналов осей X, Y, Z. Это происходит потому, что программный сбор сигналов акселерометра в буфер для последующего анализа методом БПФ [6] занимает примерно 1,3 с и отстаёт по времени от изменения сигналов по осям: 20 мс × 64 = 1280 мс, где:

- 20 мс – это период опроса датчика акселерометра;
- 64 – количество значений окна для анализа FFT-преобразований [6].

В качестве источника вибраций будем использовать вентилятор от блока питания ПК, который имеет небольшой радиальный люфт в роторе.

Будем располагать плату контроллера с датчиком на вентиляторе в разных точках для того, чтобы получить разные значения на осях акселерометра.

На рис. 2 модель NanoEdge AI Studio обучена на сигналах с некоторым преобладанием значений на оси X. Затем происходит остановка вращения вентилятора, и суммарный сигнал на графике не превышает амплитуды шума состояния покоя.

Модель правильно определяет схожесть и различие сигналов.

На рис. 3 модель NanoEdge AI Studio обучена на сигнале оси X = 55 и значениях шума на осях Y, Z.

При изменении значения на оси X = шум, а на оси Y = 55 модель не реагирует на изменения сигналов. То же происходит и при изменении значений на осях Z = 55, Y = шум. Только при общем снижении амплитуд сигналов модель MML показывает отсутствие схожести. Модель неправильно определяет схожесть и различие сигналов.

На рис. 4 модель NanoEdge AI Studio обучена на сигнале оси Y = 55 и значениях шума на осях X, Z. Поведение модели такое же, как и на рис. 3. Модель не распознаёт равные взаимные изменения на осях. Только при общем снижении амплитуд сигналов модель MML показывает отсутствие схожести. Модель неправильно определяет схожесть и различие сигналов.

Наша модель MML

Цель:

- различать данные, генерируемые во время нормальной работы машины (двигателя), и данные, указывающие на наличие проблем. Для этого требуется генерировать и анализировать оба типа данных: данные, отражающие нормальную работу или состояние покоя, и данные, полученные в моменты возникновения аномалий в работе объекта наблюдения;
- необходимо объединить данные осей X, Y, Z без потери их уникальности, сохранив независимость каждой из них.

Обычное сложение уничтожает данные. Когда мы складываем значения трёх осей арифметически, мы стираем границы между пространственны-

ми измерениями. Это приводит к трём критическим проблемам:

- взаимная компенсация (эффект маскировки): если по оси X значение равно +10, а по оси Y равно –10, их сумма даст 0. Для системы это будет выглядеть как полное отсутствие активности, хотя на самом деле произошло сильное движение по двум направлениям;
- потеря вектора (подмена источника): сумма X = 10, Y = 0, Z = 0 равна 10. Сумма X = 0, Y = 10, Z = 0 тоже равна 10. Получив на выходе число 10, алгоритм не сможет определить, по какой именно оси (или осям) пришёл сигнал;
- физическая некорректность: с точки зрения геометрии сложение координат разных осей напрямую нарушает правила векторных пространств.

Для решения проблемы суммирования трёх осей необходимо:

- вычисление модуля вектора, чтобы получить единое общее значение (интенсивность, силу) и гарантировать, что показатели одной оси не будут подменяться другими при сохранении весов [5];
- исключение компенсации: возведение в квадрат убирает знаки минус. Любое отклонение по любой из осей всегда увеличивает итоговый результат;
- равноправие осей: каждая ось вносит свой независимый вклад в «энергию» общего сигнала. Значения не поглощают друг друга;
- структурирование данных в коде, чтобы избежать случайной подмены осей на этапе вычислений. Данные должны быть изолированы на уровне архитектуры;
- в качестве дополнительного бонуса рассчитаем пиковые значения амплитуд и частот сигналов осей.

Рекомендации по созданию библиотеки.

1. Не следует использовать динамическое выделение памяти (malloc/free), поскольку в микроконтроллерах, особенно при реализации задач TinyML/ML, использование динамической памяти обычно не рекомендуется.
2. Для STM32F407 (ядро Cortex-M4 с аппаратным модулем вычислений с плавающей запятой FPU) оптимальным решением является использование официальной и глубоко оптимизированной библиотеки CMSIS-DSP. Она выполняет FFT [6] в несколько раз быстрее алгоритмов, написанных без CMSIS-DSP, благодаря применению SIMD-инструкций процессора.

Преимущество данного подхода для STM32F407 – экономия тактов CPU: библиотека CMSIS-DSP написана разработчиками ARM на ассемблере с использованием инструкций SIMD, что позволяет обрабатывать 64 точки за микросекунды.

Алгоритм нашей модели MML с использованием инструкции ARM CMSIS-DSP.

```
// Некоторые глобальные объявления:
#define LERN 10 // Количество циклов обучения
#define LEN_WINDOWS 64 // Длина окна (степень двойки для FFT)
#define NUM_FEATURES 3 // Количество извлекаемых признаков
// Структура нашей модели MML
typedef struct {
 float weights_AxisX[LERN] __attribute__((aligned(4))); // Веса оси X
 float weights_AxisY[LERN] __attribute__((aligned(4))); // Веса оси Y
 float weights_AxisZ[LERN] __attribute__((aligned(4))); // Веса оси Z
  float weights_sqr[LERN] __attribute__((aligned(4))); // Веса среднего значения сигнала
 float bias;  // Смещение
} MML_Model_t;
```

Три основные функции:

1. Инициализация математических модулей – anomalydetection_init(void).
2. Обучение модели – anomalydetection_learn(float *inBuff).
3. Распознавание схожести – anomalydetection_detect(float *inBuff, uint8_t *similarity).

В функции инициализации происходит:

- инициализация и заполнение всех массивов нулями;
- инициализация структуры FFT (RFFT) из библиотеки CMSIS-DSP.

В функции обучения модели:

- происходит режим сбора данных – по 64 отсчёта для трёх осей X, Y, Z с акселерометра;
- оконное преобразование Фурье (STFT) – 64 значения в окне для каждой оси;
- извлекаются признаки частоты, пиковой амплитуды и общей энергии сигнала для трёх осей;
- обучение модели (сохранение веса для каждой оси X, Y, Z).

В функции распознавания схожести:

- происходит режим сбора данных – по 64 отсчёта для трёх осей X, Y, Z с акселерометра;
- оконное преобразование Фурье (STFT) – 64 значения в окне для каждой оси;
- расчёт степени сходства на основе среднеквадратичной ошибки (RMSE/RMS).

В функции обучения модели и распознавания схожести используется одна функция: функция сбора данных – 64 отсчёта для трёх осей X, Y, Z с акселерометра и оконное преобразование Фурье (STFT) – 64 значения в окне для каждой оси.

```
MML_apply_stft_3axis( float *inBuff, float32_t *outFeatures, float32_t *outAxis_XYZ, int window_size);
```

Разберём её более подробно.

- Из общего входного отсчёта, состоящего из 64 значений для осей X, Y, Z, выделим массивы для каждой из осей X, Y, Z соответственно.

```
standard_x[i]; // семпл – эталон оси X.
standard_y[i]; // семпл – эталон оси Y.
standard_z[i]; // семпл – эталон оси Z.
```

- Расчёт математических признаков спектра. Ищем доминирующую частоту.

```
arm_max_f32(&magnitude_buffer[1], (LEN_WINDOWS / 2) - 1, &max_magnitude, &max_index);
```

- Используем векторную функцию CMSIS для поиска максимума амплитуды.
- Считаем среднюю мощность спектра через векторное суммирование CMSIS.

```
arm_mean_f32(magnitude_
buffer, LEN_WINDOWS / 2, &sum_magnitude);
// Получаем признаки сигнала для каждой оси для оси X, Y, Z.
features[0] = max_magnitude;
// Пиковая амплитуда движения
features[1] = max_index; // Доминирующая частота (шаг/вибрации)
features[2] = sum_magnitude;
// Общая энергия сигнала.
```

- Вычисляем RMS каждого эталона, чтобы понять его масштаб/энергию. Алгоритм использует RMS (извлекает квадратный корень), возвращая ошибку к исходной физической величине. Это делает сравнение с эталоном линейным и более интуитивным.

```
arm_rms_f32(standard_x, LEN_
WINDOWS, &ref_rms);
arm_rms_f32(standard_y, LEN_
WINDOWS, &ref_rms);
```



Рис. 4. Модель NanoEdge AI Studio, обученная на сигнале оси Y = 55 и значениях шума на осях X, Z



Рис. 5. Модель, обученная на сигналах с некоторым преобладанием значений на оси X

arm_rms_f32(standard_z, LEN_WINDOWS, &ref_rms);

- Для запоминания весов сигнала используем: экспоненциальное скользящее среднее (EMA), простейший низкочастотный фильтр (IIR-фильтр) или бегущее среднее.

  Формулу можно написать как: S = 0,5 × S(n – 1) + 0,5 × X(n).

Тут происходит сглаживание пиков: если в последовательности чисел произойдёт резкий скачок (например, шло 10, 10, 10 и вдруг пришло 100), среднее значение не подскочит до 100 сразу, а будет плавно подбираться к нему: 10 → 55 → 77,5 → 88,75.

Таким образом, в значениях массива весов нет резких скачков.

- Если функция работает в режиме обучения, сохраняем рассчитанные веса сигнала:

  my_model.weights_AxisX[couLernAI];
  my_model.weights_AxisY[couLernAI];
  my_model.weights_AxisZ[couLernAI];
  иначе – игнорируем сохранение весов.
- На выходе функции получаем признаки и веса сигнала.

В функции распознавания схожести используется алгоритм расчёта степени сходства на основе среднеквадратичной ошибки (RMSE/RMS) или метрики сходства по нормированной среднеквадратичной ошибке (NRMSE).

Этот алгоритм применяется, когда критически важны и форма, и абсолютные значения (например, совпадение физических сигналов, напряжений или аудиосигналов).

Он подходит для сравнения сигналов с датчиков или других физических процессов.

- Находим поэлементную разницу векторов (pRef[i] – pInput[i]); результат складывается во временный буфер diff_buffer arm_sub_f32(pRef, pInput, diff_buffer, len_size).
- Вычисляем RMS (среднеквадратичную ошибку) полученной разности. Алгоритм использует RMS (извлекает квадратный корень), возвращая ошибку к исходной физической величине. Это делает сравнение с эталоном линейным и более интуитивным. Функция внутри возводит элементы в квадрат, берёт среднее и извлекает корень arm_rms_f32(diff_buffer, len_size, &rmse).
- Вычисляем RMS самого эталона, чтобы понять его масштаб/энергию: arm_rms_f32(pRef, len_size, &ref_rms).
- Перевод величины ошибки в процент схожести:

  float32_t error_percent = (rmse / ref_rms) * 100.0f;
  float32_t similarity = 100.0f - error_percent.

  На выходе функции получаем значение схожести от 0% до 100%.

Рекомендации по компиляции модели.

1. При компиляции проекта необходимо указать основной макрос в настройках проекта IAR, например, ARM_MATH_CM4 для STM32F4.
2. Нулевое выделение памяти во время работы программы. Все массивы с типом (Float – вещественных чисел) должны быть объявлены статически и выровнены по границе 4 байт (__attribute__((aligned(4)))), что необходимо для корректной и быстрой работы шины FPU.
3. При компиляции со знаком «High» следует отключить пункт «Static Clustering» (статическая кластеризация). Этот метод оптимизации размещения данных в памяти, при котором глобальные и статические переменные, используемые внутри одной функции или модуля, группируются (кластеризуются) как можно ближе друг к другу в структуре RAM.

При использовании этого метода со знаком «High» функции ARM DSP в модели престают работать.

Результаты измерений нашей модели MML

На рис. 5 наша модель обучена на сигналах с некоторым преобладанием значений на оси X. Затем происходит остановка вращения вентилятора, и суммарный сигнал на графике не превышает амплитуды шума состояния покоя. Модель правильно определяет схожесть и различие сигналов.

На рис. 6 наша модель обучена на сигналах оси X = 55 и значениях шума на осях Y, Z. При изменениях значения на оси X = шум, а на оси Y = 55 модель реагирует снижением процента схожести на изменения сигналов. При изменении значений на осях Z = 55, Y = шум также модель снижает процент схожести на изменения сигналов. При общем снижении амплитуд сигналов модель MML показывает отсутствие схожести. Модель правильно определяет схожесть и различие сигналов.

На рис. 7 наша модель обучена на сигнале оси Y = 55 и значениях шума на осях X, Z. Модель распознаёт равные, взаимные изменения на осях, снижая процент схожести. При общем снижении амплитуд сигналов модель также показывает отсутствие схожести. Модель правильно определяет схожесть и различие сигналов.

На рис. 8 более сложный пример. Наша модель обучена на сигналах с некоторым преобладанием значений на осях X, Y. Затем в общий спектр сигнала последовательно добавляются

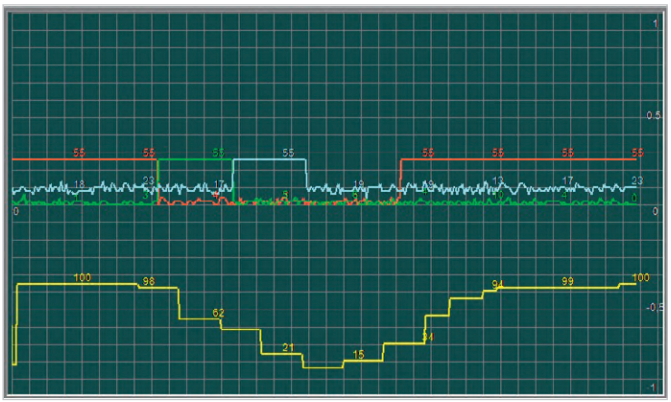


Рис. 6. Модель, обученная на сигнале оси X = 55 и значениях шума на осях Y, Z



Рис. 7. Модель, обученная на сигнале оси Y = 55 и значениях шума на осях X, Z



Рис. 8. Модель, обученная на сигналах с некоторым преобладанием значений на осях X, Y

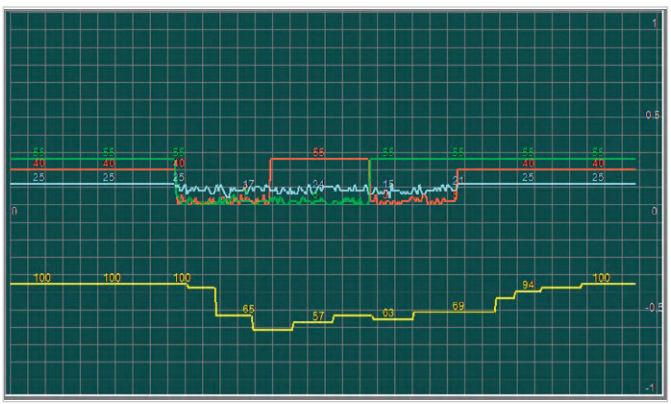


Рис. 9. Модель, обученная на сигналах X = 40, Y = 55, Z = 25

значения на осях X, Y, Z амплитудой 55. В результате модель показывает схожесть только по краям представленной осциллограммы. Во всех остальных случаях происходит снижение процента схожести.

На рис. 9 наша модель обучена на сигналах X = 40, Y = 55, Z = 25. Затем следуют значения шума на осях X, Y, Z. Далее последовательно изменяются значения на осях X = 55, Y = Z = шум, Y = 55, X = Z = шум. В результате модель точно реагирует на обученные сигналы, которые располагаются по краям графиков осей.

Выводы

Созданная нами модель MML обладает некоторой степенью избирательности, когда обучается на конкретный сигнал. Фактически модель запоминает определённый код из трёх сигналов и впоследствии способна на него реагировать (распознавать).

Применение ИИ на микроконтроллерах даёт ряд преимуществ: машинное обучение позволяет анализировать накапливаемые данные и находить в них закономерности. Эти закономерности могут быть основой новых бизнес-моделей.

Если есть возможность отслеживать и анализировать поведение какой-либо машины, то можно прогнозировать её аварийное состояние ещё до того, как она будет ломаться.

Одним из наиболее критических сценариев применения TinyML является предиктивное обслуживание (Predictive Maintenance) промышленных моторов и подшипниковых узлов на основе анализа вибраций. Таким образом, можно вовремя находить аномалии в любой работающей системе и выполнять превентивное техническое обслуживание.

Термины и полезные ссылки

1. Edge AI (периферийный искусственный интеллект) – это запуск алгоритмов и моделей ИИ прямо на локальных устройствах.
2. TinyML (Tiny Machine Learning) – это сфера искусственного интеллекта, которая занимается запуском моделей машинного обучения на микроконтроллерах, умных датчиках и чипах IoT (Интернета вещей), которые потребляют минимальное количество энергии.
3. Модель MML (микромашинное обучение) – это подход, направленный на создание точных и эффективных моделей с использованием минимального количества данных, вычислительной мощности и программного кода вместо гигантских нейросетей.
4. URL: https://wiki.st.com/stm32mcu/wiki/AI:How_to_Build_an_Anomaly_Detection_Project_for_Predictive_Maintenance_with_NanoEdge_AI_Studio.
5. Веса (Weights): числа, которые показывают важность связи между нейронами. Они усиливают или ослабляют сигнал, который идёт от одного слоя к другому. Смещение (Bias): дополнительное число, которое сдвигает график функции. Оно помогает модели точнее подстраиваться под данные, даже если все входные сигналы равны нулю.
6. FFT (Fast Fourier Transform – быстрое преобразование Фурье) – это быстрый вычислительный алгоритм для перевода сигнала или данных из временно́й (пространственной) области в частотную. Алгоритм сокращает число операций, что сильно ускоряет расчёты.

Соединение печатных плат без пайки. Адаптеры EZICOAX – новый этап в технике межсоединений. Часть 1. Пружинные контакты и контактные соединители

Кива Джуринский, Сергей Щербаков

Рассмотрены стандартные способы соединения печатных плат гибкими печатными и ленточными кабелями, «плата – плата», «провод – плата». Показана необходимость создания способов соединения печатных плат без применения низкотемпературной пайки. Приведены преимущества и недостатки соединения печатных плат с помощью адаптеров Bullet. Рассмотрены история создания, конструкция и механизм действия пружинных контактов для соединения печатных плат без пайки. Показана конструкция пружинных соединителей на основе интерпозера и пружинных контактов. Приведены конструкция и параметры пружинных контактов компании Smiths Interconnect. Рассмотрены преимущества пружинных соединителей и области их применения. Статья написана на основе доступной зарубежной технической информации.

Введение. О терминологии

Объектом данной статьи являются пружинные (подпружиненные) контакты и соединители (Spring Loaded Contacts – SLC), которые по своей конструкции являются штыревыми соединителями. В зарубежной литературе их часто называют Pogo Pin-контактами. Pogo Pin-контакты – это отдельные пружинные компоненты, предназначенные для электрического соединения между печатными платами и модулями за счёт контролируемого механического сжатия. Они позволяет создавать временные, очень стабильные электрические соединения без пайки [1–3].

Все Pogo Pin-контакты делятся на стандартные и коаксиальные. Стандартные Pogo Pin-контакты предназначены для передачи напряжения питания и низкочастотных сигналов. Коаксиальные Pogo Pin-контакты – это специализированный тип контактов, предназначенных для передачи как низкочастотных, так и радиочастотных сигналов. Их конструкция представляет собой коаксиальную структуру, аналогичную структуре коаксиального радиочастотного кабеля [1–3]. Коаксиальные пружинные контакты рассмотрены во второй части данной статьи.

Стандартные и коаксиальные контакты, установленные в интерпозер (изоляционное основание), называются соответственно стандартными и коаксиальными соединителями. Интерпозер – это соединительное устройство с компрессионным монтажом, которое устанавливают между платами для обеспечения быстрой передачи сигналов. В один интерпозер может быть установлено большое количество пружинных контактов. Термин «интерпозер» происходит от латинского слова interpōnere, означающего «вставлять между» [4].

Некоторые способы соединения печатных плат с применением пайки

Эффективное соединение печатных плат – важнейшая задача при проектировании сложных электронных систем. Выбор способа соединения зависит от ряда факторов: области применения, доступного пространства, требований к целостности сигнала, механических нагрузок, типов используемых компонентов и стоимости.

Известны следующие способы соединения [3].

Соединение гибкими печатными кабелями

Гибкие печатные кабели полезны для соединения двух печатных плат, которые не выровнены в одной плоскости, или когда их необходимо соединить в компактную, гибкую конструкцию в ограниченном пространстве. Однако этот способ недостаточно надёжен при воздействии на платы больших механических нагрузок.

Соединение «плата – плата»

В этом случае обеспечивается прямое электрическое соединение двух плат с высокой плотностью размещения при помощи штырей или гнёзд разных размеров, типов и конфигураций. Соединители типа «вилка» припаивают на одной плате, а соответствующие им гнёзда – на другой. Достоинства этого способа – простота сборки и демонтажа, достаточно прочное механическое и электрическое соединение, главный же недостаток – необходимость точного выравнивания печатных плат.

Соединение «провод – плата»

В данном способе соединение двух печатных плат производится проводами, припаянными к платам, и оно часто используется в ситуациях, когда применение соединителей нецелесообразно или в случае ограниченного пространства. Провода обычно подключают к печатной плате через переходные отверстия. Соединения «провод – плата» нередко встречаются в конструкциях, где две печатные платы не расположены друг над другом или не выровнены в одной плоскости. Этот способ отличается простотой реализации и низкой стоимостью. Однако он менее надёжен, чем другие способы, так как существует повышенный риск ошибок в электропроводке и случаев коротких замыканий.

Соединение ленточными кабелями

Ленточный кабель – это один из типов плоского многожильного кабеля. Этот кабель, состоящий из параллельно расположенных проводников,

часто используют в приложениях, где требуется большое количество соединений в ограниченном пространстве. В зависимости от области применения ленточные кабели либо подключают к соединителям, либо непосредственно припаивают к печатной плате. Такое соединение имеет ограниченную гибкость по сравнению с другими способами.

Способы соединения печатных плат без применения пайки

Радиочастотные соединения печатных плат постоянно совершенствуются вследствие необходимости повышения производительности и упрощения процесса сборки. В ранее перечисленных способах соединение печатных плат происходит с применением низкотемпературной пайки. Для стационарных электрических цепей внутри корпуса изделия пайка является стандартным и главным выбором. Соединения пайкой обеспечивают прочное неразъёмное соединение между проводами и печатными платами, превосходную электропроводность и долговечность.

Однако ряд недостатков такого соединения обусловили необходимость разрабатывать соединения без применения низкотемпературной пайки, выполняемой в большинстве случаев с применением флюсов. Основные причины нежелательности пайки следующие [5, 6].

- Возможность температурной деформации печатных плат, повреждения чувствительных к нагреву компонентов и их преждевременного износа.
- Загрязнение соединения остатками флюса и необходимость его отмывки.
- Возможность образования микроскопических проводящих «оловянных усов», которые могут вызвать короткое замыкание, если пайку выполняют оловянно-свинцовыми припоями.
- Ухудшение экологии в результате применения флюсов и припоев, содержащих свинец. Применение же современных бессвинцовых припоев требует более высоких температур и агрессивных флюсов, которые необходимо отмывать ещё тщательнее.
- Достаточная высокая сложность обслуживания, а также невозможность рассоединения печатных плат для ремонта или замены.

Соединение печатных плат без низкотемпературной пайки

Соединение с применением адаптера Bullet

Развитие микроэлектроники СВЧ и создание сложных, многофункциональных устройств с повышенной плотностью компоновки потребовало дальнейшей миниатюризации и повышения диапазона рабочих частот. Этим требованиям в полной мере отвечают соединители серий: SMP (предельная частота 40 ГГц), SMPM (предельная частота 65 ГГц) и SMPS (предельная частота 100 ГГц), в состав которых входят адаптеры «розетка – розетка» Bullet [5]. Соединители этих серий рассчитаны на номинальное сопротивление 50 Ом, работают в диапазоне частот от постоянного тока до 100 ГГц, характеризуются низкими вносимыми потерями, экранным затуханием менее –60 дБ и диапазоном рабочих температур от –65°С до +165°С. Соединение двух печатных плат с помощью адаптеров Bullet происходит способом, предложенным американской компанией Gilbert. На каждой из соединяемых печатных плат устанавливают соединители «вилка», а соединение плат производят при помощи адаптера Bullet без использования пайки и применения радиочастотных кабелей (рис. 1) [5].

При этом одну из вилок выполняют с полным или ограниченным защёлкиванием, а другую – со скользящим соединением. Поэтому при рассоединении Bullet остаётся в вилке с защёлкиванием. Выбирая Bullet разной длины, можно точно устанавливать расстояние между двумя платами. Рекордсменом в области миниатюризации является Bullet компании Southwest Microwave с длиной корпуса всего 2,48 мм для соединения печатных плат, отстоящих друг от друга на расстоянии 3 мм [5].

Несмотря на то что соединители SMP можно соединять почти вслепую, это часто сопряжено с трудностями из-за возможного несовпадения печатных плат, а также из-за необходимости приложения большого усилия. Например, для соединения одного SMP-соединителя требуется усилие до 4 кг. Для сборки печатной платы, например, с 32 соединителями, общее усилие соединения превышает 127 кг [7].

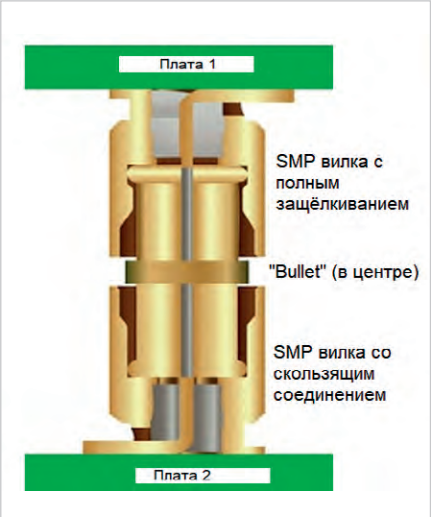


Рис. 1. Соединение двух плат при помощи адаптера Bullet

Соединение стандартными пружинными контактами

Конструкция пружинных контактов

В связи с созданием сложных многофункциональных устройств СВЧ и необходимостью их миниатюризации разработка стабильных и надёжных межсоединений печатных плат стала важной инженерной задачей. Одним из её решений является применение пружинных контактов (Pogo Pin) и соединителей на их основе. Первые версии этих контактов были разработаны инженерами Bell Labs (США) в начале 1970-х годов. Название Pogo Pin, возможно, связано с похожестью их действия с классической игрушкой Pogo Stick (кузнечик). В обоих случаях вертикальное движение вверх – вниз имитирует подпрыгивающие движения кузнечика. Название Pogo Pin является зарегистрированной торговой маркой компании Everett Charles Technologies (ECT), которая производит данные контакты уже много лет [8].

Пружинный контакт – это электромеханический компонент, который использует пружину для поддержания физического и электрического соединения между двумя платами. Стандартный пружинный контакт состоит из трёх прецизионных составляющих: корпуса, спиральной пружины и плунжера (рис. 2) [9–11].

Корпус – металлическая цилиндрическая трубка, в которую устанавливают внутренний механизм, состоящий из плунжера и пружины. Корпус обеспечивает плавное перемещение плунжера и, следовательно, воспро-



Рис. 2. Представление конструкции пружинного контакта

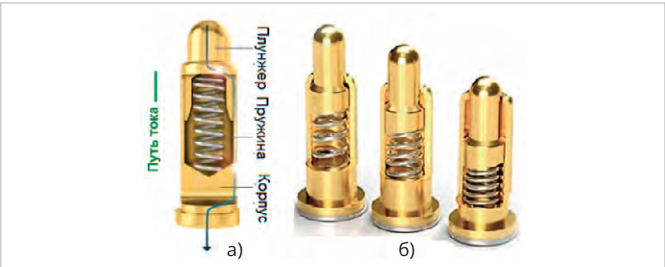


Рис. 3. Конструкция пружинного контакта (а), иллюстрация перемещения пружины (б)

изводимое усилие пружины. В то же время он защищает от внешней среды внутренние компоненты и обеспечивает надёжную работу контакта. Как правило, для изготовления корпуса, а также и плунжера, применяют высокопрочные медные сплавы или латунь с гальваническим покрытием золотом по подслою никеля для обеспечения высокой электропроводности, повышения износостойкости и защиты от коррозии и окисления. Типичная толщина золотого покрытия составляет от 0,1 мкм до 1,0 мкм или от 0,5 мкм до 1,0 мкм. В качестве альтернативы золоту доступны покрытия: никель, серебро, палладий-никель и палладий-кобальт.

Плунжер (контактный наконечник) – подвижный токопроводящий наконечник, который прижимается пружиной к контактируемой поверхности печатной платы, обеспечивая электрическое соединение. Во время контакта плунжер перемещается в цилиндре в осевом направлении, обеспечивая стабильное и воспроизводимое электрическое соединение.

Пружина может упруго деформироваться и создавать стабильное контактное давление между плунжером и печатной платой, обеспечивая воспроизводимый контакт в течение многих циклов соединений (рис. 3) [10]. Пружину изготавливают из нержавеющей стали или бериллиевой бронзы.

Механизм действия

Пружинный контакт работает следующим образом [7, 9–13].

1. Исходное состояние: в состоянии покоя пружина разжата, при этом плунжер находится на некотором расстоянии от контактной площадки на печатной плате, что исключает электрическое соединение.
2. При нажатии на пружинный контакт плунжер втягивается в корпус и сжимает пружину, расположенную внутри корпуса (рис. 3б).
3. При сжатии пружина в результате деформации накапливает потенциальную энергию и обеспечивает усилие, прилагаемое к плунжеру. Между сопрягаемыми поверхностями печатных плат поддерживается стабильное контактное давление тем большее, чем сильнее сжата пружина. При этом в результате трения происходит ещё очистка поверхностей контакта от окисных плёнок и загрязнений, что помогает сохранять низкое переходное сопротивление на протяжении многих циклов подключения.

Пружинные контакты создают постоянное усилие на сопрягаемую контактную поверхность, поглощая и компенсируя движение, возникающее при ударах и вибрации, без прерывания электрического соединения. Пружинные контакты обеспечивают повторяемый контакт в полевых условиях, снижают затраты и устраняют необходимость в кабельных соединениях, обеспечивая надёжное прямое соединение во вращающихся или скользящих соединениях. Кроме того, они обеспечивают короткий путь прохождения сигнала и вследствие этого целостность сигнала как для аналоговых, так и для цифровых приложений. Важно отметить, что пружинный контакт трудно повредить из-за неправильного расположения, как в случае с обычными штыревыми и гнездовыми соединениями.

Возможны варианты установки пружинных контактов для жёсткой или гибкой печатной платы: в отверстия платы или путём поверхностного монтажа; с использованием интерпозера или без него.

Модификации пружинных контактов

Пружинные контакты выпускают большое число компаний США, Европы и Китая. Разработаны многие модификации конструкции пружинных соединителей (рис. 4) [10].

Например, в каталоге компании N&H Technology представлены более 300 пружинных контактов [10]. Самый маленький контакт длиной всего 1 мм, самый большой – длиной 23 мм. Усилие пружины варьируется в зависимости от типа контакта в пределах 50–400 г. Среди представленных конструкций пружинных соединителей имеются прямые и угловые для поверхностного монтажа и установки в отверстия печатной платы, с резьбовым корпусом, с окончаниями в виде шарика или колпачка, сильноточные, устанавливаемые в дополнительные изоляционные основания, герметизированные резиновой прокладкой, магнитные и другие.

Основные конструктивные модификации контактной области показаны на рис. 5 [10].

Пружинные контакты выпускают различной длины: от 1 до 40 и более мм. Усилие пружины может быть выбрано от 25 до 400 г в зависимости от типа пружинного контакта. Для стабильной передачи сигналов рекомендуется минимальное усилие пружины 60 г, а для эффективной передачи тока – 110 г. Чем больше давление пружины, тем сильнее плунжер прижимается к стенке корпуса, обеспечивая стабильную величину тока. Стандартная рабочая температура пружинных контактов составляет от –40°C до +85°C, контактное сопротивление менее 100 мОм (в зависимости от конструкции). Благодаря использованию специальных материалов верхняя температура рабочего диапазона может быть расширена до 150°C [10].

Один из основных недостатков пружинного контакта – непостоянство контактного сопротивления, которое может изменяться, если нет хорошего контакта плунжера с корпусом. Это приводит к прерывистому протеканию тока через пружину и к зна-



Рис. 4. Пружинные контакты компании N&H Technology GmbH



Рис. 5. Конструктивные модификации области контакта

чительному увеличению сопротивления контакта.

Способы преодоления непостоянства контактного сопротивления

Наиболее распространённое решение этой проблемы – смещение плунжера от осевой линии корпуса, чтобы плунжер соприкасался с внутренней поверхностью корпуса. Таких способов три: смещение пружины, применение шарового контакта и специальная конструкция корпуса [14].

В пружинных контактах со смещением пружины используются клиновидный плунжер и пружина, которая сужается на концах. Небольшие витки пружины приводят к плохой посадке плунжера, и поэтому при сжатии пружина вызывает его угловое отклонение. Это наименее эффективный метод смещения с точки зрения стабильности сопротивления пружинного контакта.

Второй способ смещения предполагает, что торцевая поверхность плунжера наклонена приблизительно под углом 18 градусов (рис. 5). Металлический шарик из нержавеющей стали помещается между плунжером и пружиной. Шарик служит точкой опоры, а угол наклона – рычагом, заставляя плунжер наклоняться внутри корпуса. Это наиболее эффективный способ смещения плунжера.

Наконец, конструктивный подход состоит в том, чтобы использовать полый плунжер, создавая больше свободного пространства для пружины. Если полость в плунжере расположена эксцентрично относительно главной оси контакта, эффект смещения усиливается.

Многовыводные пружинные соединители

Пружинные контакты, установленные в интерпозер, обеспечивают многовыводные соединения (рис. 6) [10].

При изготовлении изоляционных интерпозеров механической обработкой используют полимеры: PEI (полиэфиримиды) – Ultem 1000 и PAI (полиамидимиды) – Torlon. При их изготовлении методом литья под давлением применяют LCP (жидкокристаллический полимер) – Vectra, PPA (полифталамид) или PPS (полифенилсульфид) – Ryton [12]. Пружинные контакты собираются внутри корпуса интерпозера с учётом их количества и шага, а также размеров корпуса, образуя многовыводный соединитель. Количество пружинных контактов в соединителе не ограничено, что позволяет создавать многорядные решения. Стандартный шаг контактов равен 2,54 мм. Широкое разнообразие пружинных контактов позволяет производить соединители различных размеров и конструктивных исполнений, водонепроницаемые решения (степень защиты IP68), специальные решения для сильноточных применений и магнитные соединители [10–11, 13–15].

Ключевые особенности и характеристики пружинных контактов

- Шаг установки пружинных контактов (расстояние между центрами контактов): 2,0 мм, 2,54 мм и 3,0 мм.
- Усилие давления пружины контакта: обычно 0,8–1,5 Н. При усилии ниже 0,7 Н соединение может прерываться, а при усилии выше 1,8 Н могут деформироваться мягкие контактные площадки печатной платы.
- Материал покрытия контактов: золото по подслою никеля, обеспечивающее устойчивость к окислению.
- Механическая устойчивость при воздействии вибрационных и ударных нагрузок [14–15].

Пружинные контакты компании Smiths Interconnect

Компания Smiths Interconnect (Лондон, Великобритания) входит в состав холдинга Smiths Group PLC, ведущего историю с 1851 года, когда Самюэль

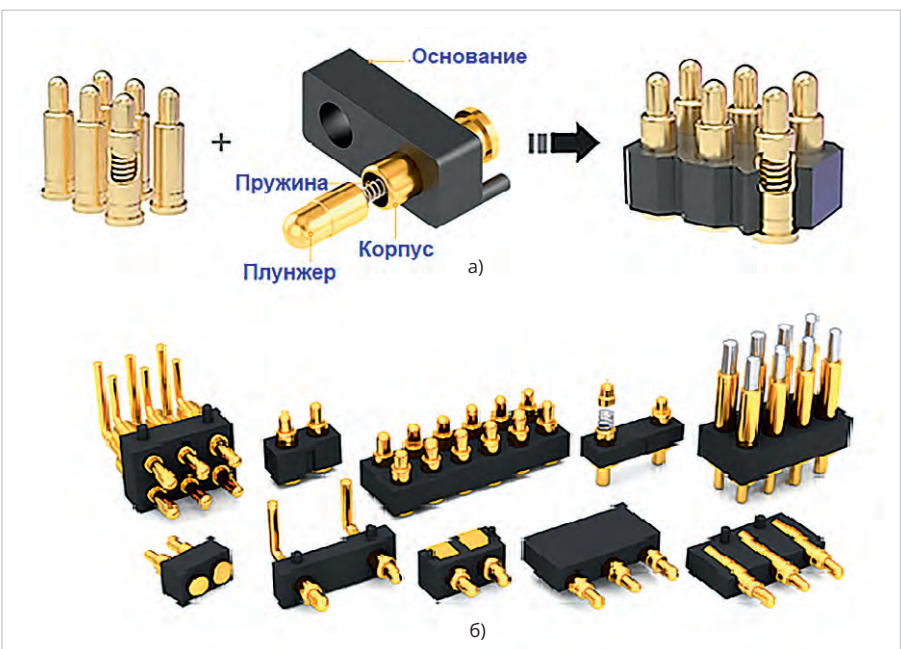


Рис. 6. Конструкция (а) и внешний вид (б) многовыводных подпружиненных стандартных соединителей

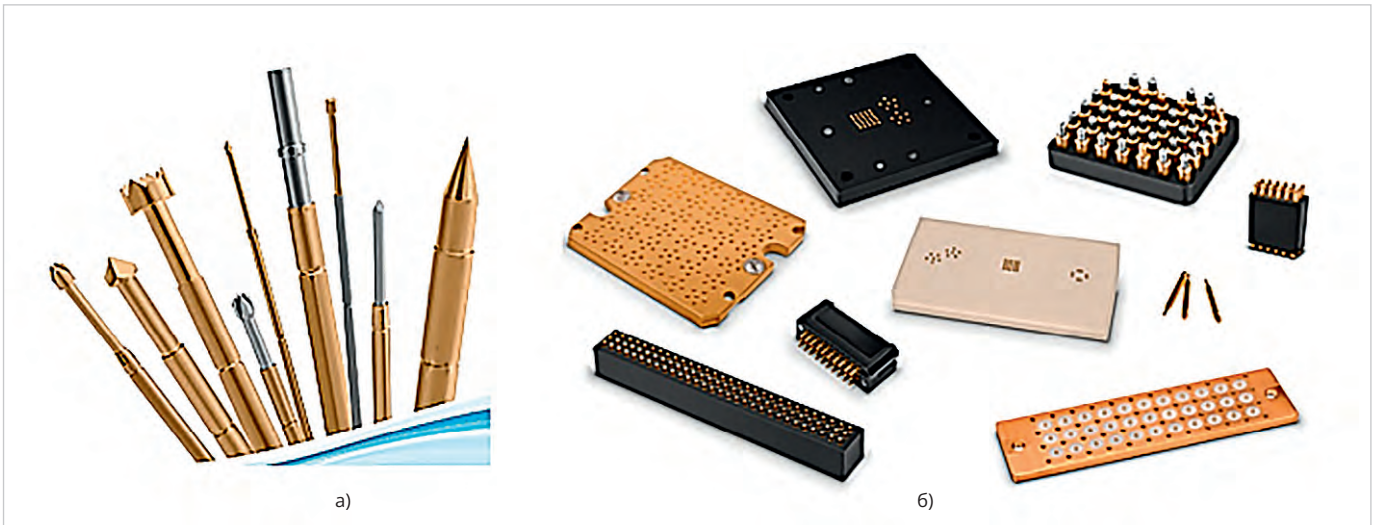


Рис. 7. Пружинные контакты Smiths Interconnect для тестирования (а), интерпозеры и многовыводные исполнения (б)

Смит основал семейное предприятие по производству и продаже часов и точных приборов [16]. Продукция этой компании выделена в отдельный раздел, так как Smiths Interconnect является мировым лидером в создании пружинных контактов, соединений печатных плат и других компонентов без применения пайки.

Для этой цели специалисты этой компании предложили несколько важных инноваций [7, 12, 13].

1. Двойной плунжер: подвижные контакты с обеих сторон корпуса за счёт пружины, обеспечивающей усилие на каждый подвижный конец контакта.
2. «Плавающая» конструкция: одиночный плунжер, который может незначительно смещаться от центрального осевого положения. Это позволяет контакту «подстраиваться» под небольшие смещения печатных плат, компенсируя их несоосность.
3. Интерпозеры. Пружинные контакты стали использовать в сборках в интерпозерах: рамках из изоляционного материала, которые точно позиционируют контакты и позволяют создавать соединения между двумя платами без пайки. Это особенно ценно для высокочастотных приложений.

Smiths Interconnect является крупнейшим в мире производителем пружинных контактов-зондов для тестирования печатных плат, узлов поверхностного монтажа и других видов тестирования. Компания выпускает 60 серий зондов (включая стандартные), которые более точны и стабильны по сопротивлению, чем другие стандартные модели (рис. 7) [13].

Минимальный диаметр стандартных пружинных контактов 0,99 мм, что обеспечивает максимальную плотность размещения для многовыводных исполнений. Стандартные контакты имеют низкое и постоянное контактное сопротивление (< 10 мОм), в зависимости от конструкции обеспечивают от 20 000 до 300 000 циклов соединение – рассоединение и устойчивы к вибрациям.

Высокочастотные пружинные зонды Smiths Interconnect обеспечивают целостность сигнала как для аналоговых, так и для цифровых приложений.

Основные преимущества пружинных соединителей

Пружинные соединители становятся всё более популярными благодаря многим своим преимуществам [13–16].

1. *Межсоединения без пайки.* Пружинные контакты обеспечивают межсоединения между печатными платами и модулями без пайки. Отказ от пайки позволяет повысить производительность и снизить стоимость сборки без ущерба для качества.
2. *Компактные размеры и лёгкий вес.* Пружинные соединения могут быть изготовлены с более высокой плотностью контактов и меньшей длиной соединения, чем при традиционном соединении «штырь-розетка».
3. *Универсальность.* В аэрокосмических и телекоммуникационных системах, медицинской технике, высокотехнологичной автоматизированной электронике пружинные соединители являются наиболее подходящим решением задачи межсоединений печатных плат.
4. *Долговечность.* В отличие от большинства других способов, при которых соединения выходят из строя при постоянном использовании, пружинные соединители выдерживают более 10 000 циклов соединения-рассоединения. Пружинные контакты рассчитаны на долгий срок службы. Это делает их экономически выгодным решением для тестирования систем, требующих многократного подключения.
5. *Надёжность соединения при смещении и неровности поверхности печатных плат.* Пружинные контакты способны соединять печатные платы вслепую даже при больших смещениях и неровности плат. Их устойчивость к механическому износу сокращает время простоя и затраты на замену, обеспечивая надёжную работу в условиях интенсивной эксплуатации.
6. *Устойчивость к вибрации и ударам.* Пружинные контакты более устойчивы к вибрации, чем обычные соединители, так как пружины поглощают удары и вибрацию.
7. *Простое соединение с другими компонентами.* Соединение с помощью пружинных контактов намного проще, чем все известные соединения. Они легко устанавливаются без использования сложных инструментов, что экономит время.
8. *Самоочищение от окислений и загрязнений.* Это помогает уменьшить или устранить проблемы, которые возникают из-за окисления контактов со временем и обеспечить низкое контактное сопротивление.
9. *Разнообразие дизайна.*

Области применения пружинных соединителей [13–16].

1. Автоматизированные системы тестирования больших объёмов печатных плат.
2. Соединение печатных плат в электронных устройствах, работающих под воздействием ударов и вибраций.
3. Бытовая электроника: ноутбуки, мобильные телефоны и др.
4. Автомобильная электроника. Зарядные устройства аккумуляторов.
5. Интеллектуальные медицинские инструменты.
6. Аэрокосмическая отрасль: стабильное соединение на большой высоте в условиях экстремально высоких температур и давления.
7. Фазированные антенные решётки.
8. Датчики Интернета вещей.

Заключение

Пружинные контакты и соединители на их основе нашли широкое применение в современной электронике. Высокая плотность интеграции и очень малые размеры упрощают сборку печатных плат и, следовательно, значительно снижают затраты. Они сокращают ручной труд и открывают перед конструкторами новые возможности проектирования.

Литература

1. How Do Coaxial Pogo Pins Differ from Standard Pogo Pins. Collabnix. 20th November 2024. URL: https://collabnix.com.
2. PCB Spring Contacts: Everything You Need to Know. URL: https://globalwellpcba.com.
3. How to Connect Two PCB Boards: A Complete Guide for Engineers, 2025.02.22. URL: https://sqpcb.com.
4. *Гетцман А.* What are Interposers? Meet the Connector: Interposers. URL: https://connectorsupplier.com.
5. *Джуринский К.Б.* Эволюция коаксиальных радиокомпонентов. М.: ВАШ ФОРМАТ, 2026. 344 с.
6. PCB Soldering Issues: 7 Common Problems and Solutions. URL: https://venture-mfg.com.
7. A New Solder-less, Spring-Loaded Coax Connector Revolutionizes RF Connectivity. January 27, 2026. URL: https://rf-design.co.za.
8. Контакты Pogo Pin. URL: https://platan.ru/news/PogoPin.
9. What Is a Pogo Pin? Full Guide to Spring Loaded Pins – CFECONN. URL: https://cfeconn.com.
10. Design Guide Federkontakte Pogo Pins. URL: https://www.nh-technology.de.
11. What Are Spring Loaded Electrical Contacts and How Do They Work August 13, 2025. Heqing Electronics. URL: https://heqingele.com.
12. *Завалин И.* Подпружиненные контакты и особенности их применения для создания сигнальных, силовых, коаксиальных и дифференциальных соединений // Компоненты и технологии. 2018. № 2. С. 17–21.
13. IDI Spring Probes (Smiths Interconnect). Argenta Elektronik GmbH. URL: https://argenta-elektronik.com.
14. *Marx D., Rohannes R., Bozzo P.* Spring probe contact solutions for solderless interconnections, basic design criteria and overview of case studies and developments. ESCIES. URL: https://escies.org.
15. Spring-Loaded Pogo Pins Guide: How to Choose Right. URL: https://electronics.alibaba.com.
16. Соединители Smiths Connectors для ответственных приложений. URL: https://elec.ru.
17. 11 Advantages of Spring-Loaded Contacts. SOS Engineering. 14 июня 2018. URL: https://www.soseng.com.



Реклама

Как выбрать разъём для электронного устройства

Денис Родионов (компания «Эиком»)

У разъёма могут совпадать шаг и число контактов, но это ещё не делает его подходящей заменой. Кабельная часть может не состыковаться с ответной, контакт не подойти к проводу, а защёлка оказаться недоступной после установки платы. Такие вещи лучше проверить на образце, пока устройство не ушло в серию.

С каталогом разъёмов можно ознакомиться, перейдя по ссылке в QR-коде

Начните с места установки

Сначала опишите, что соединяет разъём: две платы, провод и плату или два кабеля. Затем посмотрите на сборку целиком. В какую сторону выходит жгут? Хватает ли места для его изгиба? Можно ли вставить ответную часть и нажать на защёлку, не снимая соседний узел?

Допустим, плата стоит у стенки корпуса. Прямой разъём может помещаться по высоте, но после подключения провод упрётся в крышку. Угловое исполнение решит эту задачу только в том случае, если рядом достаточно места для кабеля. Проверять стоит габариты соединённой пары с проводом, а также пространство для сборки и обслуживания.

Для первичного сравнения вариантов из каталога разъёмов удобно записать тип соединения, число цепей, шаг, способ монтажа и доступное место. Подробные размеры и допуски затем сверяют по чертежу конкретного изделия.

Подбирайте обе половины вместе

Для кабельного соединения список деталей может включать корпус, обжимные контакты, ответную часть и дополнительные фиксаторы. У герметичных исполнений к ним добавляются уплотнения и заглушки. Состав зависит от серии, поэтому покупать один корпус по фотографии недостаточно.

Совместимость проверяют по перечню ответных изделий производителя. Кроме шага и числа позиций важны форма ключей, исполнение контактов и полная посадка пары. Если рядом стоят одинаковые гнёзда для разных цепей, механическое кодирование помогает исключить ошибочное подключение. Цвет корпуса удобен для сборщика, но сам по себе не мешает вставить штекер не туда.

Отдельно сверьте нумерацию выводов и схему подключения. Пара, которая правильно соединяется механически, ещё не подтверждает правильность разводки питания и сигналов. В рабочей документации нужно однозначно показать, с какой стороны изображён разъём (рис. 1).

Проверяйте условия допустимого тока

Значение тока в каталоге относится к определённым условиям испытания. На нагрев влияют сечение провода, температура вокруг соединения и число одновременно нагруженных контактов. Поэтому ток одного контакта нельзя автоматически переносить на полностью нагруженный многопозиционный разъём.

В документации ищут зависимость допустимого тока от температуры и условия испытаний. Если их нет, допустимый режим уточняют у производителя. Например, соединение рядом с нагревающимся силовым узлом нужно оценивать при температуре внутри работающего корпуса. Комнатная температура на открытом столе не описывает этот режим.

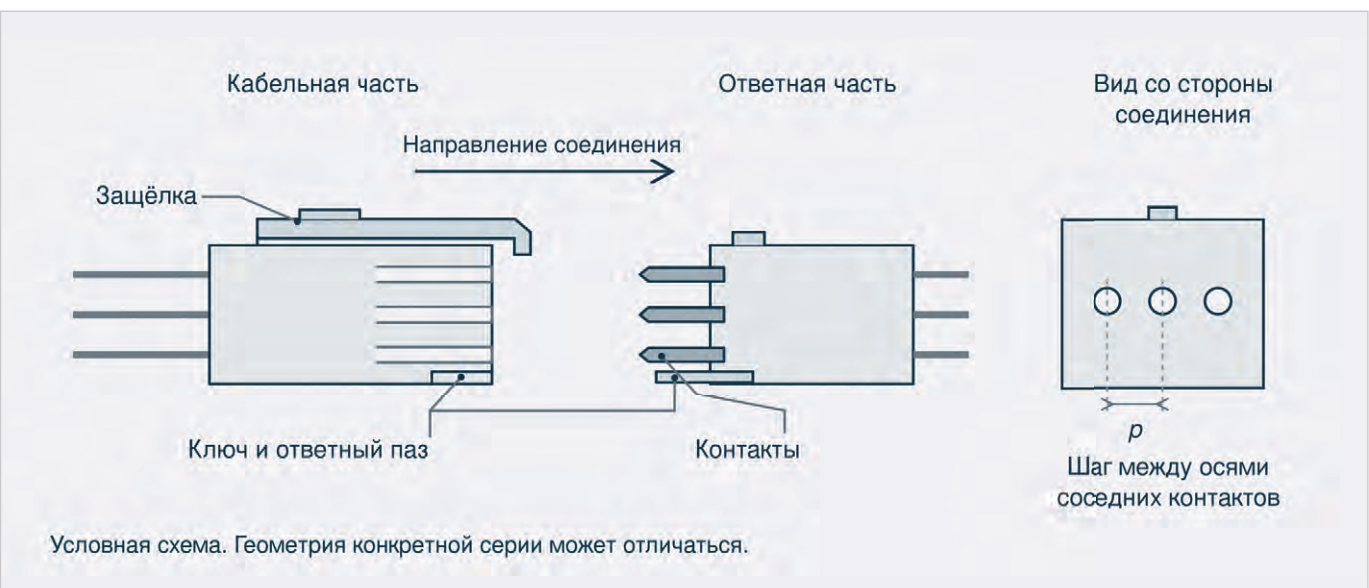


Рис. 1. Элементы соединяемой пары и шаг контактов. Условная схема



Рис. 2. Параметры нагрузки, эксплуатации и сборки, которые проверяют при выборе разъёма

Рабочее напряжение проверяют отдельно. Также не стоит считать обычный разъём пригодным для размыкания под нагрузкой: такую возможность должна подтверждать документация. Для высокоскоростных линий дополнительно проверяют характеристики передачи сигнала, а не ограничиваются числом контактов.

Учитывайте обслуживание и условия работы

Разъём внутри прибора могут соединить один раз при сборке. Испытательный стенд, напротив, требует регулярных подключений. Для этих случаев полезно сравнивать ресурс соединений конкретных исполнений. Он зависит от конструкции контакта, покрытия, его толщины и условий эксплуатации. Одного слова о позолоте в описании недостаточно.

При выборе покрытия учитывают и ответную часть. Произвольно смешивать исполнения с разными покрытиями не стоит: допустимую пару проверяют по рекомендациям производителя. Если изделие работает при вибрации, смотрят условия соответствующих испытаний и способ фиксации жгута.

Защита от влаги тоже относится к определённой сборке. Например, TE Connectivity описывает влагостойкость DEUTSCH DT для правильно смонтированного и соединённого разъёма. Для выбранной серии нужно выяснить, какие уплотнения требуются и сохраняется ли защита в разомкнутом состоянии (рис. 2).

Проверьте провод и обжим

Обжимной контакт подбирают под сечение жилы и диаметр изоляции. Два провода одного сечения могут отличаться по наружному диаметру. Это важно для фиксации изоляции, а у герметичных серий ещё и для работы уплотнения.

До заказа партии выясните, какой инструмент предусмотрен для выбранного контакта и доступен ли он на производстве. Качество обжима оценивают по требованиям изготовителя. В проверку могут входить высота обжима, положение жил и изоляции, внешний вид и усилие вырыва. Ручная проверка натяжением провода не заменяет эти измерения.

Что проверить на образце

Соберите соединение с тем проводом и инструментом, которые будут использоваться в серии. Установите его в корпус. Проверьте посадку, фиксацию, доступ к защёлке и отсутствие натяжения жгута. Затем проведите предусмотренные проектом электрические и температурные испытания, включая наиболее тяжёлый рабочий режим.

По результатам зафиксируйте полные артикулы обеих половин, контактов и вспомогательных деталей, тип провода и требования к сборке. Эта запись пригодится и закупщику, и монтажнику. Если позже потребуется замена, её можно будет сравнить с проверенной конфигурацией, а не с похожим изображением в каталоге.

Литература

1. Molex. Connector Fundamentals: Gender, Polarization, Keying and Coding. URL: https://www.molex.com/en-us/trends-insights/engineering-insights/connector-mating.
2. TE Connectivity. Connectivity for Power Demands. URL: https://www.te.com/en/products/connectors/automotive-connectors/intersection/connectivity-for-power-demands.html.
3. Samtec. Connector Plating FAQs: Normal Force, Cycles, Temperature. URL: https://blog.samtec.com/post/connector-plating-faqs-normal-force-cycles-temperature-and-other-essentials/.
4. Samtec. Dissimilar Metals in Mating Connectors. URL: https://blog.samtec.com/post/dissimilar-metals-in-mating-connectors/.
5. TE Connectivity. FAQs: DEUTSCH DT Connectors. URL: https://www.te.com/en/faqs/deutsch-dt-connectors.html.
6. Molex. Quality Crimp Handbook. URL: https://www.molex.com/content/dam/molex/molex-dot-com/products/automated/en-us/commercialcrimpbookpdf/638/63800/TM-638000029-001.pdf.

Когда энергию девать некуда: BESS сегодня и завтра

Юрий Широков

Большие литий-железо-фосфатные ячейки ёмкостью сотни и тысячи ампер-часов становятся одним из ключевых направлений развития стационарных систем накопления энергии. На примере решений EVE Energy, HiTHIUM и BYD рассмотрено, как укрупнение ячеек меняет архитектуру BESS – от количества соединений и требований к BMS до теплового управления, безопасности и экономики эксплуатации. Отдельное внимание уделено роли PCS, EMS и алгоритмов искусственного интеллекта, а также перспективам новых электрохимических систем. Главный вопрос отрасли сегодня заключается уже не в том, насколько большой может быть аккумуляторная ячейка, а в том, где проходит граница между преимуществами укрупнения и ростом технических рисков.

Введение

Представим аккумулятор, способный хранить около двух киловатт-часов энергии. Для электромобиля это лишь небольшой фрагмент батарейного блока, но для смартфона – совершенно недостижимый масштаб. А если таких аккумуляторов собрать десятки тысяч, получится энергетическая установка, способная запасать сотни мегаватт-часов электроэнергии.

Именно так долгое время и масштабировались крупные системы накопления энергии: необходимую энергоёмкость получали прежде всего за счёт увеличения количества относительно маломощных ячеек. Теперь отрасль постепенно меняет сам принцип масштабирования. Производители делают не только больше батарей, но и увеличивают размер каждой отдельной ячейки.

Если несколько лет назад крупноформатными считались элементы ёмкостью порядка 280–300 А·ч, то сегодня на рынке появились решения на 600, 1000 и более 2000 А·ч. На первый взгляд это выглядит как естественная гонка за большей ёмкостью: чем больше ячейка, тем меньше их потребуется для накопителя той же энергоёмкости.

Но за простой арифметикой скрывается гораздо более интересная инженерная история.

Оказалось, что увеличение ёмкости и физического масштаба ячейки влечёт за собой изменение количества межсоединений, конструкции батарейных блоков, системы охлаждения, требований к BMS (Battery Management System – система управления батареей), силовой электронике, диагностике, безопасности и даже логистике. Иными словами, производители постепенно меняют не отдельный аккумулятор, а архитектуру всей системы хранения энергии.

Один из наиболее заметных примеров – литий-железо-фосфатная ячейка EVE Energy ёмкостью 628 А·ч. На её основе компания создала 5 МВт·ч систему Mr.Giant. В 2025 году такие системы начали применяться в крупном независимом накопителе мощностью 200 МВт и энергоёмкостью 400 МВт·ч в китайском уезде Линшоу. 31 января 2026 года EVE сообщила о подключении объекта к сети; в составе станции – 80 систем Mr.Giant и 40 интегрированных кабин преобразования и повышения напряжения. По данным компании, к началу 2026 года совокупный выпуск её крупноформатных аккумуляторных ячеек превысил 1 млн штук.

При этом 628 А·ч уже нельзя считать пределом. Компания HiTHIUM в 2024 году представила MIC1130Ah – ячейку класса 1 кА·ч, ориентированную на системы длительного хранения энергии. Производитель указывает для неё удельную энергию не менее 180 Вт·ч/кг и ресурс до 15 000 циклов при заданных условиях испытаний.

Ещё дальше пошла BYD с системой Haohan, использующей крупноформатные элементы Blade Battery. В технической документации компании для одного из вариантов системы указана номинальная энергоёмкость 14 568 кВт·ч и мощность 3,642 МВт. Система использует жидкостное охлаждение, а степень защиты корпуса заявлена на уровне IP66.

Это не означает появления нового формального отраслевого стандарта. Речь идёт о тенденции: крупноформатная ячейка становится одним из главных инструментов оптимизации BESS – Battery Energy Storage System (аккумуляторная система хранения энергии).

И здесь возникает главный вопрос. Если большую ячейку можно сделать надёжной, безопасной и недорогой, она действительно способна упростить накопитель. Но где проходит граница, после которой дальнейшее укрупнение перестаёт давать преимущество?

Возможно, именно поиск этой границы станет одной из главных инженерных задач следующего поколения BESS. Об этом, в частности, мы и поговорим, но сначала, во избежание распространённой путаницы, пара слов о единицах измерения и параметрах аккумуляторов.

А·ч, Вт·ч и МВт: три разных параметра

628 А·ч – это не энергия, а электрическая ёмкость. Ампер-час характеризует количество электрического заряда, которое может быть передано в нагрузку при заданных условиях. Чтобы оценить энергию, необходимо учитывать ещё и напряжение.

Если взять номинальное напряжение LFP-ячейки около 3,2 В, получится:

628 А·ч × 3,2 В ≈ 2009,6 Вт·ч,

то есть примерно 2 кВт·ч номинальной энергии.

Это уже позволяет представить масштаб: одна такая ячейка запасает примерно столько же номинальной энергии, сколько несколько десятков аккумуляторов бытового класса.

Однако 2 кВт·ч нельзя считать фактически доступной ёмкостью. Реальная отдаваемая ячейкой энергия зависит от рабочего диапазона напря-

жения, допустимой глубины разряда, температуры, токов заряда и разряда, деградации и ограничений системы управления.

Есть и ещё одна удобная для сравнения батарей характеристика – удельная энергия аккумулятора. Она представляет собой отношение запасаемой энергии к массе батареи и показывает, сколько энергии можно «извлечь» из 1 килограмма полностью заряженной батареи. Этот параметр весьма критичен, в частности, для автономного электрического транспорта.

Итак:

А·ч – электрическая ёмкость.

Вт·ч – запас энергии.

Вт или МВт – мощность.

Вт·ч/кг – удельная энергия.

Это разные физические параметры, и для BESS такое различие особенно важно.

Система мощностью 200 МВт и энергоёмкостью 400 МВт·ч в идеализированном случае может отдавать 200 МВт примерно два часа. При мощности 100 МВт теоретическое время увеличится примерно до четырёх часов.

Именно соотношение мощности и энергоёмкости определяет, какую услугу накопитель способен предоставлять энергосистеме.

От электромобиля к электросети

История современных аккумуляторов долгое время естественным образом развивалась вокруг мобильности. Для электромобиля каждый килограмм батареи имеет значение. Увеличение массы уменьшает запас хода или требует установки батареи ещё большей ёмкости. Поэтому разработчики стремятся получить как можно больше ватт-часов из каждого килограмма батареи, одновременно повышая мощность и сохраняя приемлемый уровень безопасности.

Стационарный накопитель энергии живёт по другим правилам. Ему не нужно разгоняться, преодолевать подъёмы или втискиваться под пол автомобиля. Никого не интересует, насколько быстро можно переместить сам накопитель из пункта «А» в пункт «Б» – он же стационарный.

Зато критически важно другое: сколько электроэнергии можно хранить за приемлемую стоимость, сколько циклов выдержит батарея, сколько энергии будет потеряно при преобразовании «накопитель←→сеть», как долго система сможет работать без серьёзного ремонта и насколько безопасной останется эксплуатация на протяжении десятилетий. Поэтому для BESS максимальная удельная энергия ячейки далеко не всегда является главным критерием.

Иногда немного более массивная и менее энергоёмкая химическая система оказывается выгоднее, если она дешевле, долговечнее и проще в эксплуатации. Именно здесь особенно хорошо проявили себя литий-железо-фосфатные аккумуляторы – LFP, $LiFePO_4$.

LFP относится к литий-ионным химическим системам, в которых катод выполнен на основе литий-железо-фосфата. В типичной ячейке используется графитовый анод, пористый сепаратор и электролит, обеспечивающий перенос ионов лития между электродами. LFP обычно уступает никельсодержащим литий-ионным химиям по удельной энергии, зато предлагает привлекательное сочетание стоимости, циклической долговечности и термической стабильности. Кроме того, катодный материал LFP не содержит никель и кобальт.

Для стационарного накопителя такой компромисс часто выглядит разумно. BESS позволяет частично компенсировать относительно невысокую удельную энергию архитектурой самой установки. Батарейные блоки размещаются в контейнерах, рядом работают системы охлаждения, пожарной безопасности, преобразования энергии, управления и связи. В результате заказчик получает уже не «большую батарею», а энергетическую установку.

Именно в силу блочной компоновки размер ячейки становится особенно интересным. Если одна ячейка содержит больше энергии, для создания накопителя заданной ёмкости потребуется меньше элементов. А значит, потенциально потребуется меньше электрических межсоединений, датчиков, коммутационных элементов и монтажных операций.

Но здесь возникает первый парадокс: чем меньше элементов в системе, тем бóльшую долю общей энергии представляет собой каждый из них. Поэтому отказ крупной ячейки потенциально имеет более серьёзные последствия, чем отказ одного элемента в системе, состоящей из значительно большего числа небольших ячеек.

Получается своеобразный инженерный компромисс:

- меньше соединений – потенциально меньше точек отказа;
- меньше ячеек – проще сборка;
- более крупная ячейка – выше концентрация энергии.

Но:

- выше концентрация энергии – жёстче требования к диагностике и безопасности;
- более масштабная физическая структура – сложнее управление тепловыми режимами.

Именно в балансировании между этими противоречивыми приоритетами сегодня строится значительная часть конкуренции производителей BESS.

Меньше ячеек – не обязательно проще

Представим два накопителя одинаковой энергоёмкости. Первый построен на большом количестве относительно небольших ячеек, второй – на гораздо меньшем количестве крупноформатных. С точки зрения запасаемой энергии они могут быть эквивалентны, но конструктивно это совершенно разные устройства.

Каждая ячейка требует электрического соединения. Необходимо контролировать её напряжение и, в зависимости от архитектуры, температуру. Необходимо обеспечить механическую фиксацию, электрическую изоляцию, балансировку и обмен данными с системой управления.

Если ячеек становится в несколько раз меньше, сокращается объём таких операций. Это потенциально уменьшает:

- число соединений;
- объём монтажных работ;
- количество вспомогательных компонентов;
- сложность электрической архитектуры.

Кроме того, повышается и энергоёмкость на единицу занимаемого объёма.

EVE связывает крупноформатную архитектуру Mr.Big с сокращением количества системных компонентов и монтажных операций. Компания заявляла о сокращении количества компонентов на 50%, монтажного объёма на 50% и эксплуатационных расходов жизненного цикла на 30%.



Рис. 1. Принцип построения энергетической системы BESS

Однако эти цифры необходимо рассматривать как показатели, заявленные производителем для собственной архитектуры. Их нельзя автоматически переносить на все BESS.

Здесь проходит важная граница между рекламной характеристикой и инженерным выводом. Можно уверенно сказать, что уменьшение количества ячеек потенциально снижает количество соединений и компонентов. Но нельзя автоматически утверждать, что любая BESS с более крупными ячейками будет дешевле. Производитель может сэкономить на одних элементах и одновременно потратить больше на охлаждение, диагностику, пожарную защиту или механическую конструкцию. Поэтому правильнее говорить не об устранении сложности, а о её «размытии» по другим компонентам системы.

От ячейки к контейнеру

Именно этот принцип хорошо виден на примере EVE. 628 А·ч ячейка получила название Mr.Big. На её основе компания построила 5 МВт·ч DC-систему Mr.Giant. Это принципиальное различие: Mr.Big – аккумуляторная ячейка, Mr.Giant – уже энергетическая система (рис. 1).

В 2025 году EVE сообщила о масштабном применении Mr.Giant в китайском проекте 200 МВт / 400 МВт·ч. Позднее компания объявила о поставках таких систем в Австралию и Европу. В ноябре 2025 года EVE сообщила о первой поставке Mr.Giant в Австралию, где система должна использоваться для интеграции возобновляемой генерации, снижения пиковых нагрузок и регулирования частоты. В январе 2026 года компания сообщила о подключении к сети 400 МВт·ч-станции, состоящей из 80 систем Mr.Giant по 5 МВт·ч и 40 кабин преобразования и повышения напряжения.

Такие проекты важнее очередного лабораторного рекорда, поскольку между «мы изготовили отличную ячейку» и «мы построили на её основе сетевой объект» находится огромная инженерная дистанция. Ячейка должна пройти квалификационные испытания, производство должно обеспечивать стабильные характеристики, затем тысячи элементов необходимо объединить в систему, обеспечить их охлаждение, управление и защиту. И только после этого накопитель можно подключать к энергосистеме.

Поэтому переход от 628 А·ч-технологии к объекту на сотни мегаватт-часов – один из показательных этапов развития крупноформатных батарей.

Что находится внутри современной BESS

Если открыть контейнерную BESS, мы не увидим там одной гигантской батареи. Перед нами окажется многоуровневая система (рис. 2).

На нижнем уровне находятся электрохимические ячейки. Они объединяются в модули и батарейные блоки.

Далее появляется BMS – Battery Management System. BMS контролирует состояние батареи: напряжения, температуры, токи, состояние заряда и другие параметры. В зависимости от архитектуры она также оценивает SoC – State of Charge (состояние заряда), и SoH – State of Health (состояние «здоровья» батареи). Для эксплуатационных задач важна и оценка доступной мощности, то есть способности батареи выполнить требуемую функцию в конкретный момент.

Следующий уровень – тепловая система. Для крупных установок всё чаще применяется жидкостное охлаждение, поскольку оно позволяет эффективно управлять температурой больших массивов ячеек.

Отдельный уровень – пожарная безопасность. Здесь используются датчики, системы обнаружения аварийных процессов, отключения оборудования, вентиляции и средств пожаротушения.

Далее находится PCS – Power Conversion System. Именно эта система обеспечивает двунаправленный обмен энергией между постоянным током батареи и переменным током электрической сети.

Над всем этим располагается EMS – Energy Management System, управляющая уже не отдельной ячейкой, а энергетическим поведением всей станции.

Получается многоуровневая архитектура:

электрохимия → BMS → тепловая система → защита → PCS → EMS → сеть

И чем крупнее становится батарея, тем теснее взаимодействуют эти уровни. Поэтому разговор о «большой батарее» постепенно становится условным. Перед нами уже не просто аккумулятор, а сложная киберфизическая энергетическая система.

Цена укрупнения: тепло, безопасность и качество

Увеличение размера ячейки выглядит простым лишь на бумаге: электрохимические системы плохо поддаются простому геометрическому масштабированию. При заряде и разряде в батарее выделяется тепло. Его количество зависит от электрического режима, сопротивления, конструкции ячейки и других факторов. В крупногабаритной ячейке внутренние области могут находиться дальше от эффективных путей отвода тепла, а распределение температуры и тока становится более сложной задачей.

Проблема заключается не только в средней температуре. Гораздо важнее температурная неоднородность. Если разные участки ячейки работают при разных температурах, они могут стареть с различной скоростью. Меняются внутреннее сопротивление и кинетика электрохимических процессов, что, в свою очередь, тоже влияет на распределение тока и тепла. Получается потенциально замкнутый цикл: неоднородность ускоряет неоднородное старение.

Поэтому увеличение размера ячейки должно сопровождаться развитием тепловой архитектуры. Именно здесь жидкостное охлаждение становится особенно привлекательным. Но оно является далеко не бесплатным решением: появляются насосы, теплообменники, трубопроводы, клапаны, датчики и управляющая автоматика. В результате сокращение количества электрических компонентов может сопровождаться ростом сложности тепловой подсистемы, которая, кстати, ещё и потребляет энергию.

Это и есть принципиальный парадокс крупноформатной ячейки: меньше электрической сложности – больше требований к тепловой и диагностической архитектуре.

Диагностика становится критически важной

Представим накопитель, в котором было 20 000 ячеек, а после перехода на более крупные элементы их стало 5000.

С точки зрения соединений это очевидное преимущество. Но теперь каждая ячейка содержит значительно бóльшую долю общей энергии. Поэ-

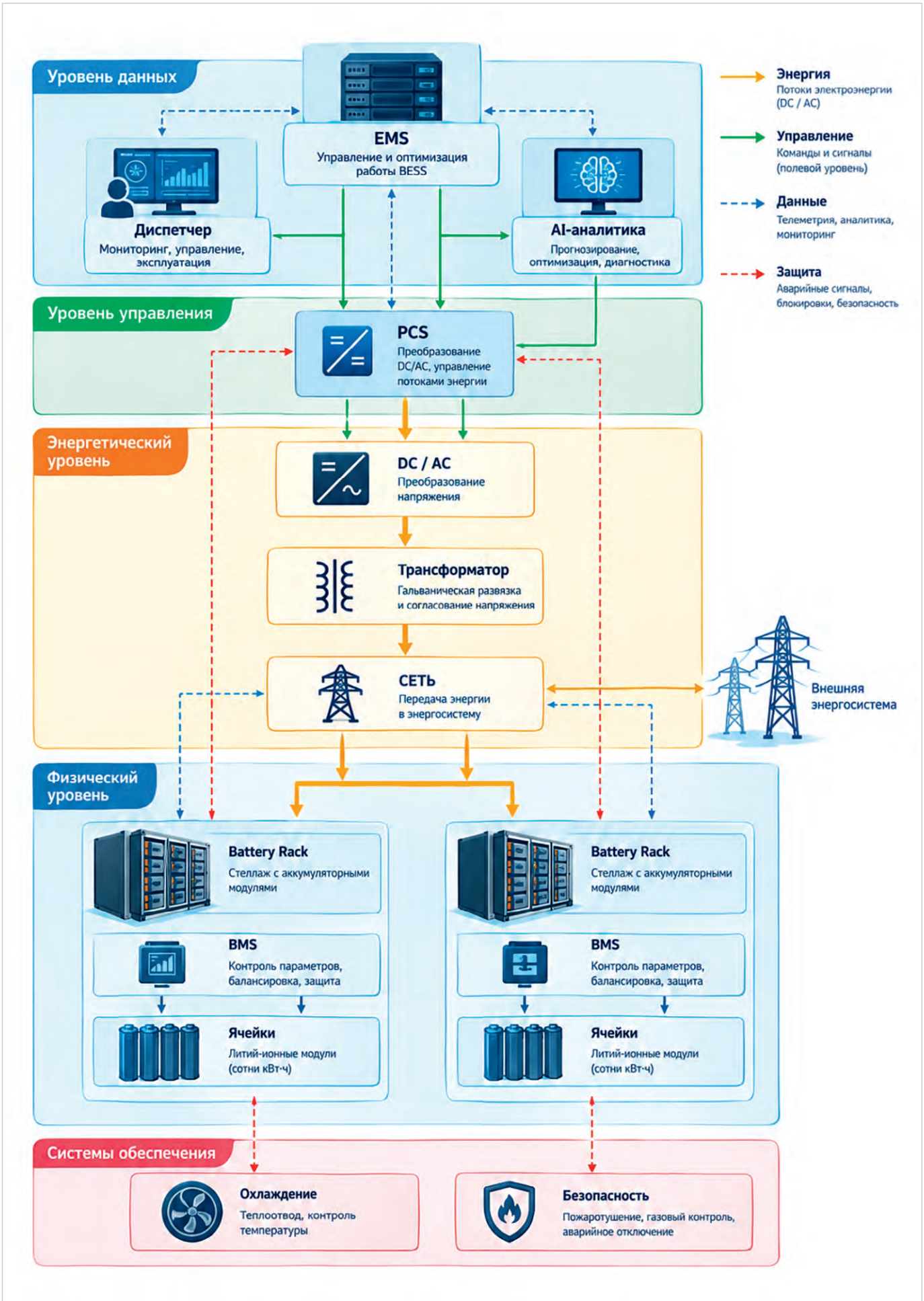


Рис. 2. Архитектура решений BESS

тому система управления должна гораздо лучше понимать состояние каждого элемента.

BMS должна отслеживать не только абсолютные значения, но и динамику изменения параметров:

- напряжения;
- температуры;
- тока;
- SoC;
- SoH;
- внутреннего сопротивления и связанных с ним диагностических признаков;
- отклонения от поведения соседних элементов.

Если температура одной ячейки постепенно начинает отличаться от соседних, это может быть диагностическим сигналом. Если при одинаковом режиме заряда один элемент демонстрирует отличное от других поведение, системе необходимо определить причину.

Таким образом, чем меньше ячеек в системе, тем важнее становится роль каждой из них.

Производственный контроль

Увеличение ёмкости одного элемента повышает требования и к производству.

Представим небольшой производственный дефект. В небольшой ячейке его последствия могут быть относительно локальными. В крупной потенциально затрагивается гораздо больший запас энергии.

Поэтому крупноформатные элементы требуют строгого контроля:

- геометрии;
- толщины электродов;
- качества нанесения активных материалов;
- сварных соединений;
- герметичности корпуса;
- электрических параметров;
- результатов формирования и старения.

Появляется интересная зависимость: чем дешевле становится единица накопления энергии, тем дороже может оказаться цена производственной ошибки.

Отсюда следует ещё один важный вывод. Масштабирование BESS невозможно без параллельного развития автоматизированного контроля качества. Производственная автоматизация становится частью энергетической безопасности ещё до того, как батарея попадёт в контейнер.

1130 А·ч: следующий рубеж

Если 628 А·ч стало заметным рубежом, то 1130 А·ч показывает, куда движется отрасль дальше.

В 2024 году HiTHIUM представила первую ячейку класса 1 кА·ч MIC1130Ah для длительного хранения энергии. В документации компании указывается рабочее напряжение 2,5–3,65 В при температуре выше 0°C и 2,0–3,65 В при более низких температурах, удельная энергия не менее 180 Вт·ч/кг и ресурс до 15 000 циклов при 25°C, глубине разряда 100% и мощности 0,25 P до достижения 60% исходного состояния здоровья.

Компания также заявляла объёмную энергоёмкость около 400 Вт·ч/л и повышение эффективности системной интеграции по сравнению с 280 А·ч решением.

Однако здесь важно не столько запомнить число 1130, сколько понять направление развития. Производители пытаются перенести всё бóльшую долю энергии с уровня множества отдельных элементов на уровень одной ячейки. Это позволяет уменьшать количество элементов и одновременно повышать плотность системы. Но каждая новая ступень ёмкости требует заново решать целый набор задач.

То же относится к показателям ресурса. Цифры вроде 10 000 или 15 000 циклов впечатляют, но инженерный вопрос всегда звучит одинаково: при каких условиях? Количество циклов зависит от глубины разряда, температуры, токов заряда и разряда, рабочего диапазона напряжения и критерия окончания ресурса. Если батарея проходит 15 000 циклов в лабораторном режиме при строго заданных параметрах, это не означает, что любая реальная BESS гарантированно выдержит столько же циклов при любых условиях. Кроме циклической деградации существует календарное старение. Батарея меняет характеристики даже тогда, когда не проходит полный цикл. Поэтому нельзя просто разделить 15 000 циклов на один цикл в сутки и объявить получившееся число сроком службы.

Ресурс – это всегда характеристика пары: **батарея + режим эксплуатации.**

BYD Haohan: когда контейнер становится единицей эффективности

Другой путь к высокой плотности показывает BYD. Система Haohan использует крупноформатные элементы Blade Battery и рассчитана на высокую концентрацию энергии в контейнерном исполнении (рис. 3). В актуальной технической документации BYD для одного из вариантов указана номинальная энергоёмкость 14 568 кВт·ч при номинальной мощности 3,642 МВт. Система имеет жидкостное охлаждение, степень защиты IP66 и рассчитана на работу при температуре от −30°C до +55°C, причём при температуре выше 45°C предусмотрено снижение характеристик.

Эти цифры интересны прежде всего потому, что заставляют изменить единицу измерения эффективности. Раньше внимание в основном уделялось характеристикам отдельной ячейки, теперь всё чаще обсуждается, сколько энергии можно разместить в стандартном контейнерном объёме.

Для заказчика это вполне практический вопрос. Допустим, необходимо построить BESS на несколько сотен мегаватт-часов. Если один контейнер содержит меньше энергии, понадобится больше контейнеров, а это означает:

- больше потребной площади;
- больше кабелей;
- больше коммутационного оборудования;
- больше систем охлаждения;
- больше противопожарной инфраструктуры;
- больше монтажных операций;
- больше потенциальных точек обслуживания.

Поэтому повышение энергии на единицу объёма способно дать эко-



Рис. 3. Контейнер как самостоятельная единица

номический эффект далеко за пределами самой батареи. Но только при условии, что безопасность, ремонтопригодность и надёжность остаются на приемлемом уровне.

PCS: между батареей и сетью

Даже самая большая батарея не подключается непосредственно к электрической сети. Аккумулятор хранит энергию в форме постоянного тока, тогда как сеть (в подавляющем большинстве случаев) работает с переменным. Между ними находится PCS – Power Conversion System, или система преобразования электроэнергии.

PCS обеспечивает двунаправленное преобразование энергии и становится одним из ключевых элементов управления накопителем. От её характеристик зависит, насколько быстро батарея сможет принимать и отдавать мощность. Современная PCS должна не просто преобразовывать постоянное напряжение в переменное. Она должна управлять параметрами взаимодействия с сетью:

- поддерживать напряжение;
- участвовать в регулировании частоты;
- реагировать на переходные процессы;
- выполнять команды верхнего уровня;
- обеспечивать защитные режимы.

В некоторых архитектурах BESS система PCS должна обладать функциями grid-forming – участвовать в формировании параметров электрической сети, а не только следовать уже существующим сетевым напряжению и частоте. Это особенно важно по мере роста доли инверторной генерации.

Поэтому аккумуляторная индустрия постепенно становится неотделимой от индустрии силовой электроники.

BYD развивает для этого направления платформу GC Flux PCS с мощностью до 10 МВт. В материалах компании указываются пиковый КПД до 99,35%, кратковременная перегрузка до трёхкратного значения в течение 10 секунд и высокая удельная мощность.

Здесь принципиально важно различать мощность батареи и мощность PCS. Если аккумулятор имеет энергоёмкость, например, 10 МВт·ч – это запас энергии. Если PCS имеет мощность 10 МВт, он определяет максимальную скорость обмена этой энергией с сетью при соответствующей конфигурации системы.

Это разные параметры, которые должны быть согласованы.

Поэтому развитие BESS идёт одновременно по нескольким направлениям:

- больше энергии на ячейку;
- больше энергии на контейнер;
- выше мощность и КПД PCS;
- эффективнее управление;
- точнее диагностика.

Нельзя бесконечно улучшать только один параметр. Если батарея может хранить огромный объём энергии, а PCS не способен быстро его отдавать, высокая энергоёмкость не решает задачу регулирования мощности. Если PCS очень мощный, но батарея быстро деградирует, экономическая эффективность системы будет низкой. Если батарея и PCS работают хорошо, но EMS неправильно выбирает режимы эксплуатации, потенциальная ценность накопителя также останется нереализованной. BESS – это задача оптимизации всей системы.

EMS: мозг энергетической системы

Если BMS следит за состоянием батареи, то EMS управляет энергетическим поведением всей станции. Это значительно более сложная задача. EMS должна учитывать состояние заряда батарей, доступную мощность, ограничения PCS, температуру, прогноз генерации, прогноз нагрузки, состояние сети и, в зависимости от конкретного рынка, стоимость электроэнергии.

Например, солнечная электростанция днём может производить избыток энергии. На первый взгляд, решение очевидно: зарядить батарею. Но если прогноз показывает ещё более высокую генерацию через час, а цена электроэнергии вечером будет значительно выше, оптимальная стратегия может быть другой. Накопитель должен не просто заряжаться при разряде, а выбирать для этого лучший момент. То же относится к разряду. Если батарея будет полностью разряжена днём для компенсации небольшой нагрузки, она окажется бесполезной вечером, когда потребление возрастёт до критического уровня.

Поэтому экономическая ценность BESS определяется не только количеством мегаватт-часов. Она определяется тем, насколько разумно система распоряжается этими мегаватт-часами. И здесь накопитель начинает напоминать промышленный автоматизированный объект, содержащий измерительные системы, локальные контроллеры, исполнительные механизмы, силовые преобразователи, системы связи, верхний уровень оптимизации и связь с внешней диспетчерской инфраструктурой.

Только вместо управления роботами, насосами, клапанами, компрессорами и печами система управляет потоком электрической энергии.

ИИ: не вместо защиты, а вместе с ней

На верхнем уровне управления естественным образом появляется искусственный интеллект (куда же сегодня без него). Но его роль часто представляют слишком широко. В BESS ИИ, как и в любой АСУ ТП, не должен заменять аппаратную защиту. Если температура ячейки выходит за допустимый диапазон, безопасность не может зависеть от того, правильно ли нейросеть классифицировала ситуацию. ИИ гораздо полезнее там, где необходимо анализировать большие массивы данных и находить слабые признаки изменений.

Алгоритмы машинного обучения могут:

- сравнивать поведение отдельных ячеек;
- анализировать температурные профили;
- на основе статистики выявлять аномалии;
- отслеживать изменение диагностических параметров;
- сопоставлять деградацию с историей циклов;
- прогнозировать остаточный ресурс;
- выявлять признаки потенциальных неисправностей.

Это уже классическая задача predictive maintenance – предиктивного обслуживания. Оператор физически не способен вручную анализировать десятки тысяч параметров и замечать слабое отклонение в поведении одной группы ячеек, но алгоритм может выполнять такую работу непрерывно. Поэтому правильная архитектура выглядит не как «ИИ безраздельно властвует над батареей».

Она выглядит иначе:

ИИ анализирует и прогнозирует. BMS контролирует состояние батареи.

Аппаратная защита ограничивает опасные режимы.
PCS управляет силовой частью.
EMS оптимизирует режим станции.
Оператор или диспетчерская система задаёт внешние цели.

Это значительно ближе к архитектуре современной промышленной автоматизации, где безопасность и предсказуемость процессов имеют приоритет перед интеллектуальностью алгоритма.

Больше энергии – больше контроля

Итак, высокая энергетическая плотность выглядит исключительно положительно: больше энергии в том же объёме – меньше контейнеров. Но для инженера по безопасности это одновременно означает больше энергии в одном физическом пространстве. LFP считается более термически стабильной химией по сравнению с рядом никельсодержащих литий-ионных систем, но это не означает, что LFP невозможно «загнать» в опасный режим. В батарее запасено большое количество энергии и содержится весьма горючий электролит, в состав которого обычно входят органические растворители и соли лития. При серьёзном повреждении или неблагоприятном сочетании факторов (например, при внутреннем КЗ в ячейке вследствие производственного дефекта) может возникнуть тепловой разгон с выделением газов и воспламенением. Поэтому крупная BESS должна проектироваться как многоуровневая система безопасности.

На уровне ячейки важны качество производства и конструктивные меры: на уровне модуля – контроль температуры и напряжения; на уровне батарейного блока – локализация неисправностей и безопасное отключение; на уровне контейнера – обнаружение аварийных процессов, вентиляция и пожарная защита; на уровне всей площадки – продуманные расстояния между объектами, зоны безопасности, организация доступа и взаимодействие с аварийными службами.

Поэтому «безопасность эксплуатации LFP» – не свойство, которое можно выразить одним словом. Это результат работы всей архитектуры.

Ремонтопригодность во главе архитектуры

Есть ещё одна проблема, которая редко выглядит эффектно на выставочном стенде, – ремонтопригодность. Сделать максимально компактный контейнер относительно легко, если преследовать только высокую плотность энергии. Но реальная станция должна работать годами. Что произойдёт, если один батарейный блок потребует замены? Можно ли безопасно его отключить? Есть ли к нему физический доступ? Можно ли заменить оборудование без демонтажа соседних систем? Как проверить новый блок перед включением? Как синхронизировать его с остальными? Чем выше степень интеграции, тем важнее ответить на эти вопросы ещё на этапе проектирования.

Поэтому хорошая BESS должна быть одновременно компактной и управляемо-модульной. Но это снова кажется противоречием: инженеры-разработчики стремятся уменьшить количество компонентов и упаковать их поплотнее, а сервисные службы хотят иметь возможность быстро заменить неисправный узел. В результате оптимальная архитектура должна сокращать ненужную сложность, но сохранять возможность локального ремонта и обслуживания.

BESS как промышленная система

Если описать современную BESS простой схемой, она будет выглядеть примерно так:

ячейка → модуль → батарейный блок → контейнер → PCS → трансформатор → сеть

Но между этими уровнями проходит ещё один поток – данные. Ячейка передаёт данные системе управления, BMS взаимодействует с контроллерами контейнера, контейнер взаимодействует с PCS, PCS передаёт состояние EMS, EMS принимает решения, диспетчерская система передаёт внешние команды.

Получаются два параллельных потока: энергия идёт по силовой цепи, данные идут по информационной. Именно взаимодействие этих двух потоков превращает набор батарей в интеллектуальную энергетическую систему.

С этой точки зрения современная BESS всё больше напоминает объект АСУ ТП: на нижнем уровне работают измерительные устройства, они получают данные о напряжении, токе, температуре и состоянии оборудования, далее находятся локальные контроллеры, выше – управление батарейными блоками, затем PCS, затем EMS, наконец, диспетчерский уровень.

Это практически знакомая архитектура промышленного предприятия.

Поэтому развитие BESS создаёт пересечение сразу нескольких инженерных областей:

- электрохимии;
- силовой электроники;
- автоматизации;
- телеметрии;
- промышленного программного обеспечения;
- кибербезопасности;
- аналитики данных.

Именно поэтому крупные накопители становятся интересными не только производителям аккумуляторов, но и поставщикам промышленной автоматизации, силового оборудования и программных систем управления.

Защита от хакера

У цифровизации есть и обратная сторона. Большая BESS становится сетевым устройством. У неё появляются контроллеры, коммуникационные интерфейсы, удалённый мониторинг, программное обеспечение, системы управления и связь с диспетчерской инфраструктурой. Следовательно, появляется потенциально благодатная почва для кибератак. Если злоумышленник получит доступ к системе управления, возможный ущерб может выражаться не только в краже данных. Теоретически он может попытаться изменить режим заряда, мощность отдачи, вывести часть оборудования из работы или создать нестандартный режим эксплуатации.

Поэтому кибербезопасность для BESS – не дополнительная функция, а часть архитектуры.

Здесь необходимы:

- сегментация IT- и OT-сетей;
- разграничение доступа;
- защищённые каналы связи;
- журналирование событий;
- контроль обновлений;
- управление учётными записями;
- механизмы безопасного восстановления;
- разделение информационного и защитного уровней.

Последний пункт особенно важен: даже если программная система будет скомпрометирована, физические и

независимые защитные механизмы должны продолжать выполнять свою функцию. Это ещё один аргумент в пользу многоуровневой архитектуры.

Большая ячейка – большие токи

Есть ещё один параметр, который помогает понять масштаб задачи, – C-rate. C-rate – это отношение тока заряда или разряда к номинальной ёмкости ячейки. Например, для ячейки 628 А·ч ток 1C соответствует примерно 628 А, а для 1130 А·ч – около 1130 А. Это не означает, что конкретная ячейка обязательно должна работать на таком токе. C-rate лишь задаёт нормированное отношение, тогда как допустимые режимы определяются конструкцией и спецификацией конкретного элемента. Тем не менее масштаб очевиден: уже одна крупноформатная ячейка может работать с токами порядка сотен ампер или выше. Эти токи должны проходить через токосъёмники, шины, коммутационные элементы и кабели. Поэтому рост ёмкости одной ячейки автоматически затрагивает силовую инфраструктуру.

Отсюда снова возникает системная цепочка:

- **ячейка определяет электрохимический потенциал;**
- **шины и коммутация должны пропустить ток;**
- **PCS должен преобразовать энергию;**
- **трансформатор должен работать с соответствующей мощностью;**
- **сеть должна принять или отдать эту мощность;**
- **EMS должен управлять процессом.**

BESS реализуема только тогда, когда все эти уровни работают согласованно.

Кому нужны накопители на сотни мегаватт-часов

Самый очевидный ответ – возобновляемая энергетика. Солнечная электростанция производит энергию преимущественно днём, тогда как потребление продолжается круглосуточно. Ветер тоже не подстраивается под график нагрузки. Возникает временной разрыв между генерацией и потреблением. Батарея позволяет его компенсировать: энергия, полученная в момент высокой генерации, переносится на время, когда генерация снижается.

Но этим функции BESS не ограничиваются.

Накопители могут:

- участвовать в регулировании частоты;
- поддерживать напряжение;
- сглаживать пики нагрузки;
- предоставлять резерв мощности;
- работать в микросетях;
- поддерживать критическую инфраструктуру;
- резервировать отдельные объекты;
- участвовать в формировании сетевых параметров.

Поэтому рынок BESS нельзя сводить к простой формуле «солнечная или ветровая электростанция плюс батарея». Накопитель становится полноценным инструментом управления и балансировки энергосистемы.

Особенно интересной областью становятся дата-центры. Рост искусственного интеллекта приводит к появлению вычислительных кластеров с очень высоким энергопотреблением. Для такого объекта важна не только энергия за сутки. Критически важны мощность и скорость реакции.

Если сетевое питание исчезает даже на короткое время, вычислительная инфраструктура должна пережить переход без потери критических процессов. Традиционно эту задачу решает комбинация ИБП, аккумуляторов и резервных генераторов. Но по мере роста мощности дата-центров энергетическая архитектура становится всё сложнее. Крупная BESS может выполнять сразу несколько функций. В нормальном режиме она способна сглаживать пики нагрузки. В определённых условиях – уменьшать потребление из сети. При аварии – поддерживать нагрузку. При наличии солнечной или другой локальной генерации – координировать её работу.

В результате аккумулятор становится частью энергетической инфраструктуры дата-центра, а не просто резервным источником питания. Это ещё один пример превращения батареи из пассивного объекта в управляемый элемент энергетической системы.

Дешевле ячейка – не дешевле накопитель

Предположим, производитель предлагает две ячейки. Одна дешевле на 10%. Вторая дороже, но служит дольше, имеет лучшие тепловые характеристики и позволяет построить более компактный контейнер. Какая выгоднее? Однозначного ответа нет. Именно поэтому для оценки систем хранения применяется показатель LCOS – Levelized Cost of Storage, или приведённая стоимость хранения энергии.

В расчёт могут входить:

- стоимость батарей;
- PCS;
- контейнеров;
- охлаждения;
- пожарной защиты;
- строительства;
- подключения к сети;
- эксплуатации;
- технического обслуживания;
- деградации;
- замены или расширения батарей;
- стоимость электроэнергии для зарядки;
- потери энергии при цикле.

В результате самая дешёвая ячейка не обязательно определяет самую дешёвую BESS. И это одна из главных причин, почему увеличение размера ячейки стало настолько интересным. Если более крупный элемент позволяет уменьшить количество сопутствующих компонентов и объём инфраструктуры, он способен снизить стоимость хранения энергии на протяжении жизненного цикла. Но только в том случае, если дополнительные расходы на охлаждение, безопасность, диагностику и обслуживание не съедят полученную экономию.

Почему нельзя просто сделать ячейку в десять раз больше

На этом месте возникает естественный вопрос: если большая ячейка лучше маленькой, почему бы не сделать её ещё больше?

Почему 628 А·ч, а не 5000? Почему 1130 А·ч, а не 10 000?

Ответ связан с физикой и электрохимией. Увеличение размеров элемента означает изменение расстояний, на которых должны эффективно происходить перенос ионов, движение электронов и отвод тепла. Необходимо сохранять равномерность распределения тока, контролировать температуру, обеспечивать механическую стабильность электродов, учитывать изменение объёма материалов во время циклирования, выдерживать внутренние механические нагрузки и обеспечивать надёжную герметизацию.

Иными словами, нельзя просто масштабировать ячейку геометрически. Если увеличить все размеры в несколько раз, характеристики не обязательно увеличатся пропорционально.

Поэтому переход от 300 к 600 А·ч – не просто «ячейка в два раза больше». Это новая инженерная конструкция. То же самое относится к переходу от 600 к 1000 А·ч и далее.

Именно поэтому дальнейший рост ёмкости будет, вероятно, сопровождаться всё более сложной оптимизацией материалов и конструкции.

Батарея Эдисона возвращается

В контексте разговора о разновидностях аккумуляторов любопытно вспомнить технологию, которая старше большинства современных батарейных систем. Это никель-железная батарея. В начале XX века её активно развивал Томас Эдисон. Как ни странно сейчас это звучит, в 1900 году электромобили занимали заметное место на американском рынке, а никель-железная химия рассматривалась как возможная основа более долговечных аккумуляторов.

Однако ранние электрические автомобили сталкивались с высокой стоимостью батарей, ограниченным запасом хода и отсутствием удобной инфраструктуры. Тем временем двигатель внутреннего сгорания быстро развивался, а вместе с ним – топливная инфраструктура и массовое производство автомобилей. Эта история интересна не только сама по себе. Она показывает, что технология может проиграть не потому, что физически бесперспективна. Иногда она проигрывает экосистеме.

Но сегодня ситуация изменилась. Электрические сети существуют практически повсеместно. Возобновляемая генерация стремительно развивается, а цифровые системы способны управлять огромным количеством распределённых устройств. Поэтому некоторые старые электрохимические идеи снова становятся предметом исследований.

В феврале 2026 года международная исследовательская группа при участии UCLA сообщила о новой никель-железной батарее, вдохновлённой исторической технологией Эдисона.

Здесь необходимо сделать важное уточнение: это не новый вариант LFP, не усовершенствованная 628 А·ч-ячейка и не промышленный конкурент Mr.Giant. Это отдельная электрохимическая архитектура, находящаяся на стадии исследовательского прототипа. Исследователи использовали белковые структуры для формирования очень мелких кластеров никеля и железа, после чего интегрировали их с ультратонким углеродным материалом для создания электродов. По данным UCLA, получившийся прототип мог заряжаться за секунды и продолжал работать после более чем 12 000 циклов зарядки и разрядки. Авторы рассматривают такую архитектуру как потенциально интересную для хранения энергии от возобновляемых источников.

Почему это интересно? Потому что здесь исследователи пытаются решить задачу не за счёт масштабирования ячейки, а за счёт изменения структуры активного материала. Малые металлические кластеры увеличивают доступную для электрохимической реакции поверхность, ультратонкий проводящий материал может уменьшать ограничения, связанные с транспортом заряда. Получается совершенно другой путь развития.

Поэтому смешение этих технологий создало бы неправильное впечатление. LFP – зрелая литий-ионная химия, уже используемая в крупных серийных BESS. Никель-железная батарея, о которой сообщила группа UCLA, – исследовательская технология. У них разные материалы электродов, электрохимические процессы, эксплуатационные характеристики и уровни технологической готовности. Поэтому сравнивать их как «две версии одной батареи» некорректно. Гораздо правильнее рассматривать их как два разных направления развития накопителей.

И именно такое разделение, вероятно, будет характерно для будущей энергетики: не одна универсальная батарея, а несколько технологий, оптимизированных для разных режимов эксплуатации.

Для автомобильной батареи быстрая зарядка является почти универсальной ценностью, но для сетевого накопителя всё сложнее. Если BESS установлена рядом с солнечной электростанцией и должна переносить дневную генерацию на вечер, ей может быть совершенно не нужно заряжаться за несколько минут. Она может получать энергию несколько часов.

Для регулирования частоты важна скорость реакции, для резервирования электроснабжения дата-центра она ещё важнее, для некоторых промышленных процессов критична возможность многократных быстрых циклов отдачи высокой мощности, для long-duration storage на первый план выходит длительность отдачи энергии. Поэтому абсолютное понятие «лучшей батареи» постепенно теряет смысл. Правильнее говорить о батарее, оптимальной для конкретного режима эксплуатации.

Климат, старение и конец жизненного цикла

Аккумуляторная химия чувствительна к температуре. При низких температурах меняется кинетика электрохимических процессов, возрастает внутреннее сопротивление и могут возникать ограничения на заряд. При высоких температурах ускоряется деградация и увеличивается нагрузка на систему охлаждения. Поэтому BESS в северном регионе и BESS в пустынном климате требуют разных инженерных решений. Для одного объекта главным вопросом станет обогрев, для другого – охлаждение. Но в обоих случаях система должна поддерживать приемлемый температурный диапазон. Это ещё один аргумент в пользу комплексного сравнения BESS: две батареи с одинаковой паспортной энергоёмкостью могут иметь совершенно разные эксплуатационные характеристики в реальном климате.

Есть и другой аспект. Сегодня рынок в основном сосредоточен на строительстве и вводе в эксплуатацию новых накопителей. Но батареи имеют конечный срок эксплуатации. Когда крупная BESS отработает проектный ресурс, потребуется решить, что делать с её батарейной частью.

Возможны разные сценарии:

- восстановление отдельных блоков;
- использование части оборудования в менее требовательных приложениях;
- извлечение ценных материалов;
- переработка батарей.

LFP не содержит никеля и кобальта в катодном материале, что может быть преимуществом с точки зрения стоимости и сырьевой структуры. Но это не означает, что батарею можно



Рис. 4. Принцип временно́й электростанции

считать экологически нейтральной: в ней остаются литий, графит, медь, алюминий, электролит и другие материалы. По мере роста рынка BESS экономика утилизации будет становиться всё важнее. Особенно если через несколько лет одновременно выйдет из эксплуатации большое количество крупноформатных систем.

Иногда предлагается простой сценарий: батарея потеряла часть ёмкости в BESS – значит, её можно установить в менее требовательную систему. Но это не всегда экономически выгодно. Для second-life необходимо демонтировать батарейный блок, проверить его состояние, отсортировать элементы, оценить остаточный ресурс, собрать новую систему и снова обеспечить её безопасность. Иногда стоимость этих операций оказывается выше экономической выгоды. Поэтому повторное использование будет развиваться там, где оно действительно оправдано технически и экономически. В других случаях предпочтительным вариантом может оказаться переработка материалов.

Жизненный цикл BESS нельзя заканчивать моментом подключения станции к сети.

Логистика большой ячейки

Есть ещё один аспект, о котором редко вспоминают: большая батарея тяжелее. Если в одном контейнере находится несколько мегаватт-часов энергии, его необходимо транспортировать, разгружать и устанавливать с учётом требований безопасности. Международные поставки добавляют собственные ограничения. Требуются соответствующая упаковка, маркировка, сертификация и процедуры обращения с литий-ионными аккумуляторами. В результате крупноформатная ячейка влияет даже на логистическую архитектуру отрасли. Это уже не просто вопрос производства. Производитель должен думать о том, как его продукт будет перемещаться между заводом и энергетическим объектом, иногда через несколько стран и климатических зон.

Где оптимум?

Теперь можно сформулировать главный инженерный конфликт. Чем больше ячейка, тем меньше элементов необходимо. Меньше элементов – меньше соединений. Меньше соединений – проще сборка. Проще сборка – потенциально ниже стоимость. Меньше компонентов – потенциально меньше точек отказа.

Но одновременно: чем больше ячейка, тем больше энергии находится в одном элементе; чем больше энергии, тем выше потенциальные последствия отказа; чем больше физический масштаб, тем сложнее управление тепловыми режимами; чем сложнее тепловой режим, тем сложнее система охлаждения; чем выше плотность энергии, тем выше требования к безопасности; чем выше интеграция, тем важнее диагностика и ремонтопригодность.

Таким образом, крупная ячейка не устраняет сложность, она перераспределяет её. Раньше значительная часть сложности находилась в огромном количестве элементов, соединений и монтажных операций. Теперь она перемещается в тепловую инженерию, диагностику, защиту, производственный контроль и программное управление. И это, пожалуй, самое важное следствие нынешней гонки за ёмкостью.

Но, скорее всего, идеального размера нет. Он зависит от режима эксплуатации. Для солнечной BESS оптимум будет одним, для дата-центра – другим,

для частотного регулирования – третьим, для long-duration storage – четвёртым. Поэтому отрасль, вероятно, не придёт к одной гигантской ячейке, которая вытеснит все остальные.

Будут существовать разные классы элементов, оптимизированные под:

- низкую стоимость;
- высокую плотность;
- длительный ресурс;
- высокую мощность;
- быстрый отклик;
- конкретные климатические условия.

Именно поэтому показатель А·ч сам по себе постепенно теряет статус главного критерия.

Возвращаясь к 628 А·ч-ячейке EVE, важно правильно оценить её значение. Она не является абсолютным пределом и не является единственной крупной ячейкой на рынке, не создаёт формальный отраслевой стандарт. Но она показывает другое: крупноформатная ячейка такого масштаба может быть массово произведена, интегрирована в 5 МВт·ч DC-систему и использована в сетевом объекте на сотни мегаватт-часов. EVE сообщила о более чем 1 млн произведённых крупных ячеек, а Mr.Giant вышел на международные рынки. Это уже не концепт, но это и не безусловное доказательство того, что максимальное увеличение размера автоматически является лучшим решением. Скорее это доказательство жизнеспособности самой архитектурной идеи.

Есть ли идеальная химия?

На этом фоне LFP выглядит не как временный компромисс, а как одна из наиболее практичных химических систем для массового стационарного хранения. Она сочетает относительно невысокую стоимость, хорошую циклическую долговечность и благоприятные характеристики с точки зрения термической стабильности. И главное – эта химия уже получила огромную производственную базу. Это крайне важное преимущество.

Но LFP не обязательно станет единственной батареей будущего. Исследования вроде работы группы UCLA показывают, что поиск новых решений продолжается. Другие литий-ионные химии сохранят отдельные ниши. Никель-железные и другие альтернативные системы могут получить коммерческий шанс, если подтвердят свои свойства при масштабировании.

Кроме того, механические, тепловые и другие способы хранения будут конкурировать с батареями там, где окажутся экономически выгоднее. В результате будущая энергосистема, скорее всего, будет представлять собой не один огромный аккумулятор, а набор технологий, каждая из которых оптимизирована под свой режим эксплуатации.

Вместо заключения. «Временна́я электростанция»

Есть интересная точка зрения на BESS. Обычная электростанция превращает первичную энергию в электрическую, солнечная станция преобразует солнечное излучение, ветряная – энергию движения воздуха, газовая – химическую энергию топлива. Батарея же не производит ничего. Она лишь перемещает энергию во времени (рис. 4). Энергия, полученная сегодня днём, может быть отдана вечером. Энергия, накопленная ночью, может использоваться утром. Мощность, сохранённая заранее, может быть предоставлена сети в момент аварии. В этом смысле BESS действительно можно назвать «временно́й электростанцией». Она не увеличивает количество произведённой энергии. Она меняет момент, в который эта энергия становится доступной. Именно это свойство становится особенно ценным в современных энергосистемах с высокой долей солнечной и ветровой генерации.

Но следующий этап развития BESS, вероятно, будет определяться уже не вопросом о том, насколько большой может быть аккумуляторная ячейка. Главный вопрос будет другим: насколько большой должна быть ячейка, чтобы дополнительная ёмкость улучшала систему, а не переносила сложность туда, где она «съедает» полученную выгоду?

Именно на поиске этого оптимума – между энергоёмкостью, стоимостью, ресурсом, безопасностью, тепловым режимом и управляемостью – сегодня и строится следующий этап развития накопителей энергии.

Литература

1. International Energy Agency. Batteries and Secure Energy Transitions. Paris: IEA, 2024. URL: https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions.
2. International Energy Agency. Batteries and Secure Energy Transitions: Executive Summary. Paris: IEA, 2024. URL: https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/executive-summary.
3. International Energy Agency. Batteries and Secure Energy Transitions: Status of Battery Demand and Supply. Paris: IEA, 2024. URL: https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/status-of-battery-demand-and-supply.
4. International Energy Agency. Batteries and Secure Energy Transitions: Outlook for Battery Demand and Supply. Paris: IEA, 2024. URL: https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions/outlook-for-battery-demand-and-supply.
5. EVE Energy. Setting New Trends: EVE Energy Unveils Impressive Mr. Flagship Series at EESA Expo 2024. 2024. — Материалы компании о ячейке Mr. Big 628 Ah и системе Mr. Giant 5 MWh. URL: https://www.evebattery.com/en/news-1855.
6. EVE Energy. EVE Energy's World's First 628Ah Ultra-Large Battery Energy Storage Station Connected to Grid, Secures Major 10GWh Order. 2026. – Данные о подключении к сети системы мощностью 400 MWh с 80 системами Mr. Giant. URL: https://www.evebattery.com/en/news-1894.
7. HiTHIUM. MIC 1130Ah: Long-Duration Energy Storage Battery. 2024. – Материалы производителя о 1130-Ah ячейке, плотности энергии и заявленном ресурсе до 15 000 циклов. URL: https://hithium.com/newsroom/activities/details/56.html.
8. *Walker H.* Best Practices for Operation and Maintenance of Photovoltaic and Energy Storage Systems. 3rd ed. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2018. NREL/TP-7A40-73822. DOI: 10.2172/1489002. URL: https://research-hub.nlr.gov/en/publications/best-practices-for-operation-and-maintenance-of-photovoltaic-and-/.

К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Часть 7. Оптические уровни и плазмон-поляритоны Тамма

Виктор Алексеев

Эта статья завершает серию публикаций о научном наследии Игоря Тамма, в которой была проанализирована эволюция идей Тамма и его учеников от 1930-х годов до наших дней. Среди различных направлений, которыми в различные периоды своей жизни занимался Игорь Тамм, мы остановились на тематике, связанной с взаимодействием света с электронами на границе металла и диэлектрика. Данное направление, начавшееся с разработки теории «таммовских поверхностных состояний», логически продолжилось открытием оптических состояний Тамма (Optical Tamm States – OTS), а затем плазмон-поляритонов Тамма (Tamm Plasmon-Polaritons – TPP). Именно этим двум явлениям посвящена настоящая статья.

Введение

Напомним, что мы начали описание основных научных достижений Игоря Тамма с обзора статьи, опубликованной в 1932 году, в которой было теоретически предсказано существование нового физического состояния, получившего в настоящее время устойчивое название «поверхностные состояния Тамма» – ПСТ (Surface Tamm States – STS) [1].

Суть этого явления, как его описывал Тамм, заключалась в том, что граница кристалла представляет собой особую область с собственными электронными состояниями и свойствами, отличными от свойств объёмного материала.

Прежде чем перейти к дальнейшему описанию этого состояния, нужно отметить, что состояния Тамма часто путают с эффектом Шокли. Несмотря на то что это два физически разных механизма, они в конечном итоге формируют одинаковые, на первый взгляд, результаты.

В модели Игоря Тамма (1932 г.) электронный уровень появляется внутри запрещённой зоны, и электрон на нём «прижат» к поверхности кристалла. Однако этот уровень возникает потому, что потенциал на самом краю кристалла сильно отличается от потенциала внутри. На границе кристалла с одной стороны объёмная структура, а с другой – вакуум с потенциальным барьером, определяемым энергией работы выхода. Крайний атом оказывается в иных условиях, чем соседи внутри, и его собственная энергия сдвигается. Если сдвиг небольшой, ничего особенного не происходит.

Если сдвиг превышает некоторый пороговый уровень, возникает новый уровень в запрещённой зоне. Волновая функция такого состояния экспоненциально затухает как вглубь кристалла, так и в вакуум. Таким образом, ПСТ появляется только при достаточно сильном возмущении поверхностного потенциала, а его энергия лежит в запрещённой зоне.

Шокли рассмотрел другую модель, в которой разрешённые зоны образуются из разных атомных состояний (например, s и p). При сближении атомов эти зоны пересекаются. В такой системе на поверхности появляется уровень «без порога» в запрещённой зоне, даже когда кристалл обрезан симметрично и «идеально». В этом случае у атома на поверхности соседей меньше, чем внутри, поэтому часть его гибридных орбиталей остаётся неиспользованной. Этот подход получил название «ненасыщенные связи» (Dangling Bonds), локализованные на поверхности [2].

Необходимо особо подчеркнуть, что, несмотря на многочисленные попытки, отмеченные поверхностные состояния Тамма и Шокли крайне сложно было подтвердить экспериментально с использованием существовавших в то время методов.

Так, например, Браттейн и Бардин (W.H. Brattain, J. Bardeen) исследовали реальные поверхности германия. Они изучали, как поверхность полупроводника реагирует на внешние воздействия, в том числе на свет. Они выяснили роль окислов и адсорбатов в образовании поверхностных явлений. Однако по результатам их экспериментов связать эти состояния именно с механизмом Тамма или Шокли было нельзя [3].

В работе [4] Аллен и Гобелли измерили работу выхода и порог фотоэффекта на атомарно чистой поверхности кремния Si(111), расколотой непосредственно в сверхвысоком вакууме.

Полученные ими результаты свидетельствовали о наличии поверхностных состояний в запрещённой зоне на чистой неокислённой поверхности. Поверхностные состояния на чистой поверхности Si связывали, в частности, с ненасыщенными (оборванными) связями поверхностных атомов. Такая трактовка соответствовала модели Шокли.

Эти работы подтвердили возможность существования поверхностных состояний, предсказанных теорией Тамма и Шокли. Однако их нельзя считать прямым наблюдением таммовских состояний в чистом виде.

Были и другие многочисленные попытки экспериментальных доказательств существования ПСТ и уровней Шокли. Однако десятилетиями не удавалось наблюдать эти состояния в той чистой форме, в какой их рассматривали Тамм и Шокли [5].

Дополнительная информация об успешных экспериментах с поверхностными уровнями Шокли приведена в работе [6].

Дальнейшая история развития идеи поверхностных состояний, сформули-

рованная Игорем Таммом, рассмотрена ниже в этой статье.

Косвенные экспериментальные подтверждения существования уровней Тамма

Гениальный прогноз предсказанных Игорем Таммом поверхностных состояний в течение десятилетий оставался практически незамеченным мировой научной общественностью. Такая ситуация сложилась в 1930-е годы, поскольку в то время не было необходимых технологий и лабораторного оборудования для прямых экспериментов, подтверждающих теорию Тамма.

Реальный скачок в исследованиях процессов на границе кристаллов произошёл в конце 1960-х годов с открытием новых спектрографических методик.

По-видимому, первым экспериментальным косвенным подтверждением таммовских уровней на поверхности металла можно считать работу Л. Суонсона и Л. Краузера 1966 года [7].

Авторы этой работы использовали метод спектроскопии полного распределения энергии электронов с использованием автоэлектронной (полевой) эмиссии из острия вольфрамового монокристалла (Total Energy Distribution of Field-Emitted Electrons). Автоэлектронная эмиссия представляет собой туннелирование электронов из металла в вакуум под действием сильного электрического поля. В упрощённом виде схема такой установки напоминает вакуумный диод с особой геометрией электродов. Катод (эмиттер) изготавливается в виде иглы из вольфрама или углеродных материалов. Острие иглы – это заострённая пирамидальная вершина, на которой выходят наружу разные кристаллографические грани. Малый радиус кривизны заострённого конца катода позволяет получить огромную напряжённость электрического поля даже при относительно небольших разностях потенциалов. На анод (коллектор/экстракционный электрод), расположенный на небольшом расстоянии напротив катода, подавался высокий положительный потенциал относительно катода. За счёт этого в прикатодной области напряжённость поля была в диапазоне (3,0…4,3) × 10^7 В/см. Все элементы были размещены в вакуумной камере. Благодаря возникающему при конкретных параметрах туннельному эффекту электроны с определёнными энергиями преодолевали потенциальный барьер, соответствовавший работе выхода. С помощью устройства магнитного отклонения выбирали грани пирамидальной вершины катода, с которой вылетали электроны. Этот метод позволил не просто измерять суммарный туннельный ток, но также восстанавливать спектр электронов, эмитированных с острия иглы. Технически это было реализовано с помощью задерживающего потенциала, подаваемого на коллектор.

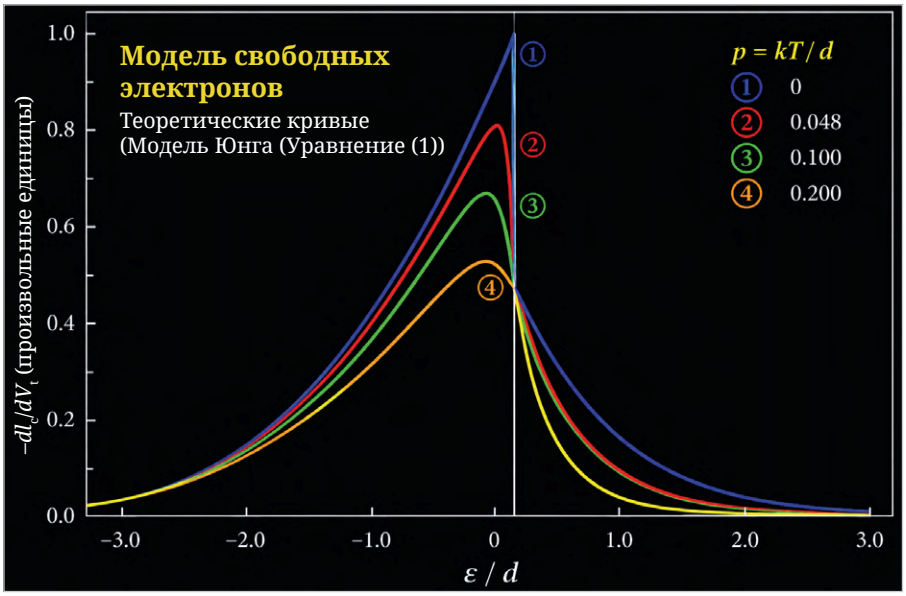


Рис. 1. Теоретические кривые, рассчитанные согласно модели свободных электронов

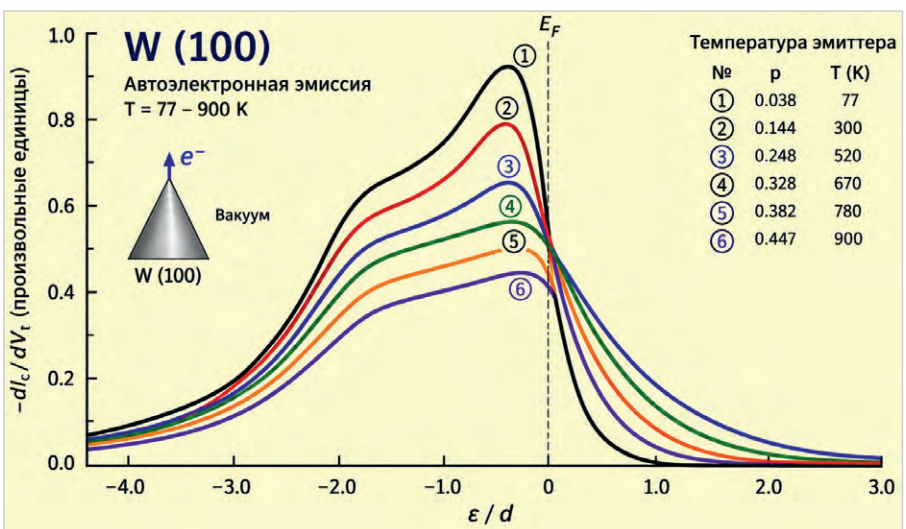


Рис. 2. Экспериментальные спектры распределения электронов для вольфрамового автоэмиттера в кристаллографическом направлении <100> при температурах эмиттера от 77K до 900K

Измерения проводились для кристаллографических направлений <112>, <116>, <110>, <111>, <130> и <100> атомарно чистого монокристалла вольфрама.

Эксперименты показали, что по всем направлениям, кроме <100>, измеренные спектры хорошо совпадали с теоретическими кривыми, полученными в рамках свободно электронной модели (Free-Electron Behavior Model) (рис. 1).

Нужно обратить внимание на то, что модель «Free-Electron Behavior» объясняет свойства металлов, рассматривая валентные электроны как газообразное облако, свободно движущееся внутри кристаллической решётки.

Результаты измерений спектров электронов для вольфрамового автоэмиттера в кристаллографическом

направлении <100>, полученные Л. Суонсоном и Л. Краузером, приведены на рис. 2. На этом рисунке по вертикали отложено −dI_c/dV_t в произвольных единицах, то есть производная тока коллектора по задерживающему напряжению. Это и есть плотность эмиссионного тока на единицу энергии, то есть сколько электронов вылетает с данной энергией. По горизонтали отложены значения не самой энергии в эВ, а безразмерная величина ε/*d*, где ε – энергия электрона относительно уровня Ферми; *d* = 0,174 эВ, параметр, характеризующий скорость изменения прозрачности барьера. Таким образом, одна единица по оси равна 0,174 эВ, что соответствует значению метки «−2,0», равному примерно −0,35 эВ.

Шесть разных экспериментальных кривых на рис. 2 соответствуют эмиттеру при шести значениях безразмерной температуры $p = kT/d$. Эти параметры относятся только к одной из них. Например, кривая 1 (p = 0,038) соответствует самой низкой в эксперименте температуре 77К, а кривая 6 (p = 0,447) получена для самой высокой в эксперименте температуре около 900К. Все кривые нормированы таким образом, чтобы было обеспечено совпадение по высоте пика при p = 0,25, а их задние склоны накладывались бы друг на друга. Именно этим объясняется узел, в котором все кривые сходятся вблизи ε = 0.

Справа от нуля, при ε > 0, ход кривых зависит от температуры эмиттера. Для кривой № 1 ток обрывается почти сразу за нулём. В то же время на кривой № 6 ток доходит до величины ε/*d* ≈ 2,6. Этот участок показывает, что с повышением температуры часть электронов попадает в область выше уровня Ферми. Таким образом, правая часть спектров на рис. 2 ведёт себя точно так, как предсказывает теория (рис. 1).

Слева от пика, согласно теории свободных электронов, должна находиться монотонная, гладкая, без каких-либо выбросов спадающая до нуля кривая (рис. 1). Вместо этого экспериментальные данные показывают (рис. 2), что после главного максимума (около ε/*d* ≈ −0,4) кривая идёт вниз, но затем спад прерывается. Примерно в диапазоне ε/*d* от −1,5 до −2,6 образуется почти горизонтальная площадка на уровне 0,5…0,55 по вертикальной оси, и только после ε/*d* ≈ −2,6 спад возобновляется, а кривая стремится к нулю. Это и была та самая «аномалия с широким плечом» приблизительно на 0,35 эВ ниже E_F, которую не смогли в 1966 году однозначно интерпретировать ни сами авторы, ни другие известные физики.

Если пользоваться инженерной аналогией, то можно сказать, что на плавно спадающей АЧХ хорошо известного усилителя появилась лишняя непонятная «ступенька», означающая, что в системе есть какой-то дополнительный энергетический канал.

Странным было то, что дополнительный подъём спектра, который получил известное в литературе название «горб Суонсона» (Swanson Hump), присутствовал на всех шести кривых, от 77К до высоких температур, и его положение по энергии не смещалось. Это исключало тепловую природу артефакта, демонстрируя тот факт, что нагрев менял только правую часть. Кроме того, такой формы спектров не наблюдалось ни для одного другого направления. Графики на рис. 2 в оригинальной работе были приведены именно для кристаллографического направления <100>. При этом для направлений <112>, <116>, <110>, <111> и <130> кривые получались гладкими, строго соответствовавшими теоретической модели.

Сами авторы Л. Суонсон и Л. Краузер связывали аномальное плечо с особенностями электронной зонной структуры вольфрама в направлении <100>.

Только в 1981 году российский физик А.Я. Беленький, соавтор «самосогласованной кластерной модели атомной структуры аморфного металла», назвал этот самый выступ первым из известных косвенных экспериментальных наблюдений таммовских уровней на поверхности металла. Тщательный анализ статьи Суонсона и Краузера показывает, что резкая привязка к кристаллографическому направлению является ярким доказательством поверхностной природы явления: «the direction of emission must coincide almost exactly with the <100> direction in order to observe the special distribution». Важно то, что уже при отклонении на 13° (направление <116>) аномальный «горб» практически исчезал. Такая жёсткая избирательность по грани означала, что «эффект дополнительного горба» связан с конкретным способом обрыва кристаллической решётки. Этот факт послужил основным доказательством того, что обрыв решётки и есть та самая граница, на которой Тамм предсказал локализованные электронные состояния.

Дальнейшие эксперименты с использованием независимых новых методов (спектроскопии полевой эмиссии, УФ-фотоэмиссии, спектроскопии ионной нейтрализации) позволили надёжно подтвердить поверхностную природу электронной структуры W(100). Так, например, Фойербахер и Уиллис, используя метод фотоэмиссионной спектроскопии, доказали наличие пика, расположенного на 0,4 эВ ниже уровня Ферми (E_F). Важно то, что этот пик сильно подавлялся после насыщенной адсорбции кислорода или водорода. Понятно, что объёмное свойство металла от одного напылённого слоя атомов существенно измениться и вообще исчезнуть в принципе не может. Однако такая экранировка поверхности полностью меняет её свойства. Таким образом, гашение монослоем кислорода явилось ещё одним аргументом того, что избыток электронов на этом дополнительном выступе был обусловлен не объёмным кристаллом, а исходил из состояний, существовавших на границе [8].

Прямое экспериментальное подтверждение существования уровней Тамма

В эти же годы бурно развивалось другое направление физики твёрдого тела, связанное с разработками полупроводниковых лазеров.

Как мы подробно рассказывали в журнале «Современная электроника» № 9, 2024, ещё летом 1971 года Жорес Алфёров из Ленинградского ФТИ имени А.Ф. Иоффе с коллегами подали заявку на изобретение, в которой авторы сформулировали идею конструкции, реализованной позже (1974 г.) в «лазерах с распределённой обратной связью» – РОС (Distributed Feedback Laser). В этих лазерах использовались резонаторы, в которых гофрированная гетерограница создавала периодическое изменение показателя преломления, что приводило к интерференционному отражению стимулированного излучения. Период решётки выбирался таким образом, чтобы обеспечить выполнение условия Брэгга для отражений в обратном направлении $d = \lambda/2n_e$, где λ – длина волны света

в вакууме, n_e – эффективный показатель преломления активной области, d – период решётки.

Необходимо отметить, что в ФТИ имени Иоффе успешно разрабатывались так называемые полупроводниковые сверхрешётки, которые можно представить как последовательность чередующихся слоёв узкозонных и широкозонных полупроводников. В сверхрешётке энергетические уровни отдельных квантовых ям образуют энергетические «минизоны», которыми можно управлять, изменяя толщину ям и разделяющих их барьеров. Работы, позже выполненные физтеховцами Р.Ф. Казариновым и Р.А. Суриссом, показали, что протекание тока в сверхрешётках может быть реализовано за счёт туннелирования через потенциальные барьеры, разделяющие квантовые ямы. Для теории Тамма сверхрешётка крайне полезна тем, что такую искусственную кристаллическую структуру с заранее заданным числом квантовых ям и параметрами потенциальных барьеров можно синтезировать в лабораторных условиях.

В 1987 году практически одновременно были независимо опубликованы две работы, ставшие классическими для теории фотонных кристаллов. В одной из них Эли Яблонович показал, что в трёхмерной периодической диэлектрической структуре может существовать фотонная запрещённая зона, определяющая диапазон частот, в котором распространение электромагнитных волн невозможно. Если частота излучательного перехода оказывается внутри такой запрещённой зоны, спонтанное излучение может быть подавлено.

При этом с помощью фазового сдвига можно формировать локальную моду в фотонной щели, пригодную в принципе для создания устройств, способных управлять потоками света подобно тому, как обычные полупроводники управляют потоками электронов [9].

Другой физик-теоретик Саджив Джон показал возможность сильной локализации света в разупорядоченной диэлектрической среде. При достаточно сильном многократном рассеянии интерференция многочисленных волн может подавить перенос электромагнитной энергии через среду. В результате свет оказывается локализованным в ограниченной области пространства. В этой работе впервые был использован термин «сильная фотонная локализация» (Strong Localization of Photons – SLP), определяющий ситуацию, когда многократное рассеяние и интерференция настолько сильны, что свет полностью перестаёт распространяться. При этом фотоны, как бы попавшие в ловушку, образуют стоячую волну, локализованную в ограниченной области [10].

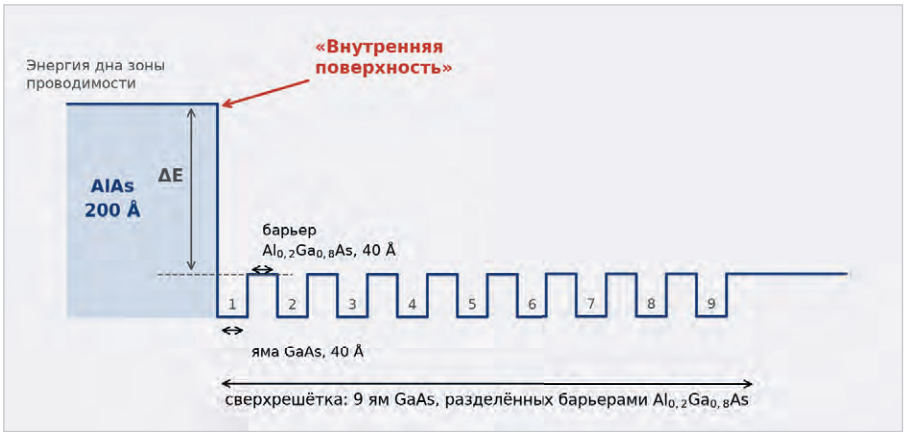


Рис. 3. Упрощённая схема полупроводниковой сверхрешётки, использованной для экспериментальной реализации ПСТ

Главная техническая проблема всех предыдущих экспериментов по экспериментальному обнаружению ПСТ состояла в том, что реальная поверхность конкретных естественных кристаллов представляет собой крайне сложную структуру. На этой поверхности одновременно присутствуют оборванные связи, элементы реконструкции, адсорбированные атомы, дефекты и другие отклонения от идеальной кристаллической решётки. Поэтому, даже обнаружив какое-либо поверхностное состояние наподобие поверхностных плазмонов, поляритонов и других явлений, с которыми мы познакомились в предыдущих разделах, трудно было бы доказать, что оно возникло именно согласно механизму, описанному Игорем Таммом.

По существу, гофрированная гетерограница РОС-лазера, разработанного в ФТИ имени Иоффе, представляла собой одномерный фотонный кристалл, встроенный прямо в активную область лазера. Таким образом, ещё до появления самого термина «фотонный кристалл» физтеховцы уже умели рассчитывать и изготавливать периодические структуры, отражающие свет по закону Брэгга.

Возможность искусственно создавать периодические структуры с заранее заданными параметрами оказалась принципиально важной и для экспериментальной проверки идеи Тамма. Только в данном случае речь шла уже не о фотонном кристалле, управляющем распространением света, а о полупроводниковой сверхрешётке с периодическим потенциальным профилем для электронов. Намеренно изменив одну из её границ, то есть создав так называемую «внутреннюю поверхность» (Internal Surface), исследователи получили возможность реализовать электронное поверхностное состояние Тамма практически в том виде, в каком оно было предсказано в 1932 году.

В 1990 году международная группа учёных во главе с известным японским физиком Хидео Оно (Hideo Ohno) синтезировала в лаборатории IBM Research Division полупроводниковую сверхрешётку на базе арсенида алюминия-галлия.

Эта многослойная полупроводниковая структура впервые предоставила возможность наблюдать таммовские состояния в практически специально сконструированной для этого системе [11].

С помощью этого искусственного кристалла удалось реализовать на практике модель, теоретически построенную Игорем Таммом в 1932 году. В грубом приближении схему этого эксперимента можно описать следующим образом (рис. 3).

В цепочке из девяти одинаковых GaAs-квантовых ям, разделённых одинаковыми барьерами $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$, электронные уровни образуют «минизону», в которой электрон может туннелировать из одной ямы в другую. Если у самой крайней ямы один из барьеров сделать существенно выше остальных, то периодичность решётки в этом месте резко нарушается.

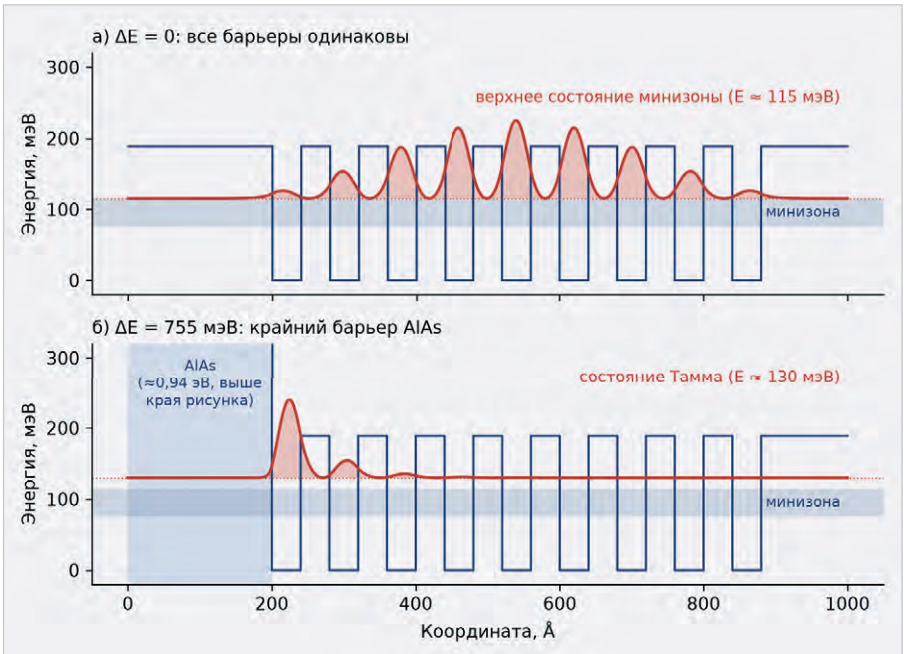


Рис. 4. Локализация волновой функции электронного состояния Тамма у «внутренней поверхности» сверхрешётки при ΔE = 755 мэВ

Один электронный уровень начинает «отрываться» от минизоны, а соответствующая ему волновая функция локализуется около границы раздела. Структуры сверхрешётки были синтезированы методом молекулярно-лучевой эпитаксии на GaAs(001). Основной элемент содержал девять квантовых ям GaAs толщиной ≈40 Å, разделённых барьерами $Al_{0,2}Ga_{0,8}As$ толщиной ≈40 Å. С одного края располагался слой AlAs толщиной 200 Å, который создавал повышенный конечный барьер.

Расчёты показали, что при ΔE = 0 все девять электронных состояний принадлежат одной минизоне и их волновые функции распределены по всей сверхрешётке. По мере увеличения высоты крайнего барьера верхний энергетический уровень начинает «отслаиваться» (Peel Off) от минизоны. При ΔE = 755 мэВ, соответствующем конечному барьеру AlAs, этот уровень уже практически отделён от минизоны, а его волновая функция оказывается почти полностью локализованной в крайней квантовой яме у «внутренней поверхности». Именно этот конечный результат расчёта в упрощённом виде показан на рис. 4.

В этой работе авторы использовали три экспериментальных оптических метода: PL – фотолюминесценцию, PLE – спектр возбуждения фотолюминесценции и PC – фототок. Измерения проводились при температуре 5K. Напряжённость управляющего поля можно было изменять от 0 до 40 кВ/см.

В спектре PLE при нулевом напряжении проявлялись обычные переходы: HH – электрон ↔ тяжёлая дырка и LH – электрон ↔ лёгкая дырка. Кроме того, был зафиксирован дополнительный сильный пик около 1,67 эВ. Такие результаты объяснялись тем, что в случае, когда локализованы и электрон, и тяжёлая дырка, их волновые функции оказываются сосредоточены в одной крайней яме. Поэтому возникает сильный экситонный переход между этими состояниями. Такой переход будет иметь большую энергию связи экситона и даст заметный пик в оптическом спектре. Именно такой переход между локализованными состояниями электрона и тяжёлой дырки был зафиксирован.

Особенно существенно, что рассчитанное положение этого перехода совпало с экспериментальным в пределах примерно ±1 мэВ. Для обычных HH и LH авторы использовали энергию связи экситона 5 мэВ, а для локализованного HH – 12 мэВ. Такая большая локализация подтверждается сильным экситонным пиком.

В качестве дополнительной проверки существования ПСТ использовалось воздействие внешнего электрического поля, приложенного к решётке.

При наличии ПСТ, локализованного около внутренней поверхности, изменение внешнего поля должно проявляться как отклонение от обычной ситуации, в которой энергетические уровни начинают зависеть от положения квантовой ямы и образуют так называемую лестницу Ванье – Штарка. Лестница Ванье – Штарка – это система дискретных энергетических уровней, возникающая в полупроводниковой сверхрешётке под воздействием постоянного внешнего электрического поля. В эксперименте антипересечение наблюдалось при напряжённости поля около 20 кВ/см, тогда как расчёт давал близкое значение около 25 кВ/см. Вместо обычного пересечения двух энергетических ветвей наблюдалось их расхождение – антипересечение (Anticrossing). Это означало, что два электронных состояния взаимодействуют между собой. Авторы прямо отметили, что антипересечение является результатом взаимодействия электронного состояния Тамма с состояниями минизоны, испытывающими штарковскую локализацию.

Перечисленные экспериментальные результаты можно было уверенно квалифицировать как переход от косвенных свидетельств к прямому экспериментальному наблюдению состояний Тамма в специально созданной для этой цели полупроводниковой структуре.

Работа Хидео Оно и соавторов практически дала экспериментальный ответ на вопрос, поставленный Игорем Таммом ещё в 1932 году: нарушение периодичности у границы кристалла действительно может привести к появлению локализованного электронного состояния. В искусственно созданной сверхрешётке один из электронных уровней отделялся от минизоны, а соответствующая ему волновая функция локализовалась у специально сформированной «внутренней поверхности» и быстро затухала вглубь периодической структуры. Именно это состояние авторы работы назвали состоянием Тамма.

Фотонные кристаллы и оптические уровни Тамма

Теорию краевых состояний в сверхрешётках продолжили развивать и в ФТИ имени Иоффе. В 1995 году М.Р. Владимирова и А.В. Кавокин рассмотрели таммовские состояния электронов на границе двух полупроводниковых сверхрешёток [12].

Именно эта работа стала отправной точкой для оптических состояний Тамма. Смысл такой постановки задачи легко понять на простом примере. Пусть с одной стороны грани-

цы находится одна сверхрешётка, а с другой расположена вторая, имеющая иные параметры толщины, ям и барьеров. У каждой из них свои разрешённые минизоны и свои запрещённые промежутки между ними. Если энергия электрона попадает в запрещённый промежуток сразу обеих сверхрешёток, электрон не может уйти ни влево, ни вправо: в обе стороны его волновая функция затухает. Остаётся одна возможность, заключающаяся в том, чтобы «прижаться» к границе. Это и есть таммовское состояние, только роль поверхности кристалла здесь играет стык двух периодических структур.

В 9 номере «Современной электроники» 2025 года мы подробно рассмотрели так называемые фотонные кристаллы, позволяющие перенести картину запрещённых зон в область электромагнитных волн (ЭМВ). То есть вместо электронов запрещённые зоны в таких кристаллах могут существовать для фотонов.

Подробную информацию о фотонных запрещённых зонах можно найти в работах [9, 10].

Простейший из фотонных кристаллов имеет одномерную структуру. Это так называемое брэгговское зеркало, представляющее собой набор чередующихся диэлектрических слоёв с разными показателями преломления. Практически это та же периодическая структура, что и гофрированная гетерограница РОС-лазера, разработанная в ФТИ имени Иоффе, о которой мы говорили в предыдущей главе. У электрона в сверхрешётке есть минизоны и запрещённые зоны. У света в брэгговском зеркале тоже есть полосы пропускания и фотонная запрещённая зона (Stop Band), в которой волна не может уйти вглубь структуры.

Эту идею Алексей Кавокин развил в другой статье, написанной им совместно с Иваном Шелихом и Гийомом Мальпуэшем [13].

Эти физики работали тогда в лаборатории LASMEA Университета Блеза Паскаля (Клермон-Ферран, Франция). Иван Шелих одновременно продолжал работать в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете. Именно в этой статье авторы впервые ввели название «оптические состояния Тамма» (Optical Tamm States – OTS) для нового типа локализованных оптических мод, назвав их так по аналогии с хорошо известными состояниями Тамма для электронов на границах кристаллов. Таким образом, используемый сегодня термин OTS непосредственно относится к работе Игоря Тамма 1932 года.

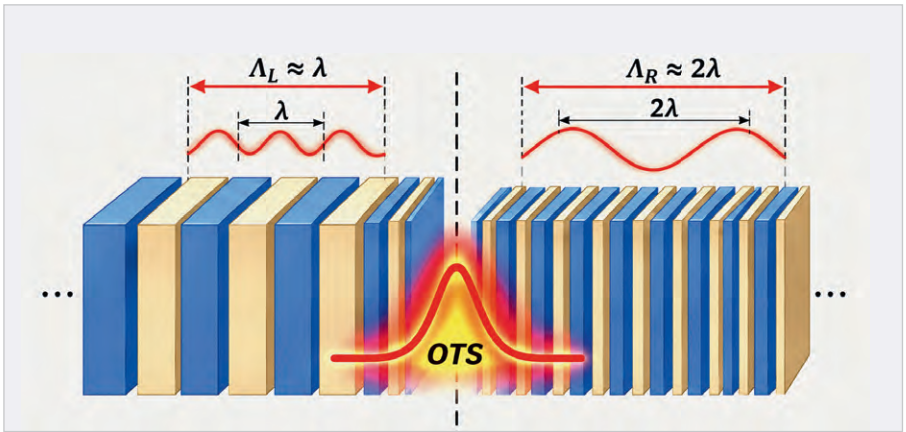


Рис. 5. Оптические состояния Тамма (OTS), локализованные на границе двух периодических диэлектрических структур

Авторы прямо указали, откуда возникла их идея: «Десять лет назад один из нас развил теорию таммовских состояний для электронов, заключённых на границе двух полупроводниковых сверхрешёток. Теперь мы распространили этот метод на описание оптических таммовских состояний». Ход рассуждений остался прежним, изменились только «действующие лица»: вместо электрона используется свет, вместо уравнения Шрёдингера мы решаем уравнения Максвелла, вместо сверхрешёток применяем периодические диэлектрические структуры.

Главный результат статьи описывал явление, при котором на границе двух периодических диэлектрических структур с разными периодами и перекрывающимися запрещёнными зонами возникала локализованная мода света без потерь, поле которой экспоненциально затухало в обе стороны от границы. Авторы назвали такие моды оптическими таммовскими состояниями (Optical Tamm States – OTS) по аналогии с хорошо известными таммовскими состояниями электронов на границах кристаллов. В аннотации статьи использовано и образное выражение «таммовские состояния света» (Tamm States of Light). Термин появился через 73 года после работы Игоря Тамма 1932 года.

Конкретный «рецепт» из статьи выглядит так: у одной структуры период близок к длине волны света λ, у другой – к удвоенной длине волны 2 λ.

Упрощённая схема процесса возникновения оптического состояния Тамма на границе двух фотонных кристаллов приведена на рис. 5. На этом рисунке показаны две периодические диэлектрические структуры с разными периодами (слева больше, справа меньше), образующие между собой общую границу. Синими и розовыми квадратами условно показаны чередующиеся слои двух диэлектрических материалов с различными показателями преломления, образующие одномерные фотонные кристаллы. На границе между структурами возникает локализованная мода, представляющая собой оптическое состояние Тамма (OTS), расположенное в области, где запрещённые зоны обеих структур перекрываются.

Результаты расчётов показали, что такие состояния обладают следующими свойствами:

- поле моды экспоненциально затухает в обе стороны от границы двух структур, а частота моды лежит в запрещённых зонах обеих структур сразу – точно, как энергия электрона в задаче 1995 года;
- мода остаётся локализованной при любом продольном волновом векторе, включая нулевой, и лежит внутри «светового конуса». Поэтому её можно возбудить, просто посветив на структуру без призмы и решётки;
- в отличие от электронного состояния Тамма, оптическое не может возникнуть на свободной поверхности, а только на границе двух фотонных структур;
- решающую роль играет порядок слоёв на границе. Если его поменять, состояние исчезает; по словам авторов, оптическое таммовское состояние чрезвычайно чувствительно к порядку слоёв на стыке;

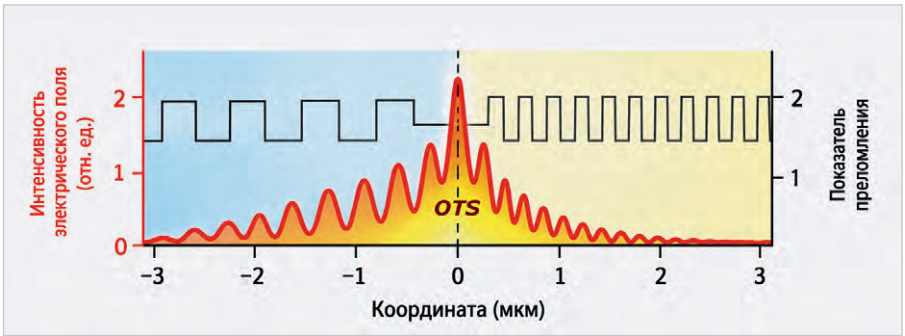


Рис. 6. Схематическое изображение локализации поля и его затухания по обе стороны от границы между диэлектрическими структурами с разными периодами

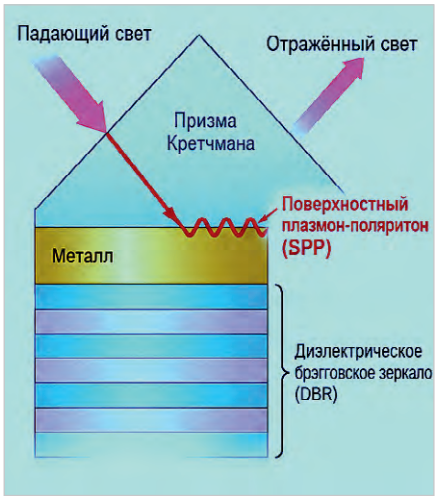


Рис. 7. Возбуждение «обычного» поверхностного плазмон-поляритона SPP

- зависимость энергии от продольного волнового вектора параболическая, как у свободной частицы. Эффективная масса порядка 10^{-5} массы свободного электрона, для TE-поляризации примерно на 5% больше, чем для TM. Расщепление TE и TM растёт квадратично с волновым вектором.

Условие существования OTS авторы выразили через фазы коэффициентов отражения ϕL и ϕR левой и правой периодических структур. В области перекрытия запрещённых зон модули обоих коэффициентов отражения равны единице, а условие существования OTS имеет вид $\tan(\phi R/2)\cdot\tan(\phi L/2) = -na/nb$, где na и nb – показатели преломления чередующихся диэлектрических слоёв. Физически это означает, что для возникновения локализованной моды недостаточно только перекрытия запрещённых зон двух структур: необходимо также определённое согласование фаз волн, отражённых от обеих структур. Именно поэтому OTS чрезвычайно чувствительно к порядку слоёв на границе.

В эксперименте оптическое таммовское состояние должно проявиться как узкий провал внутри широкой полосы почти полного отражения. Авторы рассчитали такой спектр для структуры из 25 пар слоёв слева и 12 пар справа и предложили изготовить её из пористого кремния.

Рис. 6 иллюстрирует процесс локализации поля и его затухание по обе стороны от границы между диэлектрическими структурами с разными периодами.

Красная кривая на рис. 6 отражает интенсивность электрического поля моды, локализованной на границе двух фотонных кристаллов. Поле экспоненциально затухает в обе стороны от границы. Тонкая серая линия характеризует профиль показателя преломления соответствующей структуры.

В том же 2005 году авторы вынесли его в заголовок второй статьи, рассказывающей об успешном использовании оптических таммовских состояний для создания поляритонных лазеров [14].

Плазмон-поляритоны Тамма

В начале февраля 2007 года объединённая российско-британская группа физиков опубликовала статью в журнале «Physica Status Solidi A», в которой была описана идея следующего этапа изучения OTS. Если в рассмотренной выше работе 2005 года оптическое состояние Тамма возникало на границе двух диэлектрических фотонных кристаллов, то теперь авторы рассмотрели вариант границы между металлом и диэлектрическим брэгговским зеркалом (DBR). Именно на этой границе предположительно могло бы существовать локализованное электромагнитное состояние [15].

Физическую картину такой ситуации можно описать следующим образом. Если со стороны диэлектрического брэгговского зеркала (DBR) распространению света будет препятствовать его фотонная запрещённая зона, а со стороны металла электромагнитное поле станет для него преградой на пути распространения в глубину материала, то в результате при определённых параметрах многослойной структуры электромагнитное поле окажется локализованным вблизи границы металл – DBR. В этом смысле вновь возникает хорошо знакомая нам идея Тамма, а именно – «локализованное состояние появляется у границы периодической структуры, где её периодичность обрывается».

При этом новое состояние должно существенно отличаться от обычного поверхностного плазмон-поляритона (Surface Plasmon Polaritons – SPP), о котором мы подробно писали в «Современной электронике» № 7, 2026. Полезно вспомнить, что SPP, распространяющиеся вдоль границы раздела металл-диэлектрик, представляют собой связанное состояние электромагнитного поля и коллективных колебаний электронной плазмы в металле. Они локализованы вблизи поверхности металла и могут концентрировать электромагнитную энергию в субволновых объёмах. Однако эффективное возбуждение плазмон-поляритонов светом представляет серьёзную техническую проблему из-за несоответствия импульсов фотона и плазмона на той же частоте.

Обычный SPP лежит вне светового конуса ($k_{\parallel} > \omega/c$), поэтому его нельзя возбудить прямым падением света. Для согласования импульса требуется дополнительное устройство, например, призма Кретчмана или дифракционная решётка (рис. 7).

Традиционные методы возбуждения, такие как призма Кретчмана и дифракционные решётки, имеют ограниченную эффективность и сложную технологию изготовления.

Авторы особо подчёркивали, что таммовские гибридные моды располагаются внутри светового конуса и, в отличие от обычных поверхностных мод, могут иметь нулевую составляющую волнового вектора вдоль поверхности, $k_{\parallel} = 0$ (рис. 8). Практически это означает, что такое состояние в принципе можно возбуждать светом при

нормальном падении на структуру без призмы Кретчмана или дифракционной решётки, необходимых для согласования импульса при возбуждении обычных SPP.

Есть ещё одно принципиальное отличие. Обычный SPP на плоской границе металл–диэлектрик существует только для TM-поляризации. Рассматриваемые авторами интерфейсные состояния могли существовать как для TM-, так и для TE-поляризации. Их дисперсия в плоскости структуры имела приблизительно параболический характер, причём эффективные массы для TE- и TM-мод несколько различались и составляли величину порядка 10^{-5} массы свободного электрона.

Авторы обратили внимание и на ещё одну важную особенность: для появления такого состояния существенен порядок слоёв в брэгговском зеркале, то есть важно, какой именно диэлектрический слой непосредственно примыкает к металлу. Иными словами, недостаточно просто соединить металлическую плёнку с любым DBR: условия на самой границе металл–фотонный кристалл должны обеспечивать существование локализованной моды.

Как отмечают авторы, сама идея таких электромагнитных состояний ранее уже обсуждалась на международном научном семинаре. В опубликованной в феврале 2007 года работе они перешли к рассмотрению практически реализуемой структуры, а именно границы металла и диэлектрического брэгговского зеркала.

Эта работа стала важным промежуточным шагом от оптических уровней Тамма к таммовским состояниям на границе металл–брэгговское зеркало. В октябре 2007 года эта идея получила развитие в статье международного авторского коллектива: М. Калитеевский, С. Бранд, А. Абрам, Р.Дж.М. Чемберлен (Даремский университет, Великобритания); И. Иорш (ФТИ имени Иоффе, Санкт-Петербург, Россия); А.В. Кавокин (Саутгемптонский университет, Великобритания); И.А. Шелых (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия) [16].

В этой работе, объединившей идеи оптических состояний Тамма и поверхностных плазмон-поляритонов, была теоретически обоснована возможность формирования плазмон-поляритонных состояний на границе между металлом и диэлектрическим зеркалом Брэгга. Важно то, что подобные образования могут иметь нулевой волновой вектор в плоскости и могут возбуждаться прямым оптическим излучением. По аналогии с электронными состояниями на поверхности кристалла, предложенными Таммом, эти возбуждения были названы плазмонами Тамма. Таким образом, данная работа завершала и обобщала теоретическую часть темы, начатой в рассмотренных выше работах [15–17].

В заголовке этой работы впервые появляется ставший впоследствии общепринятым термин «Tamm Plasmon-Polaritons – TPP». В самой статье авторы часто используют более короткое обозначение «Tamm Plasmon – TP». Впоследствии для того, чтобы подчеркнуть гибридную природу этой моды, общепринятым названием этих мод стало «Tamm Plasmon – Polaritons TPP» (таммовские плазмон-поляритоны – ТПП).

Физическая идея TPP объясняется следующим. В области на границе между металлом и DBR электромагнитное поле затухает в металле благодаря отрицательной диэлектрической проницаемости металла, а со стороны DBR распространению света препятствует фотонная запрещённая зона. Таким образом, с двух сторон от границы действуют разные физические механизмы. При этом результат оказывается одинаковым: электромагнитное поле удерживается вблизи интерфейса. По аналогии с электронными поверхностными состояниями Тамма и ранее рассмотренными фотонными состояниями Тамма авторы назвали такое состояние «Tamm Plasmon».

Алгоритм математического описания такой системы рассматривал многослойную структуру, состоящую из металла и брэгговского зеркала с чередующимися диэлектрическими слоями. Для анализа использовался хорошо известный для многослойных оптических структур метод матриц переноса. Однако основной физический смысл расчёта можно понять и без громоздкой математики.

На рис. 9 показана условная схема возникновения таммовского плазмон-поляритона (TPP) на границе металла и диэлектрического брэгговского зеркала (DBR).

Результаты расчётов, проведённых в этой работе, показали, что принципиально важным оказывается порядок

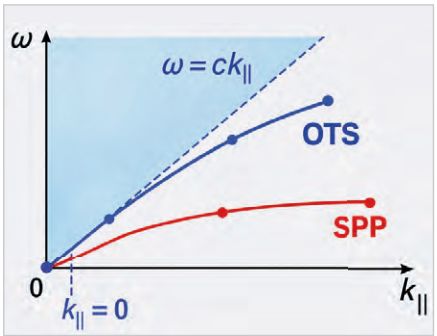


Рис. 8. Дисперсия в плоскости структуры и положение гибридных таммовских мод относительно светового конуса

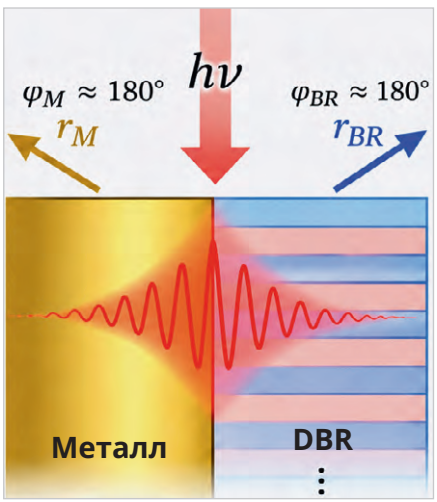


Рис. 9. Условие возникновения таммовского плазмон-поляритона (TPP) на границе металла и диэлектрического брэгговского зеркала (DBR). Красная кривая схематически показывает локализованное электромагнитное поле, максимальное вблизи границы и затухающее в обе стороны

слоёв DBR. В рассмотренной авторами структуре непосредственно к металлу должен примыкать слой с более высоким показателем преломления.

Для конкретного расчёта авторы выбрали золото и четвертьволновое брэгговское зеркало из 14 пар слоёв GaAs/AlAs с брэгговской энергией около 1 эВ. Простая аналитическая оценка дала энергию TP около 0,95 эВ, после чего характеристики структуры были рассчитаны численно методом матриц переноса. Выполненные расчёты показали, что электромагнитное поле сосредоточено около границы металла (Au) и DBR (GaAs/AlAs), уменьшаясь при удалении от неё. Это явилось наглядным подтверждением того, что рассчитанная мода действительно являет-

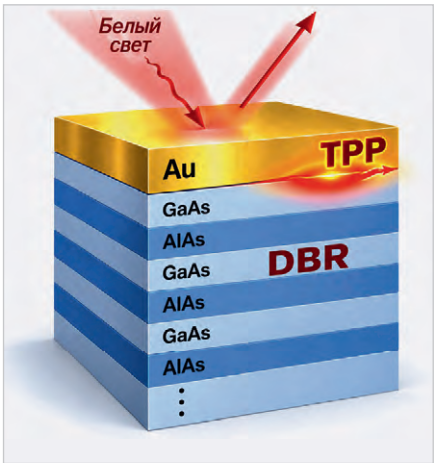


Рис. 10. Схема экспериментальной структуры для наблюдения плазмон-поляритона Тамма. TPP локализован вблизи границы золотой плёнки Au и диэлектрического брэгговского зеркала (DBR) и может возбуждаться непосредственно падающим светом

ся локализованным интерфейсным состоянием. Крайне важным оказалась сильная асимметрия локализации. В золото поле проникает всего примерно на 20 нм, тогда как характерная глубина проникновения в брэгговское зеркало составляет около 1500 нм. Для полубесконечного золота авторы получили энергию TP 0,9572 эВ и добротность около Q = 320, а для 30-нм золотой плёнки – 0,9527 эВ и Q около 200. Увеличение потерь во втором случае связано с дополнительной утечкой излучения через тонкую металлическую плёнку. Вблизи границы распределение электрического и магнитного полей имело характер стоячей волны. Кроме того, авторы рассчитали зависимость энергии TP от волнового вектора K вдоль поверхности отдельно для TE- и TM-поляризаций. Обе дисперсионные кривые, существующие внутри светового конуса и вблизи K = 0, имеют приблизительно параболическую форму. Именно точка K = 0 означала отсутствие составляющей волнового вектора вдоль поверхности, что соответствовало возможности возбуждения при нормальном падении света. У обычного SPP дисперсионная кривая находится за световым конусом, поэтому для его возбуждения потребовались бы рассмотренные в предыдущей статье призмы Отто и Кретчмана или дифракционные решётки. Для плазмонов Тамма такого дополнительного согласования импульса не нужно. Его можно возбуждать непосредственно падающим светом. Более того, обычный SPP на плоской границе металл–диэлектрик существует только для TM-поляризации, тогда как TP существует как для TM-, так и для TE-поляризации. Эти два отличия авторы специально подчёркивают уже в аннотации статьи.

В заключении статьи приведены рекомендации по экспериментальному обнаружению TPP. При совпадении энергии падающего света с собственной энергией TP в спектре отражения должен возникать узкий провал. Для структуры с тонкой золотой плёнкой TP должен проявляться также резонансный пик пропускания.

Таким образом, в этой работе была показана возможность образования локализованного состояния электромагнитного поля на границе металла и диэлектрического брэгговского зеркала, которое было названо «Tamm Plasmon». При правильной последовательности слоёв DBR такое состояние должно появляться вблизи середины первой фотонной запрещённой зоны. В отличие от обычного поверхностного плазмона, оно может существовать как для TE-, так и для TM-поляризации, а его дисперсия должна располагаться внутри светового конуса. Поэтому TP можно непосредственно возбуждать светом без использования призм или дифракционных решёток.

Авторы показали также, что существование TP определяется не просто наличием металла и DBR, но и конкретной конструкцией границы между ними. При изменении толщины первого слоя брэгговского зеркала энергия TP перемещается через фотонную запрещённую зону. Если же DBR начинается с четвертьволнового слоя с меньшим показателем преломления, TP в первой запрещённой зоне для рассмотренной структуры вообще исчезает. Поэтому частотой и самим существованием этой интерфейсной моды можно управлять с помощью геометрии многослойной структуры.

Следующий и фактически решающий шаг был сделан уже через год после теоретической работы Калитеевского и соавторов. В 2008 году М.Е. Сасин, Р.П. Сейсян, М.А. Калитеевский и их коллеги опубликовали в Applied Physics Letters работу, в которой сообщили о первом экспериментальном наблюдении плазмон-поляритонов Тамма (Tamm Plasmon Polaritons – TPP) [17].

Напомним, что теория 2007 года предсказывала возможность непосредственного оптического возбуждения TPP, в том числе при нормальном падении света на структуру.

Именно это предсказание авторы работы 2008 года решили проверить экспериментально. Для этого была изготовлена вполне реальная полупроводниковая структура: диэлектрическое брэгговское зеркало на основе чередующихся слоёв GaAs и AlAs, на поверхность которого наносилась тонкая плёнка золота. Исследовались образцы с толщиной золотой плёнки 30 нм и 50 нм. Таким образом, была непосредственно реализована предложенная годом раньше структура, а искомый TPP должен был существовать вблизи границы между брэгговским зеркалом и золотом (рис. 10).

Физический смысл такого состояния достаточно прост. Со стороны золота свет удерживается благодаря высокой отражательной способности металла, а со стороны многослойного GaAs/AlAs-зеркала – благодаря брэгговскому отражению. При определённой частоте фазы волн, отражённых от металла и брэгговского зеркала, согласуются. Возникает собственная электромагнитная мода, поле которой максимально в области границы металл–брэгговское зеркало и быстро уменьшается при удалении от неё в обе стороны. Это и есть плазмон-поляритон Тамма.

Чтобы обнаружить эту моду, авторы измеряли спектры отражения и пропускания структуры как при комнатной температуре 300K, так и при температуре жидкого азота 77K. После нанесения золота внутри спектральной области высокой отражательной способности брэгговского зеркала появлялась отчётливая резонансная особенность: в спектре отражения – узкий провал, а в спектре пропускания – соответствующий резонансный максимум. Расчётные спектры хорошо совпадали с экспериментальными (рис. 11).

Именно этот резонанс авторы связали с возбуждением TPP. Небольшой сдвиг положения резонанса при охлаждении объяснялся изменением показателей преломления материалов брэгговского зеркала и, следовательно, изменением условия фазового согласования TPP.

Особенно важным было исследование зависимости положения резонан-

са от угла падения света. Изменяя угол, авторы изменяли составляющую волнового вектора света, направленную вдоль поверхности структуры, и тем самым экспериментально восстанавливали дисперсионную зависимость TPP – связь его энергии с волновым вектором вдоль поверхности. Полученная зависимость оказалась параболической, как и предсказывала теория 2007 года.

Из кривизны этой параболы авторы определили эффективную массу плазмон-поляритона Тамма:

$$m\text{TPP} \approx 4 \times 10^{-5} m_0,$$

где m_0 – масса свободного электрона. Разумеется, речь здесь не идёт о массе какой-либо реальной частицы. Эффективная масса характеризует форму дисперсионной кривой и показывает, насколько быстро изменяется энергия электромагнитной моды при изменении её волнового вектора. Очень малая эффективная масса является характерным свойством фотоноподобных квазичастиц.

Особенно наглядным оказался ещё один эксперимент. Перед нанесением золота авторы уменьшали толщину верхнего слоя GaAs брэгговского зеркала приблизительно на 10 нм или 20 нм. Именно этот слой непосредственно граничит с металлом, поэтому изменение его толщины изменяет фазу коэффициента отражения брэгговского зеркала и тем самым условие существования TPP. В результате резонанс TPP смещался в сторону более высоких энергий, а при удалении примерно 20 нм GaAs его положение оказалось вблизи центра запрещённой зоны брэгговского зеркала. Таким образом, эксперимент показал не только существование TPP, но и возможность заранее задавать его резонансную частоту параметрами структуры.

Таким образом, работа Сасина и соавторов 2008 года дала экспериментальное подтверждение основных предсказаний теории 2007 года. Был обнаружен резонанс, связанный с локализованной модой на границе металл–брэгговское зеркало; показана возможность её непосредственного оптического возбуждения; измерена параболическая дисперсия и определена эффективная масса TPP; наконец, продемонстрирована возможность управлять энергией этой моды изменением параметров структуры.

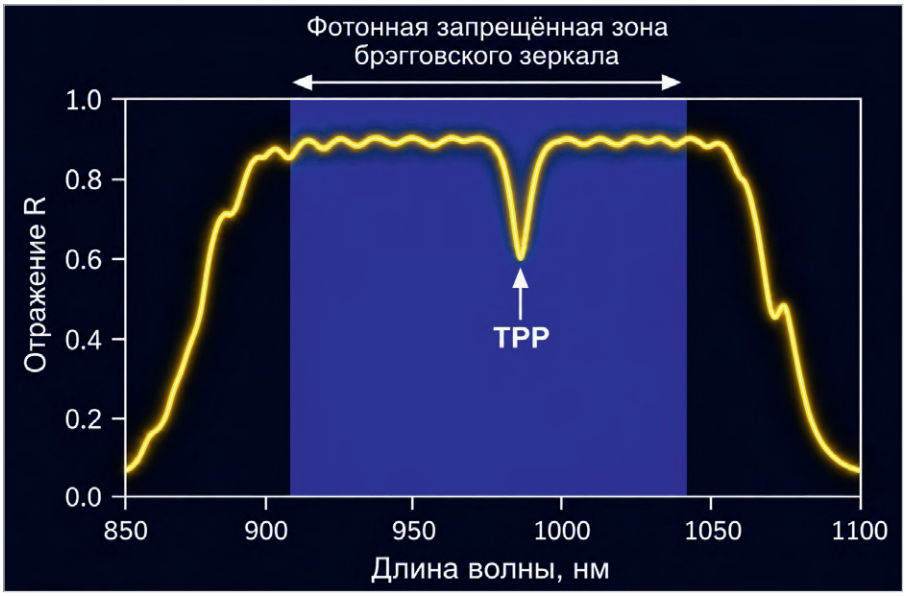


Рис. 11. Принцип обнаружения плазмон-поляритона Тамма по спектру отражения. Внутри фотонной запрещённой зоны брэгговского зеркала резонанс TPP проявляется как узкий провал отражения. Схематическое представление по результатам [17]

Отсюда становится понятным и название статьи: «Slow and Spatially Compact Light», то есть «медленный и пространственно компактный свет». «Компактным» такое состояние является потому, что электромагнитное поле TPP локализовано вблизи границы металл–брэгговское зеркало. Слово «медленный» связано с параболической дисперсией TPP: вблизи минимума этой параболы энергия очень слабо изменяется с волновым вектором, а следовательно, мала и групповая скорость распространения возбуждения вдоль поверхности. Получается необычное сочетание: электромагнитное поле сильно локализовано в пространстве и одновременно сравнительно медленно распространяется вдоль границы металл–брэгговское зеркало.

Именно работа 2008 года завершила переход от теоретической идеи к экспериментально наблюдаемому физическому объекту. Электронные поверхностные состояния, предсказанные И.Е. Таммом в 1932 году, спустя более чем семь десятилетий получили необычного оптического «родственника»: локализованное состояние электромагнитного поля на границе двух различных отражающих сред – плазмон-поляритон Тамма.

Заключение

Заканчивая эту серию статей, хочется ещё раз вернуться к вопросу, с которого мы её начинали: в чём состоит значение научного наследия Игоря Евгеньевича Тамма для современной физики и электроники?

Очевидно, один из возможных ответов на этот вопрос дала сама история, которую мы попытались проследить. Идея, высказанная Таммом в 1932 году, оказалась настолько плодотворной, что её развитие продолжалось более семидесяти лет и привело к появлению целого ряда новых физических понятий и направлений исследований. Чтобы пройти этот путь от электронных поверхностных состояний Тамма до оптических состояний и плазмон-поляритонов Тамма, нам пришлось рассказать о квазичастицах, экситонах и фононах, поляритонах и плазмонах, фотонных кристаллах и фотонных запрещённых зонах, поверхностных плазмон-поляритонах и поверхностном плазмонном резонансе. В таблице показаны этапы развития идеи Игоря Тамма: от «квантов упругости» 1930 года и поверхностных состояний 1932 года через экситоны, фононы, поляритоны, плазмоны, фотонные запрещённые зоны к OTS 2005 года, TPP 2007 года и их экспериментальному наблюдению в 2008 году.

Две линии исследований, таммовские состояния и плазмоника, долгое время развивавшиеся практически независимо, в итоге встретились на одной границе «металл/диэлектрическое брэгговское зеркало». Именно здесь появился плазмон-поляритон Тамма.

Таблица. Основные этапы развития идей Тамма

Год	Понятие / результат	Физический смысл	Основная публикация	Ключевые учёные
1928	Комбинационное рассеяние света (Raman Scattering)	Экспериментально обнаружено изменение частоты света при взаимодействии с колебаниями кристаллической решётки	[18]	Л.И. Мандельштам, Г.С. Ландсберг
1930	«Кванты упругости» – будущие фононы	Квантовое описание упругих колебаний кристаллической решётки	[19]	И.Е. Тамм
1932	Поверхностные состояния Тамма (Surface Tamm States, STS / ПСТ)	Локализованные электронные состояния у поверхности периодического кристалла, где периодичность обрывается	[1]	И.Е. Тамм
1931–1936	Экситон Френкеля	Связанное электронно-дырочное возбуждение в кристалле; заложены основы представления об экситонах. Термин «фонон» также был введён Я.И. Френкелем	[21]	Я.И. Френкель
1950-е	Экситоны в полупроводниках	Экспериментальное обнаружение и исследование экситонных спектров в полупроводниковых кристаллах	[22]	Е.Ф. Гросс
1950	Связанные состояния света и колебаний решётки	Теоретически рассмотрены совместные электромагнитные и механические колебания ионного кристалла – важный шаг к современному представлению о поляритонах	[23]	К.Б. Толпыго
1957–1958	Экситон-поляритоны	Развитие теории смешанных состояний света и экситонного возбуждения в кристалле	[24]	С.И. Пекар
1987	Фотонная запрещённая зона (Photonic Band Gap – PBG)	Диапазон частот, в котором распространение света в периодической диэлектрической структуре запрещено	[9, 10]	Э. Яблонович, С. Джон
1990	Экспериментальное наблюдение состояний Тамма в сверхрешётке	В специально сконструированной GaAs/AlGaAs-сверхрешётке наблюдалось электронное состояние, локализованное у «внутренней поверхности»	[11]	Х. Оно и коллеги
1995	Таммовские состояния на границе двух полупроводниковых сверхрешёток	Показано существование электронных состояний, локализованных на стыке двух периодических структур; непосредственная отправная точка для последующей идеи OTS	[12]	М.Р. Владимирова, А.В. Кавокин
2005	Оптические состояния Тамма (Optical Tamm States, OTS)	Световой аналог электронного состояния Тамма: локализованная оптическая мода на границе двух периодических диэлектрических структур	[13]	А.В. Кавокин, И.А. Шелых, Ж. Мальпюэш
2005	OTS для поляритонных лазеров	Предложено использовать оптические состояния Тамма при создании поляритонных лазеров	[14]	А.В. Кавокин, И.А. Шелых, Ж. Мальпюэш
2007	Интерфейсные фотонные состояния металл | DBR	Показана возможность локализованного электромагнитного состояния на границе металла и диэлектрического брэгговского зеркала; промежуточный шаг от OTS к TPP	[15]	И.А. Шелых, М.А. Калитеевский, А.В. Кавокин и коллеги
2007	Плазмон-поляритон Тамма (Tamm plasmon-polariton, TPP)	Локализованная электромагнитная мода на границе металл | DBR; может существовать при $k_{\parallel} = 0$ и возбуждаться при нормальном падении света	[16]	М.А. Калитеевский, И. Иорш, А.В. Кавокин, И.А. Шелых и коллеги
2008	Первое экспериментальное наблюдение TPP	Экспериментально обнаружен TPP в структуре GaAs/AlAs DBR | Au; измерена параболическая дисперсия и малая эффективная масса	[17]	М.Е. Сасин, Р.П. Сейсян, М.А. Калитеевский, А.Ю. Егоров, А.П. Васильев, В.С. Михрин, А.В. Кавокин и коллеги
2008	Экспериментальное оптическое состояние Тамма	Экспериментально исследована локализованная оптическая мода в одномерной магнитофотонной структуре	[20]	А.В. Дорофеенко, А.М. Мерзликин и коллеги

При этом необходимо особо подчеркнуть крайне важную особенность этой истории. На многих её этапах ведущие роли играли российские и советские физики. Л.И. Мандельштам и Г.С. Ландсберг исследовали взаимодействие света с колебаниями кристаллической решётки; И.Е. Тамм ввёл представление о квантах упругости и предсказал существование электронных поверхностных состояний; Я.И. Френкель заложил основы теории экситонов и ввёл термин «фонон»; К.Б. Толпыго одним из первых теоретически описал связанные состояния электромагнитного поля и колебаний ионной решётки; С.И. Пекар развивал теорию экситон-поляритонов, а Е.Ф. Гросс получил важные экспериментальные подтверждения существования экситонов.

Приведённые примеры безусловно не умаляют роли и других российских учёных, не отмеченных в нашем обзоре. Тем не менее можно с уверенностью говорить о существовании сильной научной школы физики твёрдого тела, сложившейся в нашей стране в 1950–1970-х годах.

В 2000-х годах эта традиция получила продолжение в лице А.В. Кавокина, М.А. Калитеевского, И. Иорша, И.А. Шелых и их коллег, теоретически описавших плазмон-поляритон Тамма, а затем М.Е. Сасина, Р.П. Сейсяна и их коллег, экспериментально подтвердивших существование этого состояния.

Безусловно нужно отметить, что эти работы выполнялись в широкой международной кооперации, и вклад зарубежных коллег был существенным. Именно поэтому правильнее говорить не о национальном приоритете всей работы, а о заметной роли российской физической школы в этой международной цепочке исследований.

Таким образом, история поверхностных состояний Тамма представляет собой редкий пример того, насколько долгой может оказаться жизнь фундаментальной научной идеи. Между теоретической работой Тамма 1932 года и экспериментальным наблюдением плазмон-поляритона Тамма в 2008 году прошло 76 лет. За это время изменились экспериментальная техника, материалы, методы расчёта и даже язык, которым физики описывают подобные явления. Но сама идея сохранилась: *«…у границы, на которой нарушается периодичность системы, могут возникать особые локализованные состояния»*. Именно эта простая и чрезвычайно плодотворная идея связала работы нескольких поколений физиков и спустя десятилетия получила новое воплощение в современной фотонике и плазмонике.

Литература

1. *Tamm I.E.* On the possible bound states of electrons on a crystal surface. Zeitschrift für Physik der Sowjetunion, 1932, 1, 733. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p216/.
2. *Shockley W.* On the Surface States Associated with a Periodic Potential. Phys. Rev. 56, 317. Published 15 August, 1939. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRev.56.317.
3. *Brattain W.H., Bardeen J.* Surface Properties of Germanium. Bell Syst. Tech. J. 32, 1. 1953. URL: https://www.worldradiohistory.com/Archive-Bell-System-Technical-Journal/50s/Bell-1953-Jan.o.pdf.
4. *Allen F.G., Gobeli G.W.* Work Function, Photoelectric Threshold, and Surface States of Atomically Clean Silicon. 1962, Phys. Rev. 127, 150. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRev.127.150.
5. *Malkova N., Hromada I.* et al. Transition between Tamm-like and Shockley-like surface states in optically induced photonic superlattices. Phys. Rev. A 80, 043806 – Published 8 October, 2009. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevA.80.043806.
6. *Kevan S.D.* Evidence for a New Broadening Mechanism in Angle-Resolved Photoemission from Cu(111). Phys. Rev. Lett. 50, 526 (1983). DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.50.526.
7. *Swanson L.W., Crouser L.C.* Anomalous Total Energy Distribution for a Tungsten Field Emitter. Phys. Rev. Lett., 1966, v16, num 10, p. 389–392. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.16.389.
8. *Feuerbacher B., Willis R.F.* Photoionization Line Shape of the Surface State on W(100). Phys. Rev. Lett., 1976, 37, 7, 446–450. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.37.446.
9. *Yablonovitch E.* Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics // Physical Review Letters. 1987. Vol. 58, No. 20. P. 2059–2062. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059.
10. *John S.* Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices // PRL. 1987. Vol. 58. P. 2486. URL: https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.58.2486.
11. *Ohno H., Mendez E.E., Brum J.A., Hong J.M., Agullo-Rueda F., Chang L.L., Esaki L.* Observation of Tamm States in Superlattices. Physical Review Letters, Vol. 64, No. 21, pp. 2555–2558, 21 May 1990. URL: https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.64.2555.
12. *Владимирова М.Р., Кавокин А.В.* // Физика твёрдого тела. 1995. Т. 37, вып. 7. С. 2163 Phys. Solid State. 1995. Vol. 37, No. 7. URL: https://journals.ioffe.ru/articles/17042.
13. *Kavokin A.V., Shelykh I.A., Malpuech G.* Lossless interface modes at the boundary between two periodic dielectric structures // Physical Review B. 2005. Vol. 72. P. 233102. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.233102.
14. *Kavokin A., Shelykh I., Malpuech G.* Optical Tamm states for the fabrication of polariton lasers // Applied Physics Letters. 2005. Vol. 87. P. 261105. DOI: 10.1063/1.2136414.
15. *Shelykh I.A., Kavokin A.V., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Malpuech G.* Interface photonic states at the boundary between a metal and a dielectric Bragg mirror // Physica Status Solidi A. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim). V. 204, Issue 2, Pages 522–525. Published 01 February 2007. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pssa.200673231.
16. *Kaliteevski M., Iorsh I., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Kavokin A.V., Shelykh I.A.* Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror. Physical Review B 76, 165415, 2007. Received 4 February 2007; published 15 October 2007. URL: https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.76.165415.
17. *Sasin M.E., Seisyan R.P., Kaliteevski M.A., Brand S., Abram R.A., Chamberlain J.M., Egorov A.Yu, Vasilyev A.P., Mikhrin V.S., Kavokin A.V.* Tamm plasmon polaritons: Slow and spatially compact light // Applied Physics Letters, 2008, Vol. 92, 251112. DOI: 10.1063/1.2952486.
18. *Landsberg G., Mandelstam L.* Eine neue Erscheinung bei der Lichtzerstreuung in Krystallen. Naturwissenschaften. 1928. Vol. 16. P. 557–558. DOI: https://doi.org/10.1007/BF01506807.
19. *Тамм И.Е.* О квантовой теории рассеяния света в твёрдых телах. 1930. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/.
20. *Goto T., Dorofeenko A.V., Merzlikin A.M.* et al. Optical Tamm States in One-Dimensional Magnetophotonic Structures. Physical Review Letters. 2008. Vol. 101. P. 113902. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.113902.
21. *Frenkel J.* On the Transformation of Light into Heat in Solids. I. Physical Review. 1931. Vol. 37. P. 17–44. DOI: https://doi.org/10.1103/PhysRev.37.17.
22. *Gross E.F., Karryjew I.A.* The optical spectrum of the exciton. Doklady Akademii Nauk SSSR. 1952. Vol. 84. P. 471–474.
23. *Tolpygo K.B.* Physical properties of a rock salt lattice made up of deformable ions. Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki. 1950. Vol. 20, No. 6. P. 497–509.
24. *Pekar S.I.* Theory of electromagnetic waves in a crystal with excitons. Journal of Physics and Chemistry of Solids. 1958. Vol. 5, No. 1–2. P. 11–22. DOI: https://doi.org/10.1016/0022-3697(58)90127-6.

Сергей Яковлевич Соколов и его наследие в электронной дефектоскопии, гидролокации и акустике

Андрей Кашкаров

Среди учёных, внёсших значительный вклад в прикладную науку и развитие отечественной электроники, особое место занимает Сергей Яковлевич Соколов. Его по праву называют «отцом» электронного метода неразрушающего контроля и создателем устройств для обнаружения объектов на основе отражённой акустической волны. Оба направления, заложенные Соколовым, получили дальнейшее развитие и сегодня применяются в различных областях – как в гражданской, так и в военной сферах. Разработанные им идеи сохраняют актуальность и находят применение в современных технологиях.

Вехи биографии

Сергей Яковлевич Соколов родился 26 сентября 1897 года в селе Кряжим Саратовской губернии в крестьянской многодетной семье. Сначала будущий учёный поступил в церковноприходскую школу, а затем в двухклассное сельское училище в селе Вязовка и в 1914 году – в среднетехническое училище в Саратове. По окончании среднетехнического училища (сегодня СКРП – Саратовский колледж радиоэлектроники приборов имени П.Н. Яблочкова) в 1919 году Сергей Соколов был призван в армию и служил техническим специалистом связи. После демобилизации поступил в Ленинградский электротехнический институт имени В.И. Ульянова (Ленина) – сегодня ЛЭТИ – и закончил его в 1925 году (рис. 1).



Рис. 1. Сергей Яковлевич Соколов, фотопортрет

Первые три курса Соколов учился на электротехническом факультете, а затем, увлёкшись лекциями своего наставника И.Г. Фреймана по радиотехнике, перешёл на электрофизический факультет.

Именно Фрейман оказал значительное влияние на научное становление Соколова, привлекая его к исследованиям и разработке электронного устройства на основе «сверхтональной акустической волны». После этого С.Я. Соколов продолжил работу в ЛЭТИ в качестве ассистента кафедры специальной радиотехники.

В 1927 году появились первые значимые результаты самостоятельных исследований Соколова, выполненных с использованием кварцевых вибраторов. В этом направлении Соколов развивал идеи французского физика Поля Ланжевена, связанные с преобразованием электрической энергии в ультразвуковые колебания [3]. Исследования показали способность ультразвука проходить через металлы без заметного поглощения. Эти результаты создали предпосылки для разработки электронных дефектоскопов, позволяющих осуществлять неразрушающий контроль материалов и конструкций, которые широко применяются и сегодня.



Рис. 2. С.Я. Соколов с учениками на занятиях в лаборатории акустики ЛЭТИ, 1936 год

Успехи в развитии электронной дефектоскопии

С.Я. Соколов исследовал зависимость поглощения ультразвука от структуры металла, а также особенности распространения ультразвуковых сигналов по проводам. Он установил, что ультразвуковые волны отражаются от неоднородностей внутри изделий. Учёный разработал электронное устройство для исследования металлов с помощью ультразвука, что положило начало новому методу неразрушающего контроля качества изделий – ультразвуковой дефектоскопии (ультразвукоскопии).

Первый промышленный образец ультразвукового дефектоскопа для

обнаружения дефектов в изделиях и заготовках также был создан и запатентован Соколовым [4, 5].

В 1931 году в ЛЭТИ была создана кафедра технической акустики, которую возглавил С.Я. Соколов. В 1932 году с авторством учёного вышел учебник «Основы электроакустики», основные положения которого актуальны и сегодня. Это первая книга по электроакустике в нашей стране (рис. 2). К этому же времени относят зарождение советской научно-инженерной школы неразрушающего контроля и смежных направлений, связанных с акустическими методами контроля.

В 1929–1930 годах С.Я. Соколов стал консультантом Научно-испытательного полигона связи Военно-морских сил, где проводил испытания кварцевых вибраторов на подводных лодках. Это направление деятельности учёного сегодня мало известно. Тем не менее удалось обнаружить сведения о его исследованиях в области гидроакустики (рис. 3).

Вода – одно из наиболее распространённых на Земле химических соединений. Гидроакустика – быстро развивающаяся область физики, охватывающая широкий спектр прикладных и научных исследований. Она изучает излучение, приём и распространение звуковых волн в водной среде, а также взаимодействие механических волн, составляющих звуковое поле, с водой, содержащимися в ней объектами и границами раздела неоднородных сред. На рис. 4 показан принцип определения направления на источник звука.

На рис. 5 показана зависимость скорости распространения акустической волны в водной среде. Звук связан с механическими колебаниями, создаваемыми физическим объектом или электронным устройством, и распространяется в окружающей среде на определённое расстояние. Вода, в отличие от воздуха, обладает способностью проводить звуковые колебания на большие расстояния, что обусловливает перспективность использования акустических сигналов под водой.

На распространение звуков влияет множество факторов: частота и амплитуда звуковой волны, температура, солёность и глубина воды, расстояние распространения звука и связанная с этим постепенная трансформация звука в тепло – абсорбция, а также другие местные особенности: неоднородности в воде, участки с турбулентностью, состояние поверхности воды – пузырьки воздуха, дождь и ветер; тип дна – ил, песок, гравий или скала.

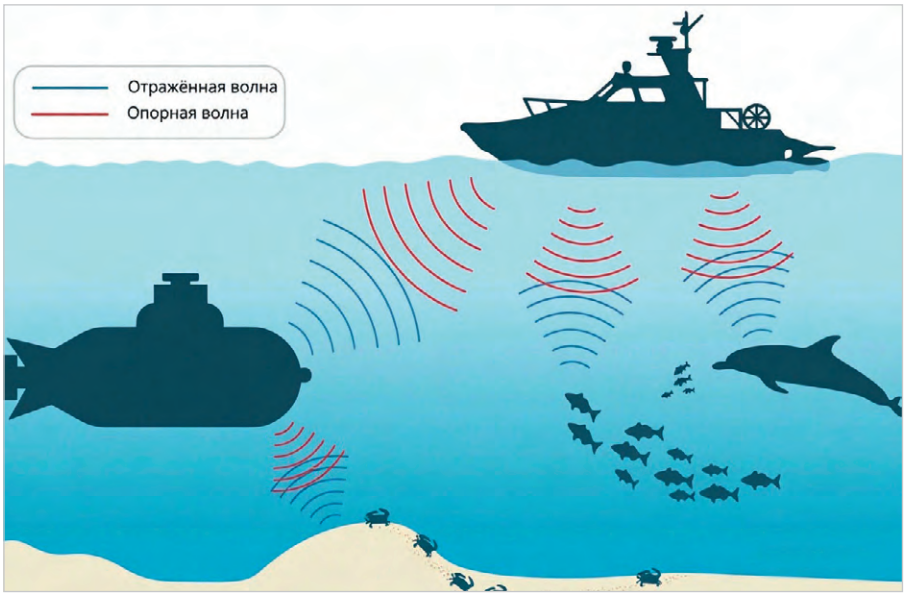


Рис. 3. Способ акустического обнаружения подводных препятствий, предложенный С.Я. Соколовым

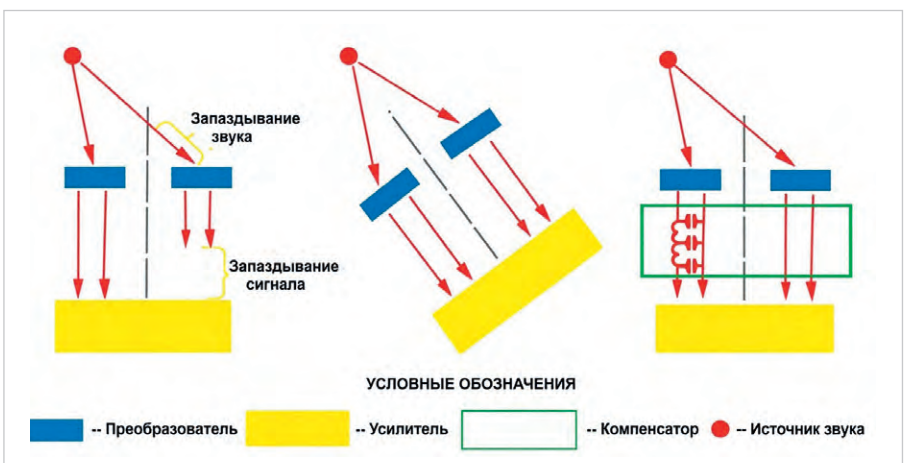


Рис. 4. Принцип определения направления на источник звука

Звуковая волна, распространяющаяся под водой, состоит из чередующихся сжатий и разрежений среды. Сжатия и разрежения воспринимаются приёмником, человеческим ухом или гидрофоном, как изменение давления.

Чем выше упругость среды, тем с большей скоростью расходится в ней звук. К примеру, скорость в каучуке составляет примерно 50 метров в секунду, в воздухе – 330, в воде – 1450, а в стали – 5000 метров в секунду. Приблизительные значения скорости распространения звука для пресной и морской воды при нормальном атмосферном давлении составляют 1450 м/с и 1500 м/с соответственно.

Из всех известных видов излучения звук расходится в море с наименьшими потерями. Радиоволны и свет зату-

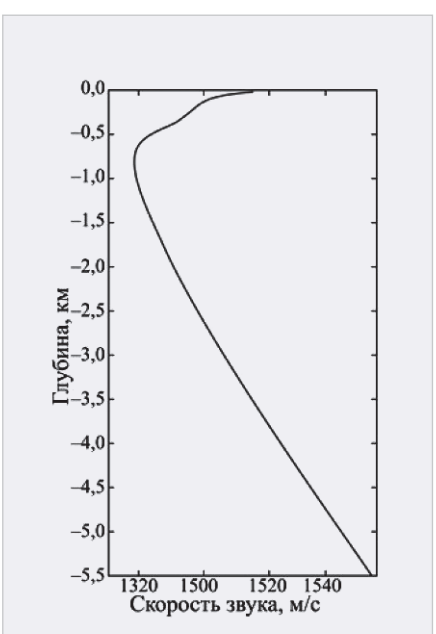


Рис. 5. Зависимость скорости отклика акустической волны в водной среде

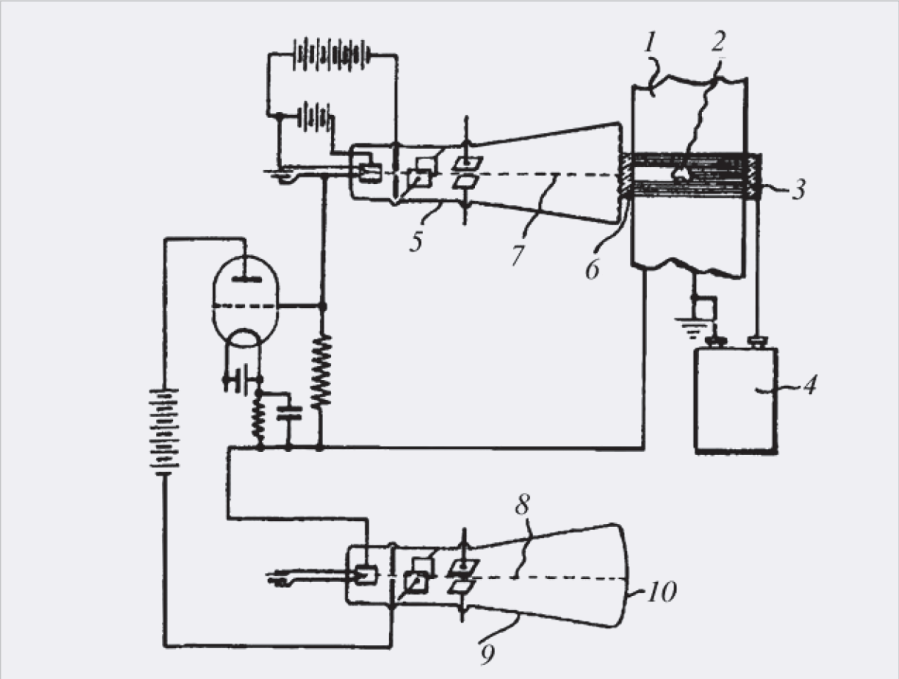


Рис. 6. Структурная схема установки на основе трубки Соколова

хают в мутной и солёной морской воде значительно быстрее. Относительно свободное продвижение звука в водной среде позволило найти гидроакустике разнообразное применение.

Скорость продвижения звуковых волн меняется с глубиной, причём изменения зависят от времени года, профиля и состава дна, глубины водоёма и ряда других причин. Вода неоднородна, поэтому скорость звука в ней увеличивается с повышением давления, температуры и солёности.

Изменение этих трёх параметров влияет на направление движения звукового луча. Рефракция, или искривление траектории распространения звуковой волны, вызывается неоднородностью свойств воды, главным образом по вертикали, вследствие трёх основных причин: изменения гидростатического давления с глубиной, изменения солёности и изменения температуры, обусловленного неодинаковым прогревом водной массы солнечным излучением. Звуковые волны могут отражаться от различных объектов на дне, а также от косяков рыб.

Звуковые волны, выходящие из источника под некоторым углом к горизонту, изгибаются, причём направление изгиба зависит от распределения скоростей звука в среде:

- летом, когда верхние слои теплее нижних, лучи изгибаются книзу и в большинстве отражаются от дна, теряя при этом значительную долю своей энергии;
- зимой, когда нижние слои воды сохраняют свою температуру, между тем как верхние охлаждаются, лучи изгибаются кверху и многократно отражаются от поверхности воды, при этом теряется значительно меньше энергии. Поэтому зимой дальность распространения звука больше, чем летом.

Создание «звуковидения» и ультразвукового микроскопа

Разработка С.Я. Соколова, известная как метод сканирования поверхностного рельефа и контроля параметров с помощью электронно-акустической трубки-преобразователя, основана на преобразовании звуковых сигналов в видимые. Так, с помощью отражённой акустической волны стало возможно создавать визуализацию изображений на расстоянии. В копилке знаний отечественной науки этот способ известен с 1935 года, когда Соколов был признан доктором технических наук. Диссертационное исследование называлось «Ультраакустические колебания и их применение». Структурная схема установки на основе трубки Соколова приведена на рис. 6, где 1 – контролируемое изделие с внутренним дефектом; 2, 3 – излучающий преобразователь, возбуждаемый генератором; 4, 5 – электронно-лучевая трубка, в которой светочувствительный экран заменён на звукочувствительный преобразователь (6), имеющий сеть точечных электродов, изолированных один от другого.

Принцип действия устройства таков. При прозвучивании изделия на приёмной пьезопластине создаётся рельеф электрических зарядов, которые считываются электронным лучом (7), усиливаются и управляют яркостью луча (8) второй электронно-лучевой трубки (9), на светочувствительном экране (10) которой создаётся видимое изображение дефекта в изделии. Этот метод интроскопии показал пороговую чувствительность 10–9 Вт/см² и высокую разрешающую способность.

Дальнейшее совершенствование этого метода привело к созданию ультразвукового микроскопа. Первым устройством звуковидения, предложенным С.Я. Соколовым ещё в 1928 году, стала система, основанная на формировании и регистрации распределения акустического поля на свободной поверхности жидкости – метод поверхностного рельефа. В дальнейшем система была усовершенствована по аналогии с оптическими системами (рис. 7). На рис. 7: 1 – излучатель ультразвука; 2 – объект; 3 – акустическая линза; 4 – поверхность жидкости; 5 – источник света; 6 – конденсорная линза; 7 – объектив; 8 – диафрагма; 9 – экран.

Сергей Яковлевич также занимался проблемой передачи информации, записанной азбукой Морзе, по металлическим проводникам при помощи ультразвука. В результате было установлено, что сигнал затухает при расстояниях в несколько десятков метров, а при наличии дефекта затухание происходит значительно быстрее. Основы ультразвуковой диагностики впоследствии были использованы при создании медицинских аппаратов УЗД–УЗИ.

Награды и признание заслуг

Сергей Яковлевич Соколов дважды удостоен Государственной премии СССР («сталинской»): в 1942 году за изобретение метода ультразвуковой дефектоскопии и в 1951 году за изобретение ультразвукового микроскопа, усовершенствование и промышленное освоение методов ультразвуковой дефектоскопии. Награждён также Орденами Ленина, Трудового Красного знамени и медалями.

В 1953 году учёный избран членом-корреспондентом Академии наук СССР. А осенью 1955 года С.Я. Соколов

представил страну на Первой Международной конференции ICNDT в Бельгии и вскоре был назначен постоянным представителем СССР во «Всемирной ассоциации испытания материалов без разрушения» (ICNDT – The International Committee for Non-Destructive Testing). Первый патент № 11371 на способ и устройство ультразвуковой дефектоскопии с приоритетом от 2 февраля 1928 года.

С авторством С.Я. Соколова опубликованы 32 научные работы и известно 23 патента и авторских свидетельств в области ультразвуковой техники обнаружения дефектов и исследования твёрдых тел. За 75 лет со дня открытия С.Я. Соколовым способ ультразвуковой дефектоскопии стал основным широко применяемым во всех отраслях промышленности, строительства и транспорта методом выявления внутренних потенциально опасных дефектов. Только на железнодорожном транспорте России ежегодно методом ультразвуковой дефектоскопии проверяется более 4 млн км рельсов, 2,5 млн сварных стыков рельсов, 12 млн стрелочных переводов, а также 40 млн осей, колёс и других деталей подвижного состава [14].

В заключительный период жизни и работы Соколов разработал модификацию ультразвукоскопии, основанную на импульсной локации неоднородностей в образце с использованием высоких частот в диапазоне 0,5–15 МГц, а в качестве индикатора использовался электронный осциллограф.

Сергей Яковлевич Соколов скончался в возрасте 59 лет 20 мая 1957 года и был похоронен на Шуваловском кладбище в Санкт-Петербурге.

В 1997 году решением Международного кураториума специалистов из Германии и СССР была учреждена международная премия «В.К. Рентген – С.Я. Соколов» за выдающиеся достижения в разработке передовых средств неразрушающего контроля и подготовке высококвалифицированных специалистов [9].

В ЛЭТИ кафедра электроакустики и ультразвуковой техники, на которой С.Я. Соколов проработал всю жизнь, носит имя учёного.

Соколов при жизни заложил основы акустической голографии, разработал первый кварцевый анализатор звука и исследовал дифракцию света на ультразвуке. Выдвинул идею использования дифракции света в ультразвуковом поле в твёрдых и жидких средах для модуляции светового пучка. Сегодня идеи учёного трансформировались в новые направления научных исследований.

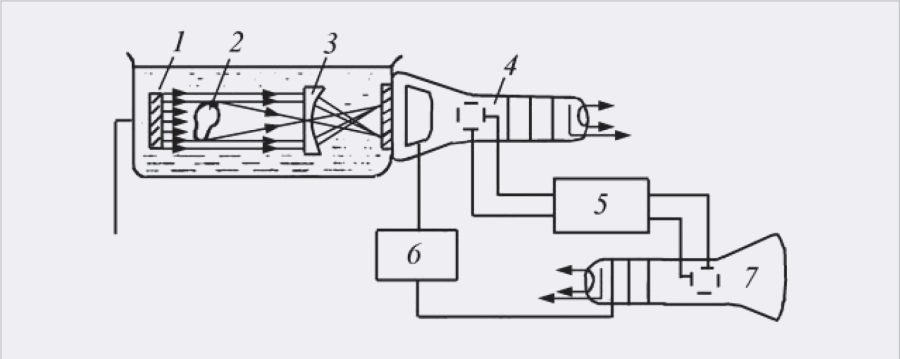


Рис. 7. Схема устройства звуковидения С.Я. Соколова

Значимые для наших современников изобретения Сергея Яковлевича Соколова:

- метод ультразвуковой дефектоскопии. Учёный первым в мире предложил новый способ контроля качества изделий без их разрушения;
- ультразвуковой микроскоп разработки 1935 года;
- электромагнитно-акустический метод возбуждения колебаний в изделии, основанный на взаимодействии вихревых токов с полем постоянного магнита;
- низкочастотный акустический метод измерения частот собственных колебаний турбинных лопаток, предназначенный для обнаружения внутренних дефектов (трещин);
- прибор для контроля за содержанием примесей в высокочистых металлах;
- теоретические основы ультразвуковых слоистых преобразователей с активным слоем, используемых в гидроакустике и дефектоскопии.

Идеи, послужившие Соколову и науке

С.Я. Соколова считают самобытным исследователем, поскольку в новой для того времени области знаний у него не было непосредственных предшественников и учителей. Вместе с тем на формирование его научных взглядов оказали влияние работы радиофизиков П. Ланжевена, М. фон Лауэ, И.Г. Фреймана, Л.И. Мандельштама и других учёных. Заслуга Соколова заключается также в последовательном сочетании изобретательской деятельности с физическими экспериментами – подходе, близком к научным приёмам А.С. Попова. Такое сочетание теоретических исследований, экспериментов и практической разработки позволяет рассматривать С.Я. Соколова одновременно как физика-электронщика и инженера-изобретателя.

История гидроакустики насчитывает более двух тысячелетий. Древнегреческий философ Аристотель (384–322 гг. до н. э.) одним из первых отметил, что звук можно слышать в воде. Считается, что подводная акустика как научное направление зародилась в 1490 году, когда Леонардо да Винчи описал возможность обнаружения звуков под водой с помощью длинной трубки: если остановить корабль, опустить трубку в воду и приложить её другой конец к уху, можно услышать шум кораблей, находящихся на значительном расстоянии. При этом речь шла о парусных, а не моторных судах.

Идея известного итальянца нашла практическое применение лишь в конце XIX века. Для безопасности кораблевождения в туманную погоду начали применять подводную звуковую сигнализацию. Плавучие маяки стали оборудовать подводными колоколами, а на морских судах устанавливать простейшие гидроакустические приёмники на оба борта, чтобы слышать и определять направление на навигационную опасность. Звук подводного колокола был слышен на значительно большем расстоянии, чем звук колокола, установленного на берегу.

Начало развитию гидроакустических средств обнаружения положено на рубеже XIX–XX веков. В России в 1891 году адмирал С.О. Макаров предложил гидроакустическую телеметрическую систему для океанографических исследований. В 1905 году в Санкт-Петербурге Роберт Ниренберг начал проводить исследования



Рис. 8. Пример дефектного изделия, выявленного электронным способом, основанным на идеях Соколова



Рис. 9. Один из первых портативных дефектоскопов отечественного производства УЗД20

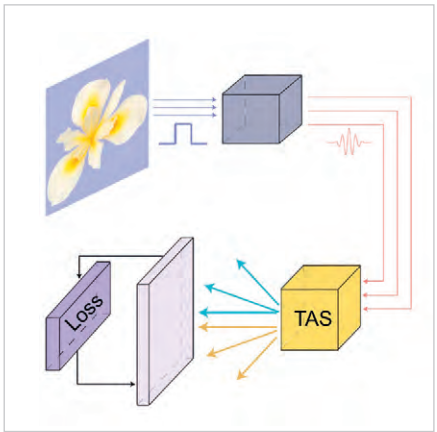


Рис. 10. Структурная схема усовершенствованного способа видеоконтроля объектов будущего с помощью звуковидения, у истоков которого стоял изобретатель С.Я. Соколов

по звукоподводной телеграфии, а в 1907 году был получен патент «Передающая станция для беспроводного (гидрофонического) телеграфирования через воду». Затем первые серийные станции звукоподводной связи конструкции Балтийского завода в 1909–1910 годах установили на подводных лодках «Карп», «Пескарь», «Стерлядь», «Макрель» и «Окунь».

Интерес к разработке систем эхолокации усилился после того, как в 1912 году в результате столкновения с айсбергом затонул океанский лайнер «Титаник». В том же году Томас Грин Фессенден разработал электромагнитный источник звука, который позволил осуществить связь между судами путём подводной сигнализации с помощью азбуки Морзе.

Французский физик Поль Ланжевен в 1915 году предложил использовать чувствительный приёмник из сегнетовой соли для первой шумопеленгаторной станции. В том же году канадцем Фессенденом был запатентован первый прототип гидролокатора. Во Франции русский инженер-электротехник Константин Шиловский совместно с Ланжевеном работал над прибором, включавшим в себя конденсаторный (электростатический) прожектор и угольный микрофон, размещённый в фокусе вогнутого акустического зеркала. В 1916 году эти учёные подали заявку на патент «Описание аппаратов и способов их применения для локализации подводных препятствий».

Первые гидрофоны применяли в борьбе именно с кайзеровскими подводниками. Название «АСДИК» (ASDIC – AntiSubmarine Detection Investigation Committee – Комитет по исследованиям для обнаружения подводных лодок) для системы подводного обнаружения придумали в Британии в 1916 году.

Первый действующий глубоководный эхолот изобрёл именно Хейес. Благодаря этому появилась возможность составить квазинепрерывный профиль дна океана вдоль курса движения корабля. Первый такой профиль был составлен американцем на борту эсминца ВМС США «Стюарт» с 22 по 29 июня 1922 года. Хейес и его группа разработали буксируемую антенну из гидрофонов под названием «Угорь». Однако прибор мог указать лишь на присутствие лодки и примерное направление на неё, но не дистанцию. Тем не менее несколько пеленгов, пересекаясь, давали и примерное местоположение.

Интересно, что ещё в 1822 году швейцарский физик и инженер Жан-Даниэль Колладон и математик Шарль-Франсуа Штурм использовали «подводный звонок» для измерения скорости звука в водах Женевского озера в Швейцарии. Одновременно с подрывом порохового заряда под водой приводился в действие колокол.

Световая вспышка от воспламенения наблюдалась в 10 милях и сравнивалась на том же расстоянии с восприятием звука от колокола под водой. Звук воспринимался через специальное устройство, состоящее из трубки, опущенной в воду. В этом эксперименте много лет назад даже с помощью простейшего инструментария удалось определить, что скорость распространения звука под водой составляет 1435 м/с, что кардинально не отличается от того, что доказано в наше время более современными инструментами.

Примерно через 80 лет в 1906 году физик Московского университета П.Н. Лебедев зафиксировал при помощи искрового разряда в воздухе ультразвуковые колебания, а в 1911 году Н.П. Неклепаев в лаборатории Лебедева впервые произвёл измерения поглощения ультразвука в воздухе. Этими экспериментами было доказано, что сильное затухание ультразвука препятствует его распространению в воздухе.

На принципе свистка Гальтона исследователь Эйдельман разработал метод, обеспечивающий значительно бóльшую мощность ультразвука. В первых экспериментах получили частоту колебаний порядка 30 кГц. В дальнейшем конструкция свистка Гальтона изменялась, и в настоящее время он с успехом применяется в лабораториях, обеспечивая значительную мощность. При частоте колебаний порядка 100 кГц излучаемая мощность ультразвука достигает 50 Вт. А позже Соколов доказал, что ультразвук может проникать сквозь металлы практически без потерь.

Принципы современной дефектоскопии электронными методами

Рассмотрим практический пример дефектоскопии в цехе сталелитейного производства. Металлический пруток перемещается по рольгангу и поступает к электронному сканирующему модулю, где три равноудалённых друг от друга ультразвуковых преобразователя

вращаются вокруг изделия. Пруток перемещается поступательно, поэтому каждый преобразователь формирует спиральную траекторию сканирования по его поверхности, выявляя дефекты как в центральной, так и в периферийной части сечения.

Ультразвуковой преобразователь возбуждает акустическую волну, которая распространяется вглубь прутка. При наличии дефекта – трещины, поры или неметаллического включения – ультразвуковая волна отражается от него, а отражённый сигнал принимается и регистрируется радиоэлектронной аппаратурой (РЭА). Пример дефектного изделия, выявленного электронным методом, основанным на идеях Соколова, представлен на рис. 8.

На рис. 9 показан один из первых портативных дефектоскопов отечественного производства УЗД20.

Звуковые волны будущего и эффект топологического акустического синапса

Это апробированный научный подход, основанный на изучении и попытках имитации нейроморфных принципов работы головного мозга человека. Известно, что мозг способен с высокой скоростью обрабатывать огромные объёмы информации при относительно низком энергопотреблении. В обозримом будущем системы обучения ИИ могут потребовать значительных энергетических ресурсов, что ставит перед современными разработчиками радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) задачу поиска энергоэффективных решений.

Одно из преимуществ новых технологий в сравнении с традиционными способами передачи данных в чипах с ИИ в том, что память и модуль обработки данных размещены в одном чипе. Этим достигается экономия энергии, затрачиваемой на его работу.

На рис. 10 показана схема усовершенствованного способа видеоконтроля объектов с помощью «звуковидения», у истоков которого стоял изобретатель С.Я. Соколов. Звуковые волны вместо контактного электрического способа передачи данных позволяет электронным устройствам будущего взаимодействовать с большим аппаратным ускорением и эффективностью.

В отличие от традиционной проводной передачи электронов в кремниевых чипах, новая технология предусматривает генерацию и беспроводную передачу акустических волн по миниатюрным соединённым между собой каналам. Передача и приём кодированной информации осуществляются за счёт изменения интенсивности маломощной управляемой звуковой волны посредством её усиления или ослабления.

Итоги и перспективы

Ультразвуковые чипы рассматриваются как одно из перспективных направлений развития электроники. Современные исследования показывают, что акустический синапс способен одновременно обрабатывать несколько потоков данных [1]. В основе этого подхода лежит эффект топологического акустического синапса (ТАС). Такие устройства способны передавать энергию и оцифрованные пакетные данные с использованием прямых и отражённых акустических волн в многомерных пространствах и состояниях.

Разрабатываются электронные устройства со сверхнизким энергопотреблением на основе двух основных типов компонентов: полевых транзисторов (FET) и мемристоров. Современные разработчики радиоэлектронной аппаратуры, опираясь на идеи С.Я. Соколова, а также используя новые материалы и технологии, стремятся увеличить скорость передачи и масштабировать потоки данных за счёт одновременной работы нескольких синапсов. Для реализации и усиления эффекта ТАС используется нелинейная динамика акустических волн в связанных волноводах. Одним из направлений развития этой технологии является интеграция множества компонентов в миниатюрные чиповые структуры.

Литература

1. *Арнольд П.* Звуковые волны могут стать источником питания для нового типа чипов, созданных по образцу человеческого мозга. URL: https://techxplore.com/news/2026-06-power-kind-chip-human-brain.html.
2. *Иофе В.К., Мясникова Е.Н., Соколова Е.С.* Сергей Яковлевич Соколов // СПбГЭТУ. СПб., 1997. 176 с.
3. *Паврос С.К.* Сергей Яковлевич Соколов – основоположник ультразвуковой дефектоскопии и звуковидения // Известия ГЭТУ. 1997. Вып. 505. С. 5–11.
4. Патент № 11371 СССР. Способ и устройства для испытания металлов / С.Я. Соколов; опубл. 30.09.1929 // Вестник Комитета по делам изобретений. 1929. № 6.
5. Патент № 2164125 США. Средства для обнаружения дефектов в материале / С.Я. Соколов. Опубл. 08.06.1937.
6. *Пигулевский Е.Д.* О чувствительности и разрешающей способности акустооптического преобразователя на поверхности жидкости // Акустический журнал, 1958. Т. 4. № 4. С. 348–354.
7. *Пономарев П.В.* Опытная установка для видения ультразвукового поля // Известия ЛЭТИ. 1958. Вып. 34. С. 224–228.
8. *Прохоров В.Г.* Электронно-акустический преобразователь // Акустический журнал. 1957. Т. 3. № 3. С. 248–254.
9. Сергей Яковлевич Соколов. URL: https://www.prlib.ru/Great_Russia/outstanding_scientists_XX/Sokolov.
10. *Соколов С.Я.* Избранные труды. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 1997. 263 с.
11. Соколов Сергей Яковлевич в 1928 году запатентовал и создал в 1935 году ультразвуковой дефектоскоп. URL: https://retrabbit.ru/publ/26-1-0-227.
12. *Соколов С.Я.* Ультраакустические колебания и их применение // Заводская лаборатория. 1935. № 5. С. 527–538.
13. *Соколов С.Я.* Ультраакустические методы изучения свойств закалённой стали и определения внутренних пороков металлических изделий // ЖТФ. 1941. Т. XI. Вып. 1. С. 160–169.
14. *Соколов С.Я.* Ультразвуковой микроскоп // ДАН СССР. 1949. Т. LXIV. № 3. С. 333–335.
15. *Храмов Ю.А.* Соколов Сергей Яковлевич // Физики: Биографический справочник / под ред. А.И. Ахиезера. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Наука, 1983.
16. *Уэйд Г.* Системы акустического изображения. Л.: Судостроение, 1981.
17. *Sokoloff S.* Zur Frage der Fortpflanzung ultra-acustisher Schwingungen in verschiedench Rorpern // Eleck. Nachr. Techn. 1929. Bd. 6. H. 11. S. 450–460 (к вопросу ультраакустических колебаний в различных телах).

Проверяемое автономное управление: архитектура контроля решений ИИ в киберфизических и распределённых системах

Игорь Рыбаков

В статье рассматривается архитектура SEACS (Self-Evolving Autonomous Control System), предназначенная для построения проверяемого контура автономного управления в распределённых и киберфизических системах. В отличие от подходов, где успешный вызов модели или выполнение команды трактуется как завершение задачи, SEACS разделяет наблюдение, оценку состояния, выбор решения, исполнение и последующую проверку фактического результата. Рассматриваются механизмы управления риском и доверием, гистерезиса, задержки повторных воздействий, резервных сценариев и передачи решения человеку. Отдельное внимание уделено воспроизводимым испытаниям, требованиям к данным и метрикам, а также ограничениям исследовательского прототипа.

Введение

Развитие автономных систем расширяет круг решений, которые программное обеспечение принимает без непосредственного участия оператора. Это относится к распределённым вычислительным системам, промышленной автоматизации, робототехнике, энергетике, транспортным комплексам и интеллектуальной инфраструктуре.

В классической системе автоматического управления алгоритм, как правило, работает в заранее заданном пространстве состояний и управляющих воздействий. При включении моделей машинного обучения и генеративных моделей ситуация усложняется: система способна учитывать неполный контекст, формировать ранее не предусмотренные варианты действий и обрабатывать неоднозначные входные данные.

Поэтому инженерная задача состоит не только в повышении качества самой модели, но и в создании внешнего проверяемого контура, который определяет, допустимо ли действие, на каких данных оно основано и достигнут ли ожидаемый эффект после исполнения. В SEACS решение рассматривается не как конечный результат вычисления, а как гипотеза об управляющем воздействии, которая должна пройти последовательные проверки.

Архитектура замкнутого контура

Базовый цикл SEACS состоит из пяти стадий: наблюдение, оценка, выбор решения, исполнение и проверка. В англоязычной записи это соответствует последовательности Observe → Evaluate → Decide → Act → Verify.

На этапе наблюдения фиксируется текущее состояние объекта и среды. На этапе оценки определяется качество входных данных, уровень риска и допустимость автоматической реакции. Затем формируется кандидатное действие, которое проходит правила допуска. После исполнения система не считает задачу завершённой: она повторно наблюдает объект и сравнивает фактическое состояние с ожидаемым (рис. 1).

Принципиально важно разделять состояние, решение, действие и фактический результат. Успешный вызов API, отправка команды или завершение функции подтверждают только факт исполнения команды, но не достижение цели управления (рис. 2).

Наблюдение и оценка состояния

Качество управляющего решения зависит как от алгоритма выбора действия, так и от качества входного состояния. Слой наблюдения должен фиксировать не только измеряемые значения, но и источник данных, временную метку, доступность источника, задержку получения информации, согласованность нескольких

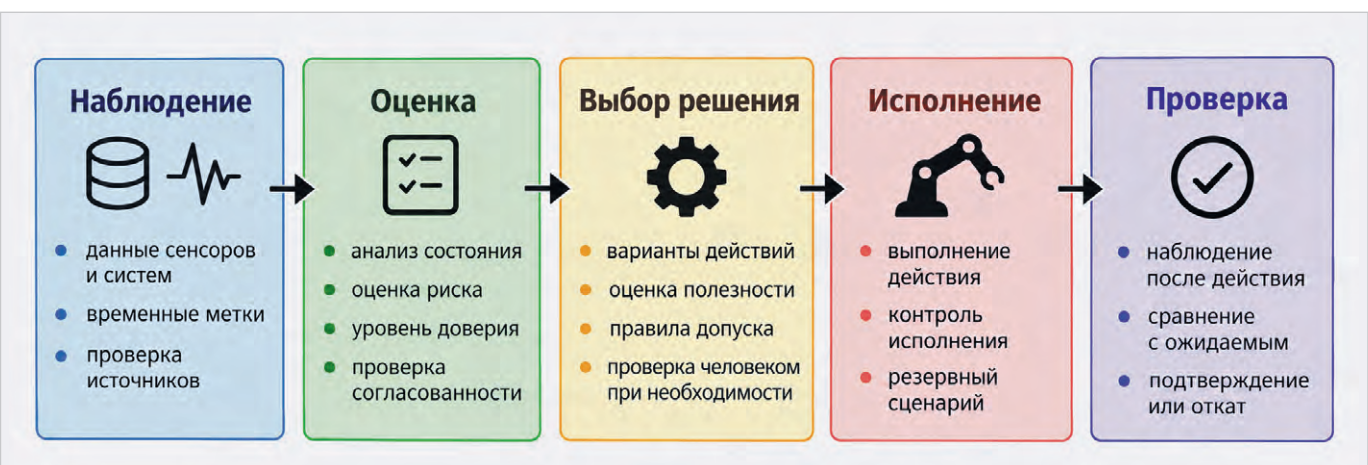


Рис. 1. Общий цикл SEACS: Наблюдение → Оценка → Выбор решения → Исполнение → Проверка

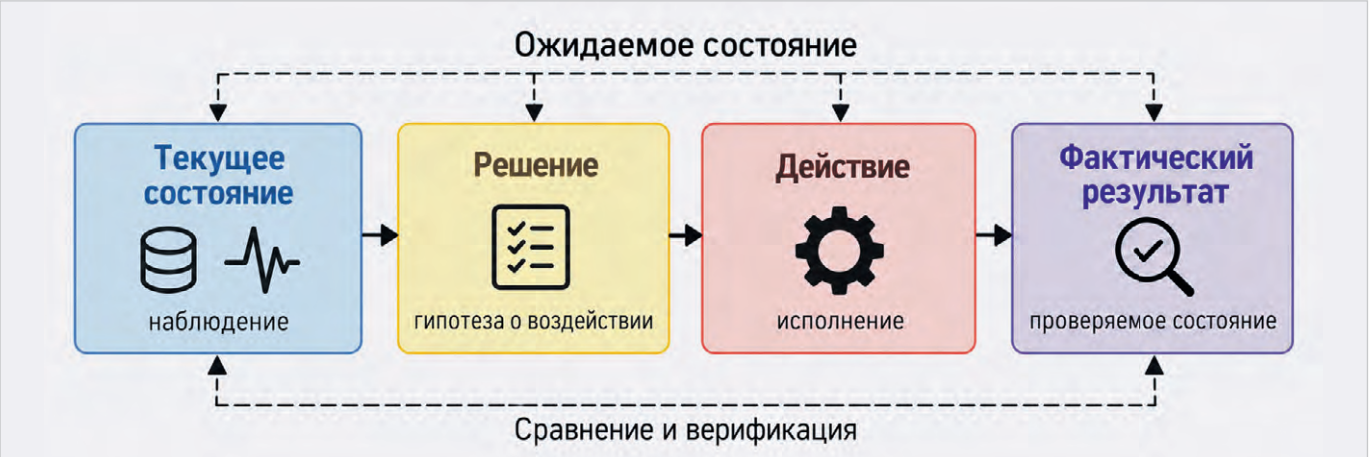


Рис. 2. Разделение состояния, решения, действия и фактического результата

источников и признаки аномального поведения.

Слой оценки преобразует поток наблюдений в формализованное состояние системы. В экспериментальной реализации SEACS используются показатели работоспособности, задержки, частоты ошибок и интегрального уровня доверия. При этом уровень доверия не трактуется как строгая статистическая вероятность истинности. Это эксплуатационная величина, определяющая, насколько безопасно действовать автоматически на основании имеющейся информации.

Такой подход позволяет разделить два вопроса: что, предположительно, происходит с системой, и насколько безопасно на основании этих данных выполнять управляющее действие. Эти ответы не всегда совпадают.

Выбор решения и управление риском

На стадии выбора решения потенциальные действия сравниваются не только по ожидаемой эффективности, но и с учётом риска. В текущем прототипе используется инженерная функция полезности вида:

полезность = ожидаемый выигрыш состояния – штраф за риск + вес доверия.

Ожидаемый выигрыш состояния отражает предполагаемое улучшение контролируемых показателей; штраф за риск учитывает возможные негативные последствия; вес доверия зависит от качества и согласованности информации. Эта формула не является универсальной математической моделью управления, а задаёт принцип ранжирования вариантов внутри экспериментального механизма принятия решений.

Действие с максимальной полезностью не обязательно исполняется автоматически. Дополнительные правила могут запретить его выполнение или передать принятие решения человеку, если уровень доверия недостаточен, состояние системы быстро меняется, действие труднообратимо, отсутствует резервный сценарий или результат предыдущего воздействия ещё не прошёл проверку (рис. 3).

Гистерезис, задержка повторных воздействий и защита от нестабильного управления

Для автономной системы опасна не только ошибка отдельного решения. Не менее опасно быстрое чередование формально допустимых воздействий. Если управляющий алгоритм немедленно реагирует на небольшое изменение метрики, система может перейти в режим колебаний между несколькими конфигурациями.

Для снижения этого риска в SEACS используются четыре группы механизмов:

- гистерезис – разные пороги входа в новое состояние и возврата к предыдущему;
- сглаживание – уменьшение влияния кратковременных выбросов и шумов;
- задержка повторного воздействия – временный запрет на новое действие сразу после предыдущего;



Рис. 3. Шлюз доверия: схема выбора и допуска действия



Рис. 4. Логика воспроизводимого сценария отказа и восстановления

- резервный сценарий – переход к заранее определённому безопасному варианту, если ожидаемый эффект не подтверждён.

Эти методы известны в классических системах управления и инженерии надёжности. Их роль возрастает при включении вероятностных и генеративных компонентов, поведение которых может быть менее устойчивым, чем поведение жёстко заданного автомата.

Проверка действия после исполнения

Этап проверки является одним из ключевых элементов предлагаемой архитектуры. После выполнения действия система повторно получает наблюдения и сравнивает ожидаемое состояние с фактическим.

Результат проверки может быть отнесён к одному из трёх классов: подтверждено – изменение соответствует ожидаемому эффекту; ухудшено – действие выполнено, но эффект недостаточен или возникли побочные отклонения; неуспешно – состояние ухудшилось или критические параметры вышли за допустимые границы, что требует отката или резервного сценария.

Таким образом, технически успешное исполнение команды не является доказательством успешного управления. История фактических результатов может использоваться для последующей коррекции уровня доверия к отдельным классам воздействий.

Экспериментальная проверка

Для проверки архитектуры используются воспроизводимые сценарии отказов и фиксированные тестовые прогоны. Система проверяется не только в нормальном режиме, но и при росте задержки, увеличении частоты ошибок, неполных наблюдениях, конфликтующих сигналах, необходимости резервного сценария и передаче решения оператору.

Сначала задаётся логика сценария: исходное состояние, внесение отказа, изменение наблюдаемых метрик, принятие решения, выполнение действия и последующая проверка восстановления. Такой порядок позволяет отделить реакцию системы на отказ от подтверждения того, что после управляющего воздействия она действительно вернулась в допустимое состояние (рис. 4).

Для каждого прогона используется единая структура фиксации данных. В неё входят исходное состояние, внесённый отказ, полученные наблюдения, выбранное решение, условия допуска, выполненное действие, фактический результат проверки и итоговый вердикт (табл. 1).

Такая форма позволяет сравнивать разные испытания по одинаковому набору полей и не смешивать факт выполнения команды с подтверждённым результатом. В текущем

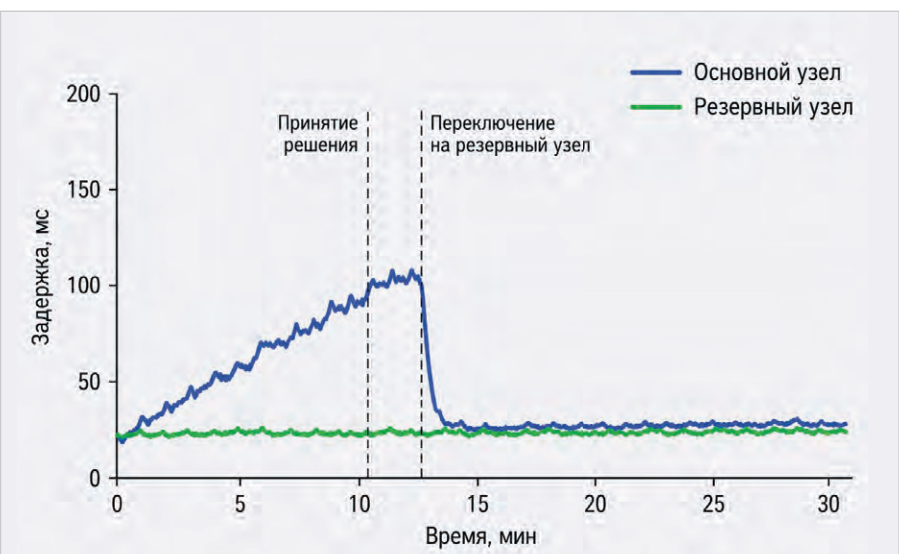


Рис. 5. Пример тестового прогона: переключение на резервный узел при росте задержки

Таблица 1. Пример структуры испытательного сценария SEACS

Поле	Содержание
Initial state	Исходное состояние
Fault	Внесённый отказ
Observation	Полученные показатели
Decision	Выбранное действие
Risk / Trust	Условия допуска
Action	Выполненное воздействие
Verification	Фактический результат
Verdict	PASS / FAIL / HUMAN REVIEW

фиксированном наборе восемь заранее определённых сценариев прошли предусмотренные проектом проверки. Этот результат следует трактовать только как прохождение собственного набора сценариев, а не как доказательство промышленной надёжности или универсальной эффективности архитектуры.

Один из демонстрационных сценариев моделирует рост задержки на основном узле распределённой системы. После достижения условий для принятия решения система переключает нагрузку на резервный узел, после чего измеряемая задержка возвращается к устойчивому уровню. Здесь проверяется не только сам факт переключения, но и достижение ожидаемого состояния после него (рис. 5).

Следующий этап экспериментальной проверки должен включать внешние сценарии, которые не использовались разработчиком при настройке логики системы.



Рис. 6. Типовая архитектура данных в SEACS

Ограничения и инженерные компромиссы

Несмотря на потенциал подхода, внедрение SEACS в реальные системы связано с рядом ограничений. Они касаются не только зрелости программного прототипа, но и качества данных, наблюдаемости объекта, вычислительных ресурсов, безопасности и регуляторных требований.

К основным ограничениям относятся:

- качество данных – неполные, шумные или смещённые данные могут приводить к неверной оценке состояния;
- ограниченная наблюдаемость – не все внутренние состояния доступны прямому измерению, они требуют косвенной оценки;
- вычислительные ресурсы – анализ сложных сценариев и применение моделей могут потребовать значительных ресурсов;
- риски безопасности – необходимо учитывать редкие, ошибочные и намеренно провоцируемые режимы;
- регуляторные и этические требования – для критических систем нужны дополнительные процедуры валидации, документирования и аудита.

На практике требуется баланс между автономностью, точностью, стоимостью вычислений, скоростью реакции и безопасностью. Для инженерных систем приоритетом должен оставаться принцип: предсказуемость и безопасность важнее максимальной производительности.

Поэтому рациональным является поэтапное внедрение: сначала наблюдение и диагностика, затем ограниченные рекомендации, далее частичная автоматизация и только после подтверждения устойчивости – более сложные сценарии автономного поведения.

Требования к данным, метрикам и протоколам испытаний

Эффективность SEACS напрямую зависит от качества данных, корректно выбранных метрик и строгих процедур испытаний. Для инженерного применения необходимо заранее определить требования к данным, формализовать показатели качества и обеспечить воспроизводимость тестов.

Набор метрик должен охватывать как минимум надёжность, безопасность, качество управления и устойчивость. Конкретные пороговые зна-

Таблица 2. Примеры метрик и критериев приёмки для SEACS

Категория	Метрика	Описание	Типовое целевое значение
Надёжность	Вероятность отказа	Доля отказов в тестовых сценариях	≤ 10^{-5} на час
	Доступность	Доля времени работоспособности	≥ 99,9%
Безопасность	Частота опасных действий	Количество опасных команд на 1 час работы	≤ 10^{-6}
Качество управления	Среднее время реакции	Время обнаружения и реакции на аномалию	≤ 100 мс
	Отклонение от цели	Среднеквадратичное отклонение	В пределах допуска
Устойчивость	Энергетическая эффективность	Относительный расход энергии	Не хуже базового уровня
	Стабильность при возмущениях	Сохранение работоспособности при заданных отклонениях параметров	≥ 95% сценариев
	Время восстановления после сбоя	Возврат к штатному режиму	≤ 5 с

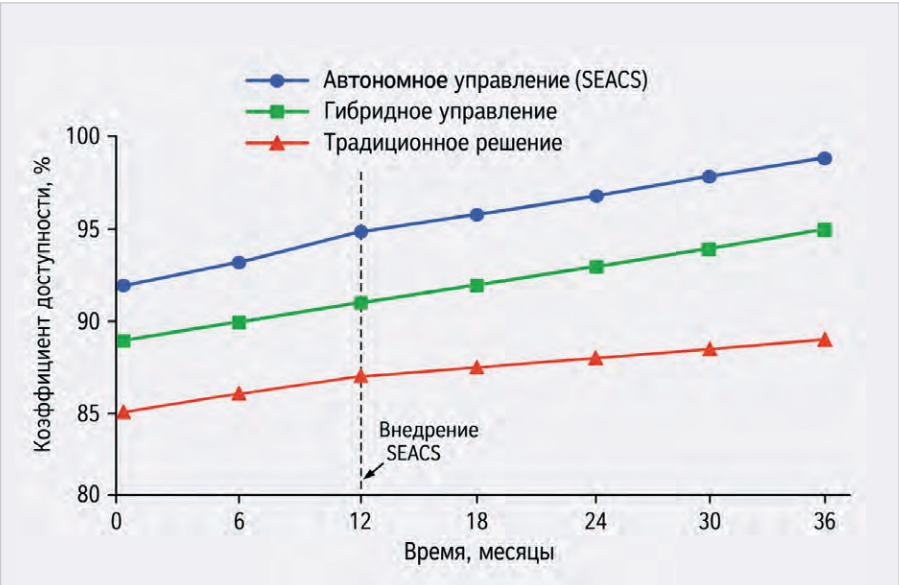


Рис. 7. Сравнение сценариев внедрения SEACS в промышленной автоматизации

чения зависят от класса системы и не должны переноситься между объектами без отдельной калибровки (табл. 2).

К данным предъявляются требования по репрезентативности режимов, происхождению и верификации источников, контролю качества, синхронизации временны́х рядов, обработке пропусков, хранению исторических версий и управлению разметкой.

Протокол испытаний должен включать модульные проверки отдельных функций, интеграционные испытания в контуре, сценарные тесты с отказами, валидацию на стендах и, при возможности, ограниченные испытания в реальной эксплуатации. Для критических применений дополнительно требуются процедуры независимой проверки и сертификации (рис. 6).

Практические области применения

Архитектура SEACS не привязана к одному типу оборудования. Она может быть адаптирована для разных отраслей, где требуется автономное или полуавтономное управление с контролем решений и обязательной проверкой результата.

Промышленная автоматизация:

- автономное управление производственными линиями;
- адаптация к изменению номенклатуры и условий;
- снижение простоев и энергопотребления.

Энергетические системы:

- управление распределёнными источниками энергии;
- балансировка нагрузки с учётом прогноза;
- повышение устойчивости к аварийным ситуациям.

Транспорт и робототехника:

- автономные мобильные платформы;
- координация групп роботов в динамической среде;
- безопасное взаимодействие с человеком.

Критическая инфраструктура:

- мониторинг и управление системами жизнеобеспечения;
- раннее обнаружение угроз и аномалий;
- поддержание непрерывности работы.

Аэрокосмические и оборонные применения:

- автономные аппараты и беспилотные системы;
- работа в сложных и неопределённых условиях;
- высокие требования к надёжности и безопасности.

Для иллюстрации долгосрочного эффекта можно использовать сравнительный сценарий, где автономное управление сопоставляется с гибридным и традиционным режимами. Такой график не следует трактовать как универсальный прогноз: он демонстрирует форму сравнения и место момента внедрения SEACS в жизненном цикле системы (рис. 7).

Дорожная карта развития SEACS

Развитие архитектуры предполагает поэтапное расширение функциональности, уровня автономности и степени интеграции с внешними системами. Дорожная карта должна учитывать как технические возможности, так и реальные ограничения эксплуатации.

На первом этапе приоритетом являются наблюдение, диагностика, поддержка принятия решений и интеграция с существующей инфраструктурой. На втором этапе возможна частичная автоматизация с жёсткими правилами допуска и контролем человека. На третьем этапе добавляются адаптивные и обучаемые механизмы при сохранении независимого контура проверки. Широкое применение возможно только после накопления эксплуатационных данных, стандартизации интерфейсов и подтверждения надёжности на независимых испытаниях.

Заключение

В статье рассмотрена архитектура SEACS как основа для построения проверяемого автономного управления в киберфизических и распределённых системах. Подход объединяет наблюдение, оценку состояния, выбор решения, исполнение и обязательную проверку фактического результата.

Ключевым принципом является разделение интеллектуального предложения и инженерного допуска к действию. Модель может интерпретировать события и формировать варианты реакции, но критические ограничения, правила допуска, резервные сценарии и проверка результата должны оставаться в отдельном контролируемом контуре.

Текущая реализация подтверждает техническую реализуемость подхода на фиксированном наборе воспроизводимых сценариев, однако не является доказательством промышленной готовности. Для дальнейшего развития необходимы внешние тестовые наборы, длительные эксплуатационные данные, калибровка метрик под конкретные классы объектов и независимая проверка.

Практическая ценность SEACS состоит не в замене существующей автоматики генеративной моделью, а в создании дополнительного слоя, который помогает ограничивать автономность, фиксировать причины решений и проверять, привело ли действие к ожидаемому результату.



...модулей гальванической
...ового сигнала 4...20 мА
.../ГР2 производства
...Мант»

...го канала и НПСИ-200-ГР2
...лов (рис. 8).
...ругой группы модулей
...роенный блок питания в
...ие, который позволяет ра-
...нько с активными, но и с
...источниками сигнала без
...дополнительных блоков



...ки сигнала 4...20 мА
...ивных и пассивных



...ывки токового сигнала
...и для активных

ЗДЕСЬ МОГЛА БЫТЬ РЕКЛАМА КОМПАНИИ





Компания могла рассказать миру
о своих идеях, достижениях и ценностях,
но **решила сэкономить.**



Иногда такая экономия обходится
дороже, чем кажется.



**ВАШИ КЛИЕНТЫ ЗАСЛУЖИВАЮТ ЛУЧШЕГО,
НЕ ТЕРЯЙТЕ ИХ ВНИМАНИЕ И ДОВЕРИЕ!**

**Медиагруппа
«СТА-ПРЕСС»**

СТА
СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
и ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ


Телефон: +7 968 567-3006


E-mail: antipov.n@cta.ru


Медиапортал: cta.ru

НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU



Третья ежегодная Всероссийская конференция «Производство мирового уровня-2027»

8–11 февраля 2027 года в «Охта Парке» (Ленинградская область) пройдёт масштабное отраслевое мероприятие для технического менеджмента и первых лиц в сфере радиоэлектроники – конференция «Производство мирового уровня».

Главная общая цель организаторов и участников – создание профессиональной среды для роста отрасли, поиск рабочих механизмов развития в текущих экономических условиях и мировой обстановке, решение насущных кадровых проблем, обмен ценным теоретическим и практическим опытом.

Конференция «Производство мирового уровня» – площадка, где собираются ключевые лица приборостроительных предприятий: собственники, генеральные и технические директора, главные инженеры и руководители производств.

Каждый доклад наполнен практическим опытом и неизменно сопровождается активным обсуждением реальных кейсов. Участники конференции получат возможность узнать из первых уст детали внедрения передовых технологий и управленческих подходов на других предприятиях отрасли.

Команда организаторов «Производства мирового уровня» не только помогает участникам в их профессиональном росте, но и год от года расширяет границы самого мероприятия.

В 2025 году на самой первой отечественной конференции «Производство мирового уровня» выступили три ключевых спикера, а кворум составил 40 участников – представителей производств РЭА.

В прошлом году, в Иннополисе, конференцию посетили уже 140 участников, у которых была возможность послушать выступления 16 спикеров-практиков, а также совершить экскурсии на передовые заводы Татарстана. Мероприятие привлекло внимание государственного сектора – в конференции принял участие Роман Александрович Шайхутдинов, заместитель премьер-министра Республики Татарстан, – и получило положительные отзывы от представителей отрасли радиоэлектроники.

«Производство мирового уровня-2027» сделает следующий большой шаг.

Регистрация на конференцию уже открыта! Мест для участников 250.

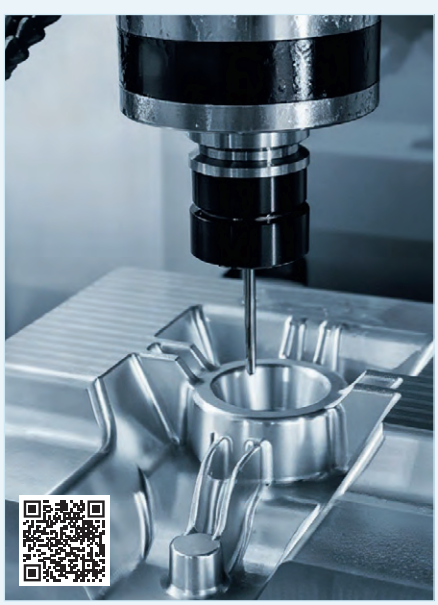
Успейте подать заявку и присоединиться к одному из ключевых отраслевых событий года.

Список выступающих лиц и подробная программа мероприятия появятся на сайте *https://pmu-conf.ru/*.

Построим производства мирового уровня в нашей стране вместе!

Робототехника ускоряет 3D-печать: срочные заказы становятся нормой даже для крупных партий

Компании, разрабатывающие робототехнические системы, всё чаще используют 3D-печать по требованию, чтобы быстрее получать детали для испытаний, доработки конструкций и серийного производства. Согласно анализу американской компании Upside Parts, изучившей более 30 000 напечатанных деталей из сотен заказов, на робототехнические компании пришлось 82,3% объёма деталей в выборке. Для отрасли особенно важны короткие сроки изготовления и гибкость выбора материалов на разных этапах разработки.



Тенденция развивается на фоне роста рынка робототехники в США. По данным Ассоциации по развитию автоматизации (A3), во втором квартале 2026 года объём заказов на роботов в Северной Америке достиг 622 млн долларов – на 21,3% больше, чем годом ранее. Рост числа проектов увеличивает потребность в компонентах не только для готовых систем, но и для многочисленных итераций проектирования и испытаний.

По данным Upside Parts, 31,5% деталей в выборке изготавливались в ускоренном режиме. Среди заказчиков из робототехнической отрасли доля таких деталей достигла 36,7%, тогда как у производителей оборудования и других промышленных компаний она составляла 7,2%. По словам основателя и управляющего партнёра Upside Parts Романа Архангельского, команды робототехники примерно в пять раз чаще прибегают к ускоренному производству, чем другие заказчики: срок изготовления влияет на график инженерных работ и скорость перехода к следующей версии изделия.

Оперативность производства определяет не только сроки поставки готового продукта, но и темп всего цикла разработки. Чем быстрее инженеры получают деталь, тем скорее они могут проверить конструкцию, выявить недостатки и внести изменения. Аддитивное производство позволяет выпускать компоненты без специализированной оснастки, что полезно при частых изменениях геометрии и конструкции. Исследования применения аддитивных технологий для управления запасными частями также указывают на возможность сократить ожидание и снизить зависимость от традиционных цепочек поставок. Национальный институт стандартов и технологий США (NIST) относит ускорение проектных итераций и отказ от длительного изготовления оснастки к преимуществам 3D-печати.

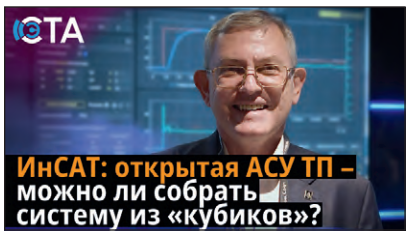
Потребность в срочном изготовлении сохраняется и при крупных заказах. По данным Upside Parts, 89% исследованного объёма приходилось на партии более чем из 100 деталей. В этой категории 32,5% компонентов выпускались в ускоренном режиме. Для заказов на 100 деталей и менее показатель составлял 23,8%. Следовательно, сокращённые сроки важны не только при изготовлении единичных прототипов. Даже при заказе сотен компонентов задержка одной группы деталей может отодвинуть сборку и испытания целого узла или системы.

Аддитивное производство постепенно выходит за рамки быстрого прототипирования и становится способом выпуска конечных изделий. По прогнозу аналитической компании AMPOWER, к 2028 году конечные детали будут составлять 44% применений аддитивного производства полимеров. Данные Upside Parts показывают, что заказчикам важно не только получать готовые детали с помощью 3D-печати, но и изготавливать их в сжатые сроки.

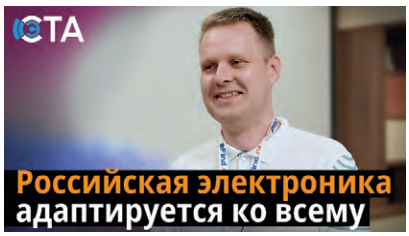
СЭТА
СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА и ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ

www.cta.ru

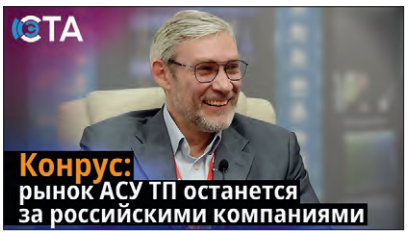
ЭКСКЛЮЗИВНЫЕ ИНТЕРВЬЮ



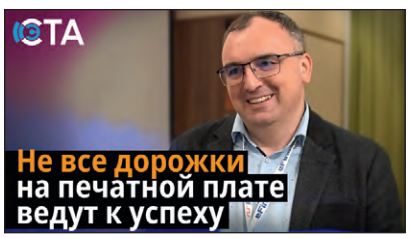
Интервью с Владимиром Айзиным – генеральным директором группы компаний «ИнСАТ»



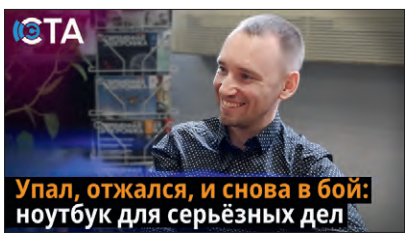
Интервью с Михаилом Русских – инженером по применению «Матрикс Электроника»



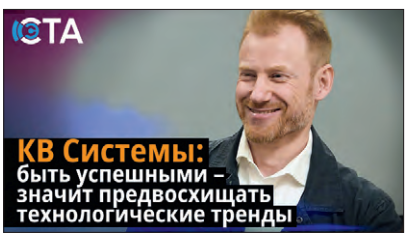
Интервью с Алексеем Турундаевым – генеральным директором АО НПП «Конрус»



Интервью с Сергеем Шкуратовым – заместителем генерального директора по стратегическому развитию ГК «Диполь»



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



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

СМОТРИТЕ НА КАНАЛЕ СЭТА

СЭТА · дзен · RUTUBE · вконтакте · YouTube

СЛУШАЙТЕ В ПОДКАСТЕ СЭТА

вконтакте · Яндекс Музыка · mave

ПТА



Конференции

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ 2027

- Промышленная автоматизация
- Цифровизация производства
- Интернет вещей и большие данные
- Искусственный интеллект
- Информационная безопасность
- Автоматизация зданий и инженерных систем

ЕКАТЕРИНБУРГ → 10 февраля

КАЗАНЬ → 31 марта

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ → 25–26 апреля

ЧЕЛЯБИНСК → 22 сентября

НОВОСИБИРСК → 26 октября

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПТА ВЫСТАВКА

+7 (495) 234-22-10 · www.pta-expo.ru

12+