

# СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

WWW.CTA.RU

7

2026

В номере:

**ОТ КВАРЦА ДО КВАНТА:**  
живая эволюция  
электроники

**Н.Г. БАСОВ:**  
у истоков квантовой  
электроники и лазеров



Электронная  
версия этого  
журнала





МЕДИАПЛАТФОРМА ДЛЯ ПРОДВИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ И ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

# ГОВОРИТЕ С ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ B2B-АУДИТОРИЕЙ НА ЕЁ ЯЗЫКЕ

**25+ ЛЕТ**  
на рынке  
промышленной  
автоматизации  
и электроники

**500 000+**  
пользователей  
портала cta.ru  
ежегодно

**45 000+**  
профильных  
читателей  
ежемесячно

**ВЫСОКИЙ  
УРОВЕНЬ  
ДОВЕРИЯ**  
среди профессионалов  
отрасли



**ЕДИНАЯ  
МЕДИАСРЕДА –  
МАКСИМАЛЬНЫЙ  
ОХВАТ ЦЕЛЕВОЙ  
АУДИТОРИИ**

## КОМПЛЕКСНОЕ ПРОДВИЖЕНИЕ ЧЕРЕЗ ЕДИНУЮ МЕДИАСРЕДУ



**ПОРТАЛ**  
cta.ru



**ЖУРНАЛЫ  
«СТА» и  
«Современная  
электроника»**



**Дзен, VK,  
TELEGRAM**



**RuTube,  
VK-видео,  
YouTube**



**EMAIL-  
рассылки**



**КОНФЕРЕНЦИИ  
ПТА**



### ПРОДВИЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ПРОДУКТОВ

- Промышленная автоматизация
- Электроника и микроэлектроника
- Embedded-системы
- Приборостроение, робототехника
- Телеком и связь, энергетика
- ОПК, нефтегаз
- Транспорт и авиация
- IT-решения для промышленности



### ПОЛНЫЙ ЦИКЛ МЕДИАПОДДЕРЖКИ

- Новости и экспертные статьи
- Технические публикации
- Интервью и репортажи
- Видеообзоры и демонстрации
- Обзоры продукции
- Рекламные интеграции
- Дизайн рекламных материалов

**Создаём контент, который  
работает на ваш бизнес!**



### ВИДЕОИНСТРУМЕНТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРКЕТИНГА

- Видеообзоры
- Интервью с экспертами
- Репортажи с производств
- Демонстрации оборудования
- Интеграции в отраслевой видеоконтент

**Видео публикуются на всех площадках  
и остаются доступными бессрочно!**



### EMAIL-МАРКЕТИНГ ПО ОТРАСЛЕВОЙ БАЗЕ

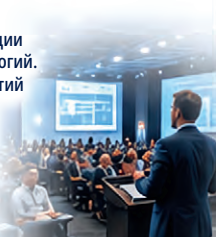
Прямой канал коммуникации с тысячами  
профильных подписчиков:

- инженеров
- проектировщиков
- руководителей
- разработчиков
- представителей предприятий
- научных сотрудников



### ОТРАСЛЕВЫЕ КОНФЕРЕНЦИИ ПТА – ПЛОЩАДКА ДЛЯ РОСТА ВАШЕГО БИЗНЕСА

- «Передовые технологии автоматизации» – крупнейшие профессиональные конференции в сфере автоматизации и embedded-технологий. С 2000 года проведено более 140 мероприятий в разных регионах России.
- Прямой выход к рынку
- Деловые контакты
- Демонстрация решений и оборудования
- Усиление узнаваемости бренда
- Качественные отраслевые лиды



## ЧТО ПОЛУЧАЕТЕ ВЫ?

- ✓ Привлечение новых клиентов
- ✓ Повышение узнаваемости брендов
- ✓ Усиление доверия к компании
- ✓ Продвижение новых технологий и продуктов
- ✓ Формирование экспертного имиджа
- ✓ Увеличение входящего интереса и продаж



## СТА – МЕДИАПАРТНЁР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЫНКА

Мы объединяем отраслевое медиа, профессиональное сообщество, цифровые площадки и офлайн-мероприятия в единую систему продвижения для высокотехнологического бизнеса.

**СТА – эффективный канал коммуникации  
с профессиональной аудиторией на рынке B2B**

**РАЗМЕСТИТЕ РЕКЛАМУ  
ИЛИ СТАТЬЮ НА СТА –  
И О ВАС УЗНАЮТ ТЕ,  
КОМУ ВЫ НУЖНЫ**

+7 (968) 567-3006  
antipov.n@cta.ru  
cta.ru





Медиапортал: [cta.ru](http://cta.ru)





Здравствуйте, уважаемые друзья!

В этом номере мы собрали материалы из области практической схемотехники, беспроводных систем, искусственного интеллекта и фундаментальных научных идей, которые продолжают находить применение в современной электронике.

Значительное место занимают вопросы схемотехники и элементной базы. В статье о кварцевых генераторах Пирса исследуется влияние параметров специализированных инверторов на запуск генерации, форму сигнала и энергопотребление. Экспериментальные результаты для резонаторов различных частот позволяют сформулировать рекомендации по выбору оптимальных режимов. Эту тему дополняет материал о быстродействующих КМОП-микросхемах, посвященный помехоустойчивости, развязке шумов и управлению переходными процессами.

К практическому применению электроники отсылает статья об организации пакетной ретрансляции данных на платформе HC12. Описанная система позволяет обеспечить устойчивую связь в условиях сложного радиопокрытия для передачи данных от термостатного контроля температуры зерна. Ещё один материал представляет базовый модуль охранного устройства на микроконтроллере AVR с двухстрочным жидкокристаллическим индикатором.

Отдельный блок номера посвящён искусственному интеллекту. Рассматривается гибридный подход к мониторингу территорий, объединяющий мультимодальные нейронные сети, экспертные системы и прецедентные методы. Такой подход позволяет повысить адекватность и объяснимость принимаемых решений. Ещё одна статья расскажет о применении машинного обучения и генеративных моделей для обработки слабых и зашумлённых сигналов, включая акустические вибрации и отражённые радиосигналы.

Научный раздел продолжает цикл публикаций к 130-летию со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма. Очередная статья посвящена истории открытия поверхностных плазмон-поляритонов и поверхностного плазмонного резонанса, используемых сегодня в электронно-оптических устройствах и высокочувствительных сенсорах. Историко-научную тему продолжает материал о Николае Григорьевиче Басове – одном из основоположников квантовой электроники и лазерных технологий.

Надеемся, что материалы номера будут интересны инженерам, разработчикам и исследователям, а также всем читателям, интересующимся 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







## Не все дорожки на печатной плате ведут к успеху

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

### Главная ошибка рынка – все пошли к одной люстре

Почему компании, вложившие серьёзные средства в производство электроники, сегодня рискуют остаться без заказов? И почему поставщик оборудования всё чаще становится не просто продавцом техники, а технологическим и управленческим консультантом?

В интервью с представителем компании «Диполь» – о проблеме, которая выходит далеко за рамки станков и производственных линий. Что происходит с загрузкой новых мощностей? Почему предприятиям бывает опасно повторять решения конкурентов? Где заканчивается конкуренция и начинается сотрудничество? И почему собственная специализация может оказаться важнее постоянного расширения производства?

Одна из ключевых идей разговора – метафора «центральной люстры». Что она означает для электронной промышленности и почему помогает увидеть причины сегодняшних проблем рынка?

Отдельно – о том, как изменились требования заказчиков к поставщикам оборудования и почему инженерная экспертиза, сопровождение проектов и опыт реализации производственных решений становятся не менее важны, чем сама техника.

Новое интервью – для тех, кто разрабатывает электронику, создаёт и развивает производство и хочет понимать, не только какое оборудование покупать, но и зачем оно нужно бизнесу.



## ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

### 04 Кварцевые генераторы на специализированных микросхемах

Сергей Бирюков, Сергей Глибин

### 08 Организация пакетной ретрансляции данных в условиях сложного радиопокрытия: опыт применения Forth на платформе HC12

Андрей Шабронов

### 16 Базовый модуль для охранного устройства с применением микроконтроллера AVR и двухстрочного индикатора

Сергей Шишкин

## ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

### 21 Гибридный подход к мониторингу территорий

Григорий Косарев, Екатерина Михайлова

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### 26 Интеграция ИИ в электронные системы для специальных задач. Новые способы дистанционного контроля с помощью РЭА

Надежда Ласорла

## СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

### 34 К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Часть 6. Возбуждение плазмонов с помощью света и поверхностный плазмонный резонанс

Виктор Алексеев

### 50 Н.Г. Басов – отец квантовой электроники и лазерных технологий

Андрей Кашкаров

## ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

### 58 Конструкции на быстродействующих КМОП-микросхемах

Александр Одинец



## Кварцевые генераторы на специализированных микросхемах

**Сергей Бирюков, Сергей Глибин (Москва)**

В статье рассматриваются кварцевые генераторы Пирса, построенные на специализированных небуферизированных инверторах 74LVC1GU04 и NC7SU04. Авторы исследуют влияние сопротивления резистора обратной связи R2, напряжения питания и рабочей частоты на запуск генерации, форму выходного сигнала и потребляемый ток. На основе экспериментальных измерений для кварцевых резонаторов с частотами 32,768 кГц, 1,05 МГц и 25 МГц сформулированы рекомендации по выбору параметров схемы, обеспечивающих минимальное энергопотребление и устойчивую работу генератора.

Когда в электронных устройствах, в том числе с микроконтроллерами, требуется повышенная стабильность задающей частоты, обычно практикуется применение генераторов на кварцевом или керамическом резонаторе, называемых кварцевыми генераторами.

Для построения такого генератора на цифровых микросхемах КМОП их ранние серии имели в своём составе микросхему, содержащую (помимо счётчиков) хотя бы один небуферизированный элемент НЕ. Например, в отечественной серии К176 это были К176ИЕ5, К176ИЕ12, К176ИЕ18, а в зарубежной серии 4000В – CD4060В.

В настоящее время для этой цели выпускаются специальные микросхемы, такие как NC7SU04 (ON Semiconductor), 74LVC1GU04 (Nexperia), в миниатюрных корпусах для поверхностного монтажа и имеющие в своём составе только логический элемент

НЕ. К сожалению, в справочных данных (datasheet) они рассматриваются практически как цифровые микросхемы, и их параметры указываются как для цифровых, а применение в генераторах освещается очень кратко. Например, сведения о потребляемом генератором токе (часто немаловажные) могут отсутствовать.

Для построения генераторов на этих микросхемах в datasheet приводится стандартная широко распространённая схема, показанная на рис. 1. Она представляет собой современное решение генератора Пирса на небуферизированном элементе НЕ (DD1) с широкой линейной АФХ. Впервые вариант кварцевого генератора был предложен на выводных компонентах и ламповом триоде в роли инвертора Джорджем Пирсом более ста лет назад в 1923 г.

Номинал резистора R1 не критичен – 1 МОм и более, ёмкости конденсаторов

С1 и С2 порядка 20...30 пФ, сопротивление резистора R2 – 1 кОм.

Для генераторов указываются широкие диапазоны генерируемых частот от десятков килогерц до десятков мегагерц, однако экспериментальная проверка показала, что сопротивление резистора R2 хотя и может изменяться в широких пределах, но для разных частот его оптимальная величина разная.

Для проверки работы генераторов были изготовлены два макета на указанных выше микросхемах в корпусах SOT23-5. Генераторы собирались на макетных печатных платах, предназначенных для установки десятивыводных микросхем поверхностного монтажа с шагом выводов 0,95 мм [1]. Резисторы и конденсаторы типоразмера 0603. Для подключения резонатора, источника питания 1...5 В и контролирующего устройства (осциллографа) в плату впаяны штырьки диаметром 1 мм от разъёма 2PM. Исходно в качестве R2 были установлены резисторы 510 кОм, для уменьшения их сопротивления параллельно впайвались дополнительные резисторы МЛТ-0,25. Блокировочный конденсатор С3 подпаян с обратной стороны платы. Расстановка элементов на плате проиллюстрирована на рис. 2. Фото собранных генераторов приведено на рис. 3.

Генераторы испытывались с кварцевыми резонаторами на частоты 32,768 кГц, 1,05 и 25 МГц, в табл. 1 и 2 и на рис. 4 и 5 приведены полученные результаты.

В таблицах приведены токи потребления генераторов в зависимости от частоты резонатора, сопротивления резистора R2 и напряжения питания. Прочерки в некоторых клетках

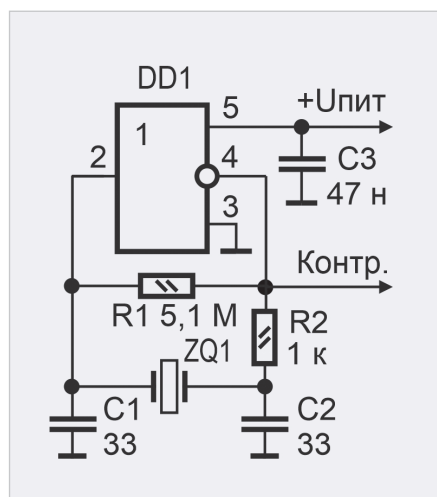


Рис. 1. Схема генератора Пирса на элементе НЕ

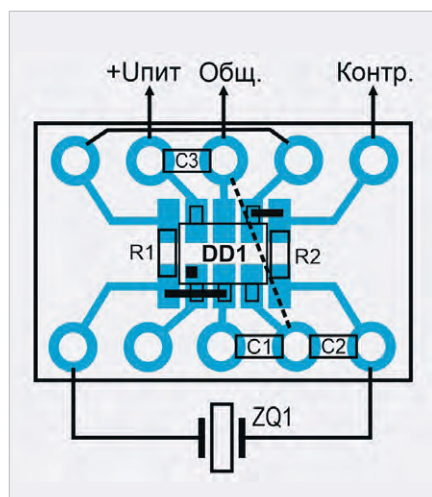


Рис. 2. Расстановка элементов генератора на макетной плате



Рис. 3. Фото собранных генераторов



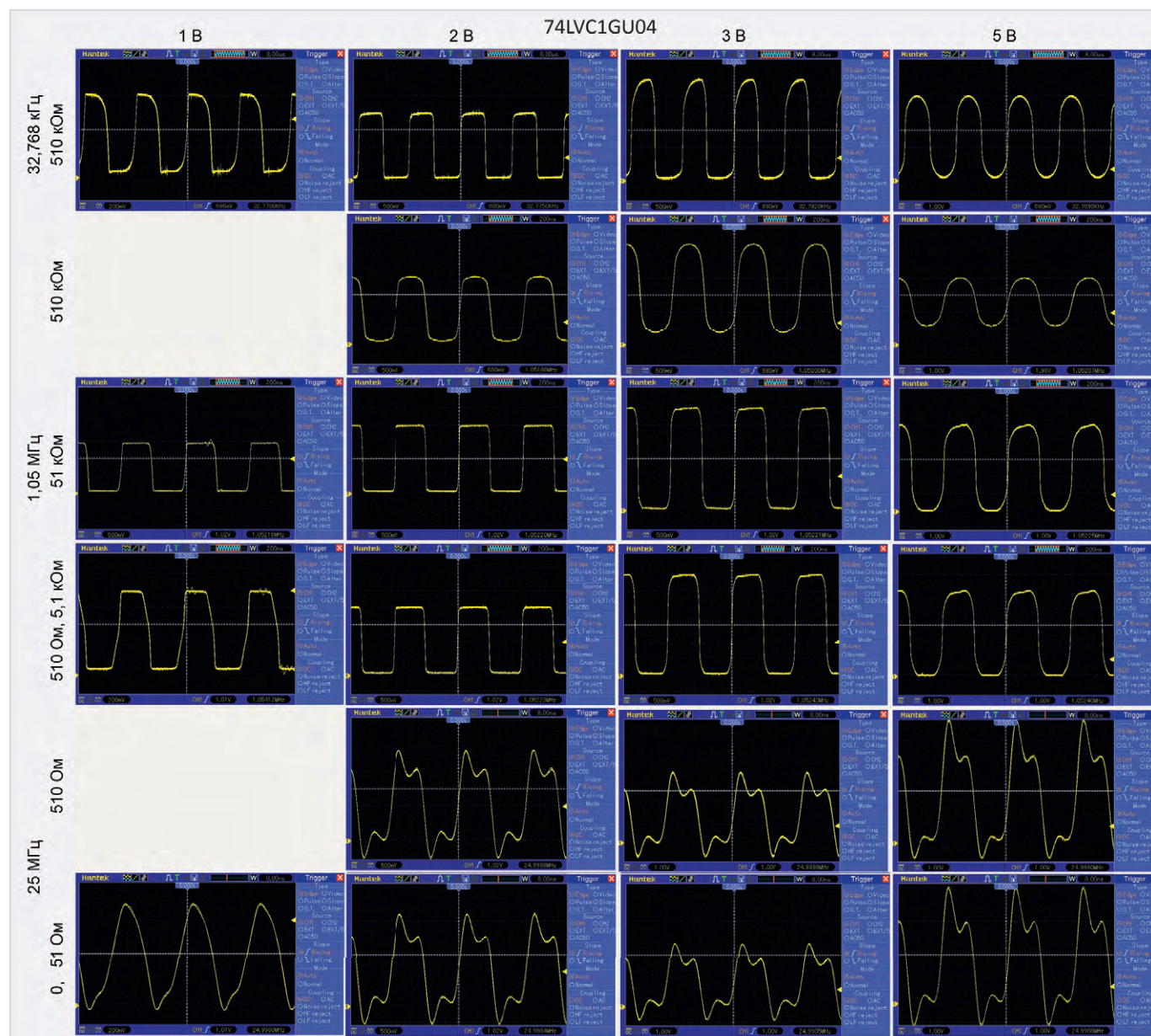


Рис. 4. Осциллограммы генератора на 74LVC1GU04

Таблица 1. Токи потребления генератора на 74LVC1GU04

| 74LVC1GU04 |         |                                                 |      |        |        |
|------------|---------|-------------------------------------------------|------|--------|--------|
| F          | R2      | Ток потребления, мкА, при напряжении питания, В |      |        |        |
|            |         | 1                                               | 2    | 3      | 5      |
| 32 768 Гц  | 510 кОм | 0,7                                             | 210  | 2200   | 32 000 |
| 1,05 МГц   | 510 кОм | –                                               | 165  | 22 000 | 61 000 |
| 1,05 МГц   | 51 кОм  | 34 (1,5 В)                                      | 260  | 3600   | 21 000 |
| 1,05 МГц   | 5,1 кОм | 16                                              | 250  | 2600   | 16 000 |
| 1,05 МГц   | 510 Ом  | 19                                              | 280  | 3200   | 18 000 |
| 25 МГц     | 510 Ом  | –                                               | 1500 | 5100   | 26 000 |
| 25 МГц     | 51 Ом   | 410                                             | 1800 | 3500   | 15 000 |
| 25 МГц     | 0       | 367                                             | 2000 | 4000   | 14 500 |

Таблица 2. Токи потребления генератора на NC7SU04

| NC7SU04   |         |                                                 |              |      |      |
|-----------|---------|-------------------------------------------------|--------------|------|------|
| F         | R2      | Ток потребления, мкА, при напряжении питания, В |              |      |      |
|           |         | 1                                               | 2            | 3    | 5    |
| 32 768 Гц | 510 кОм | 1 (1,2 В)                                       | 15           | 300  | 2000 |
| 1,05 МГц  | 510 кОм | –                                               | 110          | 1080 | 6000 |
| 1,05 МГц  | 51 кОм  | 34 (1,5 В)                                      | 54           | 270  | 1600 |
| 1,05 МГц  | 5,1 кОм | 18                                              | 52           | 200  | 1150 |
| 1,05 МГц  | 510 Ом  | 7                                               | 76           | 220  | 1150 |
| 25 МГц    | 510 Ом  | –                                               | 1100 (2,5 В) | 1800 | 3400 |
| 25 МГц    | 51 Ом   | –                                               | 700          | 1650 | 3300 |



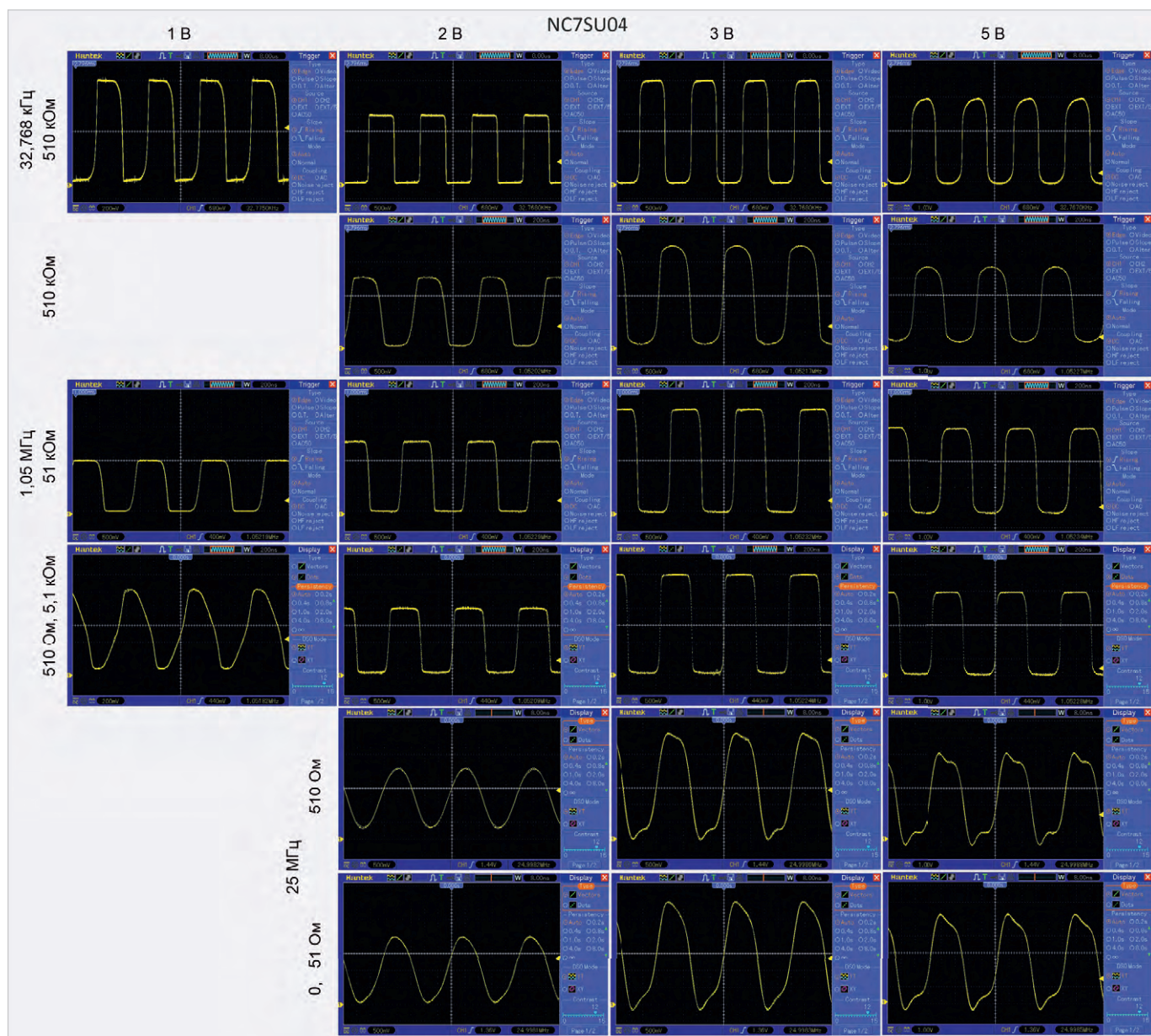


Рис. 5. Осциллограммы генератора на NC7SU04

таблицы для напряжения питания 1 В означают, что генератор не возбуждался, а в скобках указано минимальное напряжение для данного сочетания параметров, при котором начиналась генерация.

Расположение осциллограмм выходных сигналов на рис. 4 и рис. 5 соответствует положению значения измеренного тока потребления в табл. 1 и 2. В тех случаях, когда осциллограммы для некоторых сопротивлений R2 были практически идентичны, строки для уменьшения объема исключены.

Размах сигналов на выходах генераторов от пика до пика почти во всех случаях близок к напряжению питания, визуальное различие амплитуд вызвано изменением масштаба по вертикали при смене напряжения питания.

Отметим, что на частоте 32,768 кГц при сопротивлении R2, равном 51 кОм, генерация сохранялась для всех напряжений питания, а при 5,1 кОм генераторы не работали. Можно считать, что для такой частоты оптимально сопротивление резистора R2 порядка нескольких сотен кОм.

Для частоты 1,05 МГц сопротивление R2, равное 510 кОм, – неоптимальное, вершины импульсов сильно закруглены, а вот при сопротивлениях от 510 Ом до 51 кОм форма выходного сигнала близка к прямоугольной. Для генератора на микросхеме NC7SU04 при напряжении питания менее 2 В на этой частоте желательно сопротивление около 51 кОм.

Интересна форма сигналов генератора на микросхеме 74LVC1GU04 на частоте 25 МГц. Для снятия осцилло-

грамм использовался осциллограф HantekDSO5102P с полосой пропускания 100 МГц. Как известно, спектр прямоугольных сигналов (меандра) состоит из убывающих по амплитуде нечетных гармоник, для данного случая 25, 75, 125 МГц и так далее. Осциллограф оставляет только две первые гармоники – 25 и 75 МГц, их и видно на осциллограммах генератора на микросхеме 74LVC1GU04 (при напряжении питания 2 В и выше). Это может означать, что сигнал имеет неплохую форму, близкую к прямоугольной.

Для генератора на микросхеме NC7SU04 форма сигнала на частоте 25 МГц, индицируемая осциллографом, сглажена, следы третьей гармоники едва заметны, по-видимому, она реально такая.



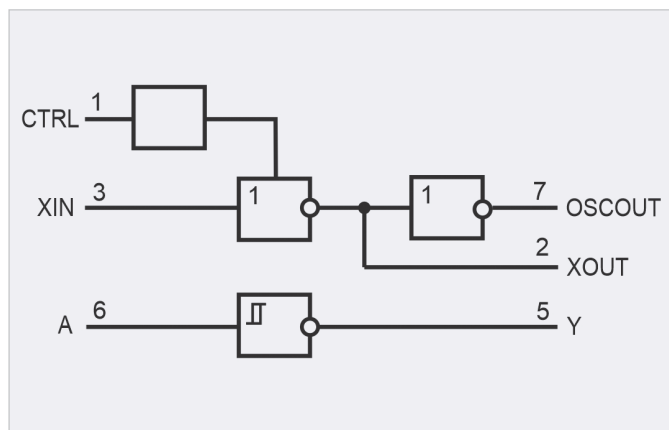


Рис. 6. Схема микросхемы SN74LVC1404

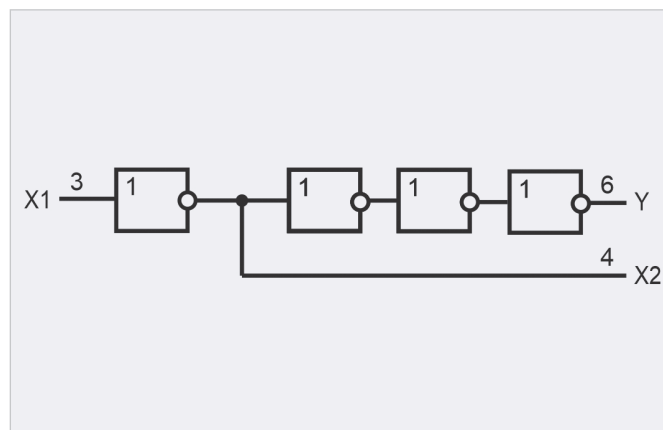


Рис. 7. Схема микросхемы SN74LVC1GX04

## Выводы по результатам проведённых экспериментов

1. Генераторы Пирса на микросхеме 74LVC1GU04 более широкополосны и обеспечивают лучшую форму колебаний на высоких частотах, однако потребляют значительно больший ток, поэтому на относительно низких частотах (скажем, менее 30 МГц) рациональнее использовать NC7SU04, и только на более высоких – 74LVC1GU04.

2. Сопротивление резистора R2 для генераторов частотой порядка нескольких десятков кГц, как указывалось выше, должно быть несколько сотен килоом. На частоте 1 МГц – порядка 5 кОм, но это практически с десятикратным запасом в любую сторону, а минимальный потребляемый ток получается именно при 5 кОм. На частоте 25 МГц форма сигнала практически не меняется при сопротивлении R2 от 510 Ом до нуля, минимальный потребляемый ток достигается при сопротивлении R2 51 Ом или при его нулевом значении.

В общем случае при выборе значения сопротивления резистора R2 можно руководствоваться статьёй [2] с описанием работы генераторов на небуферизированных инверторах. Сопротивление этого резистора должно быть близко к импедансу конденсатора C2 на частоте генерации.

Для типовой ёмкости C2 = 33 пФ формула расчёта сопротивления резистора R2 будет выглядеть так:

$$R2 = 1/(2\pi fC) = 1/(6,28 \times 33 \times 10^{-12} \times f) \approx 5/f \text{ (МГц, кОм)}.$$

Для частоты 32,768 кГц сопротивление резистора R2 должно составлять 150 кОм, для 1 МГц – 5 кОм, для 25 МГц – 200 Ом. Результаты расчё-

та по этой формуле не противоречат полученным экспериментальным данным.

3. При оптимальном выборе сопротивления R2 характерна слабая зависимость тока потребления генераторов от частоты. Это объясняется тем, что с ростом частоты растёт крутизна фронтов сигналов на входе генератора, и продолжительность сквозных токов (присущих микросхемам КМОП) в пределах порогов переключения по отношению к периоду сигналов остаётся величиной постоянной. Это замечено и у микросхем низкочастотных серий. Так, в генераторе на микросхеме HEF4060B при смене резонатора со 100 кГц на 32,768 кГц ток не изменился и был около 50 мкА при напряжении питания 5 В [3].

4. В случае необходимости минимизации тока потребления генератором кроме выбора сопротивления R2 следует обратить внимание на выбор ёмкости конденсаторов C1, C2. Совместно с резонатором ZQ1 они, как известно, образуют параллельный резонансный LC-контур с частичным подключением к выходу генератора. Суммарная ёмкость, при их последовательном соединении с учётом ёмкостей монтажа, должна быть равна нагрузочной ёмкости резонатора, указанной его производителем. Коэффициент передачи сигнала с выхода на вход генератора зависит от соотношения C1 с C2. При C1 = C2 он меньше единицы, а при C2 > C1 – больше единицы, что приводит к улучшению прямоугольности импульсов на выходе (напряжение на входе инвертора увеличивается) и к уменьшению тока потребления [3]. В более ранних сериях КМОП, например, для

«часовой» микросхемы K176IE18, при питании 5 В ток потребления генератора с резонатором 32,768 кГц удавалось снизить до 11,5 мкА при соотношении C1 с C2 примерно 1/3 (10 пФ и 30 пФ).

5. Форма выходного сигнала рассмотренных генераторов позволяет, как правило, подавать их непосредственно на входы типовых КМОП-микросхем, однако в ответственных случаях следует использовать триггеры Шмитта, как это сделано, например, в конструкции [4].

Существуют также микросхемы, включающие в свой состав, кроме небуферизированного инвертора, второй такой же инвертор и триггер Шмитта – SN74LVC1404. Её схема приведена на рис. 6.

Микросхема SN74LVC1GX04 содержит цепочку из трёх инверторов, формирующую выходной сигнал с крутыми фронтами. Её схема приведена на рис. 7.

Параметры небуферизированных инверторов, входящих в их состав, близки к параметрам 74LVC1GU04, поэтому можно пользоваться приведёнными выше рекомендациями.

## Литература

1. Комплект адаптеров SMD-DIP.  
URL: <https://ali.click/aowk61p>.
2. Use of the CMOS Unbuffered Inverter in Oscillator Circuits. Texas Instruments. Application Report. SZZA043 – January 2004.
3. Глибин С. Настольный цифровой вольтметр 4½ разряда с ЖК-индикатором // Современная электроника. 2025. № 8. С. 18–21.
4. Бирюков С. Цифровой измеритель ёмкости, индуктивности и ЭПС // Радио. 2026. № 4. С. 31–35; № 5. С. 21–25.



# Организация пакетной ретрансляции данных в условиях сложного радиопокрытия: опыт применения Forth на платформе HC12

Андрей Шабронов

Крыши из металлочерепицы и другие металлические конструкции хранилищ зернопродуктов препятствуют прохождению радиоволн и не позволяют сформировать одноточечное подключение радиоканала. Поскольку мощность HC12 [1] ограничена, используется метод ретрансляции данных, которые организованы в структурированные пакеты. Структура пакетов подобна известному протоколу AX25 [2], содержит данные и адресную информацию, что позволяет организовать их перемещение по модулям HC12 и выполнить ретрансляцию данных. В адресации зарезервировано подключение до 6 ретрансляторов-репитеров (РПТ), что при средней дистанции 500–1000 метров между ними позволяет получать устойчивые данные от источников на расстоянии до 3–6 километров.

Источник данных – термоштанга (ТШ) удалённого контроля температуры зерна [3], при перемещении по территории складов автоматически подключается к доступному РПТ.

Практическое применение всего двух РПТ позволяет обеспечить доступ к измерению для комплекса складов с полностью металлическими крышами на площади около 1000×500 метров и ещё «обойти» корпус элеватора вертикального хранения из железобетона для доступа к данным в лаборатории объекта.

Приведена схема, конструкция и программное исполнение РПТ.

Дополнительно в конструкции предусмотрены шины интерфейсов RS-485, 1-Wire, I<sup>2</sup>C и установочные позиции для возможного подключения датчиков температуры, влажности и различных газов.

## Введение

Подключение на объекте модуля HC12 в верхней части галереи элеватора на высоте 30 метров позволило охватить приёмом и передачей всю территорию складов, но только не вну-

три склада. Металлочерепица надёжно защищает от воды и снега, а также от радиоволн. Подобное препятствие помогла обойти система ретрансляции данных. Первый ретранслятор установили в средней части склад-

ского комплекса, примерно на середине высоты стены. Второй ретранслятор имеет прямую радиовидимость с первым и доступен с обратной стороны 30-метрового здания элеватора. РПТ (x22) наблюдается от корпуса лаборатории, как показано на рис. 1. Все участники передачи данных – компьютер (ПК), РПТ и ТШ – имеют свои уникальные адреса, которые задаются в файле инициализации и определены одним байтом. Таким образом:

- байт x10 определяет адрес компьютера, который проводит сбор термометрии;
- байты x21...x2F определяют адреса РПТ;
- байты x31...x7F определяют адреса ТШ.

Трасса радиоканала от ПК до РПТ(x21) показана на рис. 2. Высокое расположение ПК обеспечивает широкий выбор расположения РПТ(x21). Он размещён так, чтобы была прямая видимость до второго РПТ(x22).

Из рис. 2 видно, что трасса «упирается» в металлическую преграду – крышу склада. Сами стены склада из кирпича и «радиопрозрачны» для диапазона HC12. На рис. 3 слева показан установленный РПТ(x21) на фоне стены склада. Справа на рисунке тот же РПТ(x21) в большем масштабе.

РПТ(x22) установлен в тёплом помещении в оконном проёме на металлическом уголке, как показано на рис. 4. Помогло удачное расположение окна, из которого виден и административный корпус с лабораторией, и часть склада, на стене которого расположен РПТ(x21). Конструкция выполнена в обычной монтажной коробке 100×100×60 мм. Основное питание от адаптера 220/5 вольт для мобильного телефона. Резервное питание предусматривается от аккумулятора 18 650 мА·ч, который устанавливается на печатной плате РПТ.

На рис. 5 представлено месторасположение ПК на верхней галерее элева-

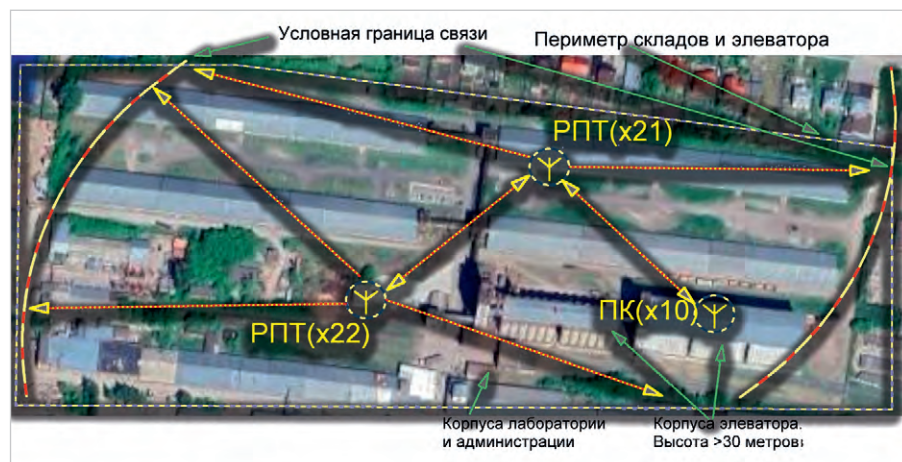


Рис. 1. План размещения РПТ и ПК на территории элеватора и складского комплекса

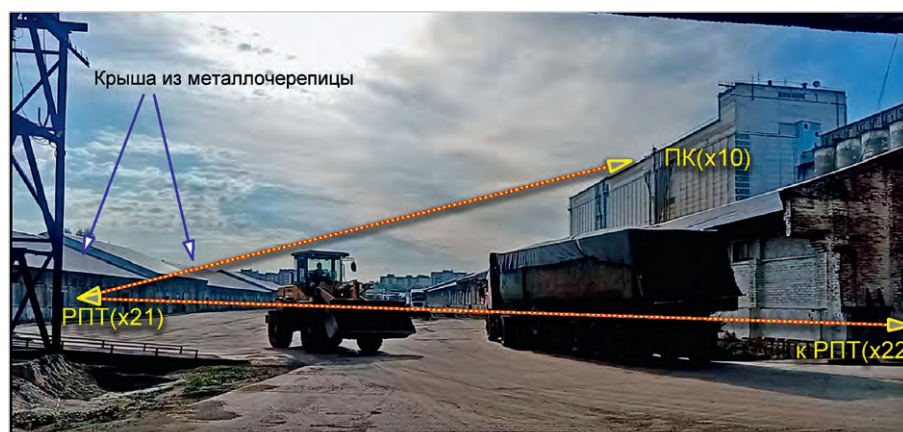


Рис. 2. Трасса от ПК до РПТ(x21)

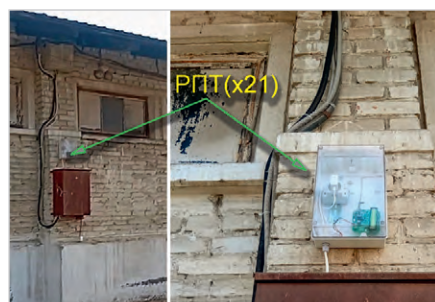


Рис. 3. Место установки РПТ(x21)



Рис. 4. Место установки РПТ(x22)



Рис. 5. Место установки ПК(x10) на верхней галерее элеватора

тора. ПК с блоком питания и сетевым коммутатором, предназначенным для включения в локальную сеть, расположены в боксе. На внешней боковой стороне установлена направленная антенна [4]. Антенна закреплена с наклоном вниз к линии горизонта для покрытия близлежащей территории складского комплекса.

Таким образом, расположение ПК и РПТ обеспечивает покрытие необходимой площади складов. Топология обусловлена особенностями данного объекта. В конкретной реализации использовались возможности локальной сети элеватора, которые позволили установить ПК на верхней галерее, и имеющееся расположение других зданий объекта.

### Структура пакета и адресации обмена

Структура пакета побайтно представлена на рис. 6. Оставлены основные функциональные блоки стандарта AX25 для пакета: синхронизация, адресация, данные, контроль пакета.

Поскольку используемый HC12 настроен для максимальной дальности связи в режим UF4, он ограничен размером возможного использования пакета в 60 байт. Контроль искажения пакета выполняется по байту контрольной суммы «умножением» по модулю два всех байтов пакета. Чтобы не увеличивать количество вычислений на другой тип контроля для большего размера пакета и не терять на это время, выбран размер пакета в 23 байта.

Предварительно определяются места расположения РПТ на объекте. Возможно задать вручную, какой РПТ и где работает, или перебором вариантов возможного доступа в автоматическом режиме. Так, например, для двух РПТ существует 3 варианта топологии, как показано на рис. 7.

Количество вариантов определяется факториалом числа РПТ и для максимально применённых 6 РПТ составит 720 позиций. Поскольку РПТ располагаются постоянно и не перемещаются по объекту, их конфигурация записывается в файле инициализации в определённой форме. Заданное языком Forth «слово» DPK записывает цифровую последовательность, определяющую топологию передачи. Чтобы не вводить лишних символов, цифрой ноль ограничивают поле адресов РПТ.

Общий принцип конфигурации: слева ноль обозначает ПК с адресом x10, и справа ноль обозначает адрес возможной ТШ. Между нулями указываются адреса РПТ, где крайний справа адрес всегда соответствует номеру по порядку строки топологии. Первая строка – для РПТ(x21), вторая – для РПТ(x22) и так далее.

Пример конфигурирования 6 РПТ с точкой подключения всех РПТ к ПК:

```
DPK= 0 21 0;
DPK= 0 22 0;
DPK= 0 23 0;
DPK= 0 24 0;
DPK= 0 25 0;
DPK= 0 26 0.
```

Пример для 6 РПТ, где они расположены в «линейку» по три:

```
DPK= 0 21 0 – РПТ(x21) к ПК(x10);
DPK= 0 21 22 0 – РПТ(x22) к РПТ(x21),
который подключён к ПК(x10);
DPK= 0 21 22 23 0 – РПТ(x23) к
РПТ(x22), РПТ(x22) к РПТ(x21),
который подключён к ПК(x10);
DPK= 0 24 0 – РПТ(x24) к ПК(x10);
DPK= 0 24 25 0 – РПТ(x25) к РПТ(x24),
который подключён к ПК(x10);
```

```
DPK= 0 24 25 26 0 – РПТ(x26) к
РПТ(x25), РПТ(x25) к РПТ(x24),
который подключён к ПК(x10).
```

Для объекта, приведённого на рис. 1, конфигурация для двух репитеров такая:

```
DPK= 0 21 0 – РПТ(x21) к ПК(x10);
DPK= 0 21 22 0 – РПТ(x22) к РПТ(x21),
который подключён к ПК(x10).
```

Если используется менее 6 РПТ, то в программе предусмотрено отключение других адресов РПТ.



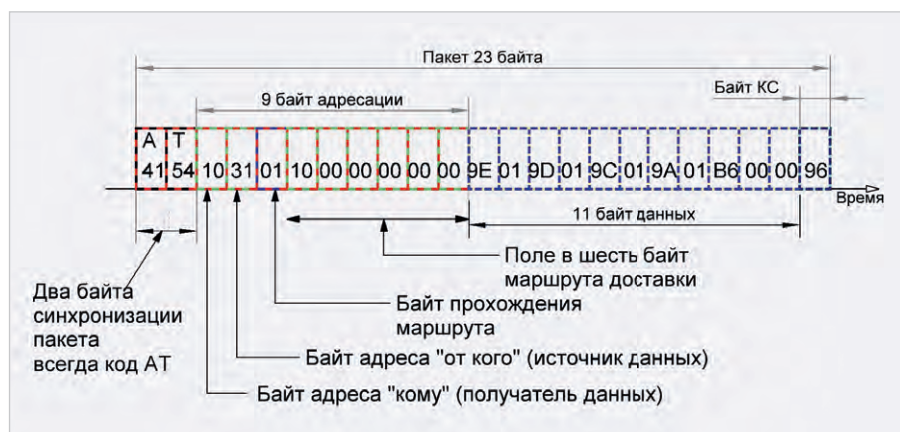


Рис. 6. Структура пакета

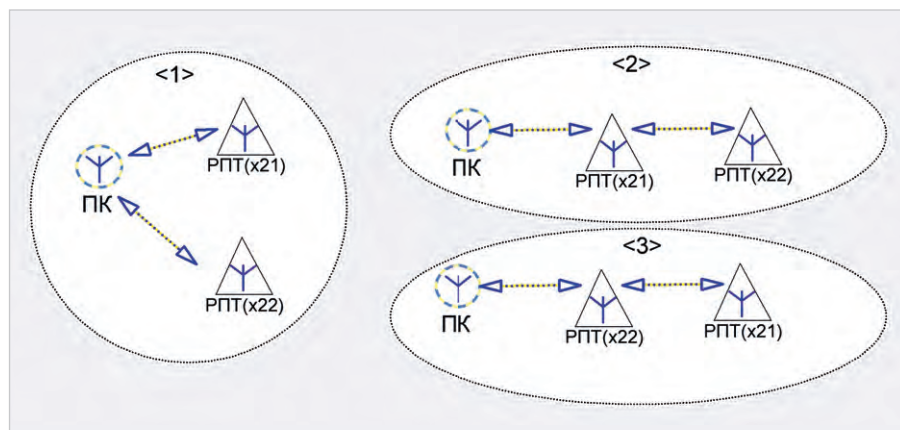


Рис. 7. Варианты топологии для двух РПТ

Источники данных, ТШ контроля температур, наоборот, перемещаются по территории складов и переключаются к доступному РПТ или ПК в процессе передачи данных. Программа в ТШ по алгоритму перебирает и передаёт данные по доступным адресам и получает подтверждение, что пакет получен, в случае доставки на ПК. Таким образом, в ТШ не надо хранить адресацию маршрута, а доста-

точно только знать доступные адреса РПТ.

Адреса доставки хранятся в ПЗУ микросхемы микроконтроллера РПТ 12F675 [5]. Обратная передача квитанции (подтверждения) получения данных для ТШ выполняется по полученному от неё адресу в пакете.

Точно так же выполняется квитирование и в случае запроса на ТШ или РПТ. ПК передаёт пакет с запросом

на ТШ, в котором есть адрес доставки. На конечном адресате адрес в поле пакета «инвертируется», т.е. переворачивается так, чтобы сформировался обратный адрес, и вновь отправляется отправителю. Процесс модификации поля адреса представлен на рис. 8.

Для наглядности на рис. 8 представлена модификация для последовательного расположения номеров РПТ, т.е. x21, x22, x23. В реальности могут быть любые комбинации РПТ, и их прохождение определяется пятым байтом пакета. Этот байт «разделён» на два полубайта: старший получает количество РПТ на маршруте, а младший «указывает» используемый РПТ. При каждой передаче пакета РПТ младший полубайт увеличивается на +1, и, таким образом, в конце маршрута оба полубайта равны. Равенство полубайтов даёт признак окончания маршрута для ПК или ТШ.

Для работы без РПТ используется код 0x10, и пакет для передачи от ТШ к ПК выглядит так:

41 54 10 31 11 10 00 00 00 00 00 AB 01 AB 01 AB 01 AB 01 BF 02 00 88.

Пятый байт маршрута выделен цветом и установлен в 11, т.е. старший и младший полубайты равны. Шестой байт равен адресу ПК, т.е. 0x10.

Маршрутизация с указателем места пакета на маршруте позволяет избежать коллизий в случае одновременного приёма пакета несколькими РПТ или ТШ. Любой передаваемый пакет всегда имеет конкретный адрес доставки.

В случае ошибочного приёма и, соответственно, отсутствия квитанции пакет повторяется через заданный тайм-аут.

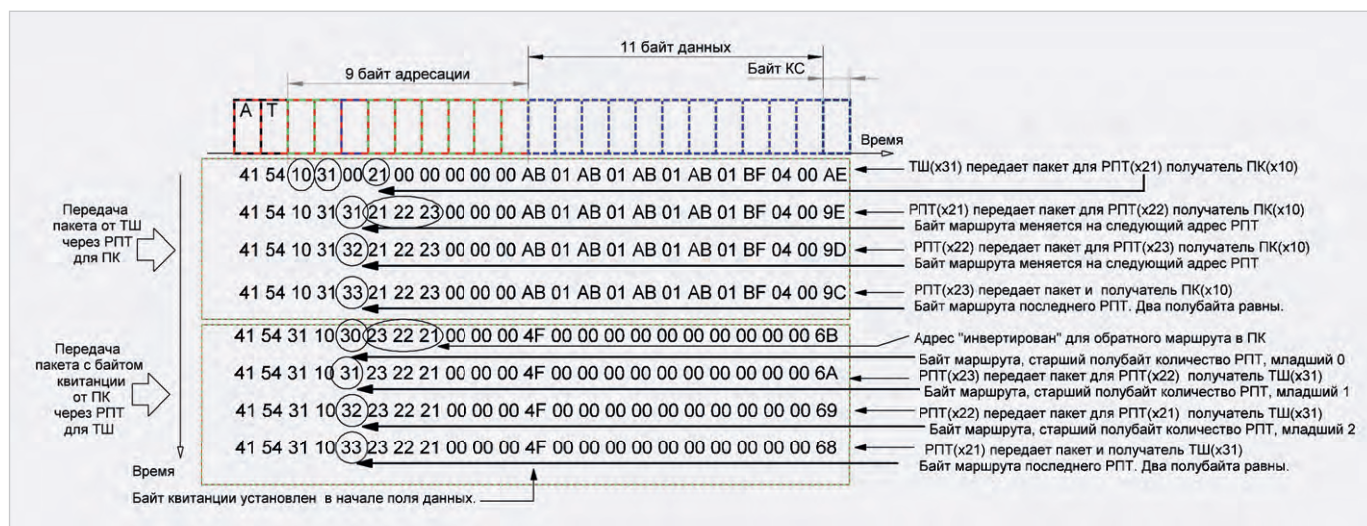


Рис. 8. Модификация поля адреса при передаче через три РПТ



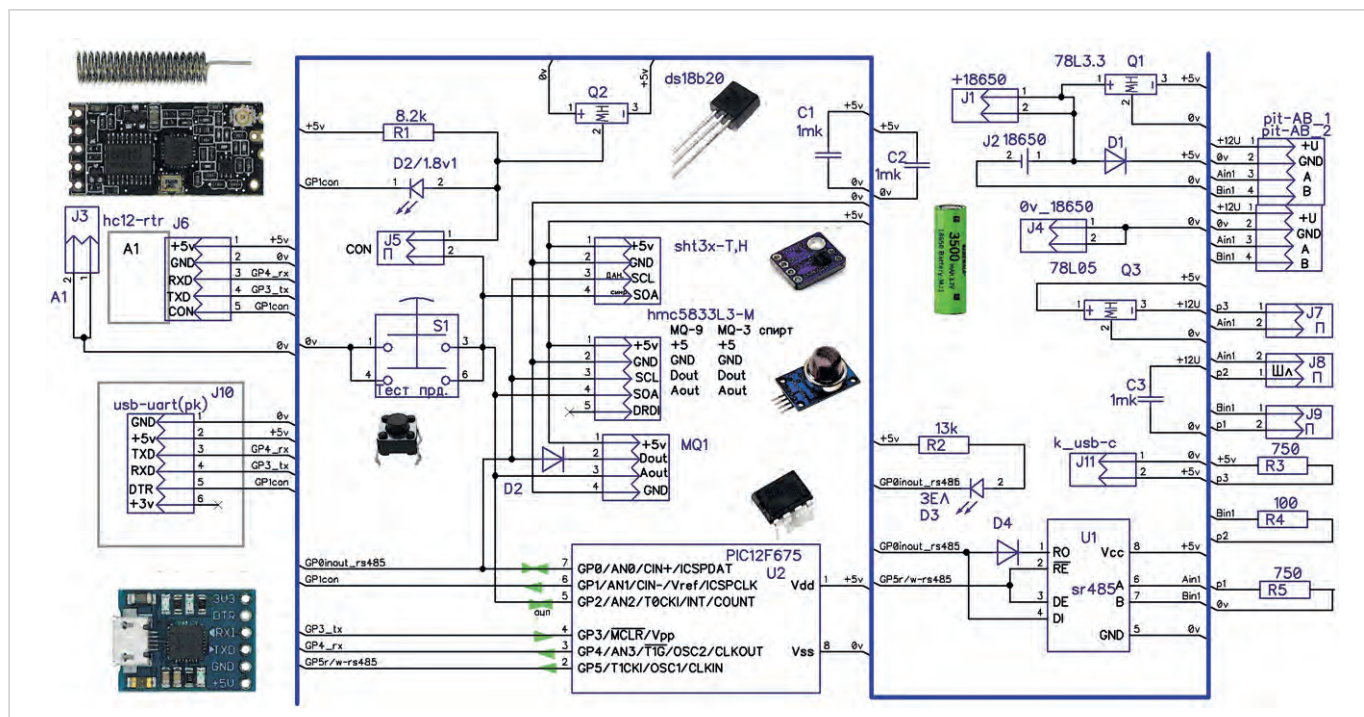


Рис. 9. Принципиальная схема РПТ

Предупреждение коллизий одно-временной передачи ТШ решается путём анализа «молчания» эфира на время не менее передачи одного пакета. Проще говоря, ТШ всегда «слушают», не занят ли эфир, и только потом выдают пакеты на передачу. Если эфир занят, то выполняется тайм-аут на передачу пакета и повторяется попытка выхода на передачу.

### Схема РПТ

Принципиальная схема РПТ для радиоканала HC12 на МК 12F675 с фотографиями сопутствующих элементов представлена на рис. 9.

Назначение элементов:

- на разъём J6 подключаются входные сигналы радиомодуля HC12, по которым передаётся и принимается информация радиобмена;
- на разъём J10 подключается USB-UART для настройки, проверки конфигурации РПТ или работы только с ПК;
- МК U2 12F675 выводами GP0, GP1, GP2 может подключаться через соответствующие разъёмы к модулям датчиков измерения газов серии MQ [6];
- предусмотрено подключение цифрового датчика температуры Q2 DS18B20 [7]. Напряжение питания контролируется через АЦП МК по входу GP2. Поскольку питание РПТ изменяется в широких пределах, используется напряжение на включённом светодиоде D1 в качестве срав-

нения с измеряемым напряжением шины питания;

- основное питание РПТ от двух источников: через разъём J11 по-

даётся напряжение 5 В, и через стабилизатор Q3 78L05 можно подключать постоянное напряжение 9...20 В;

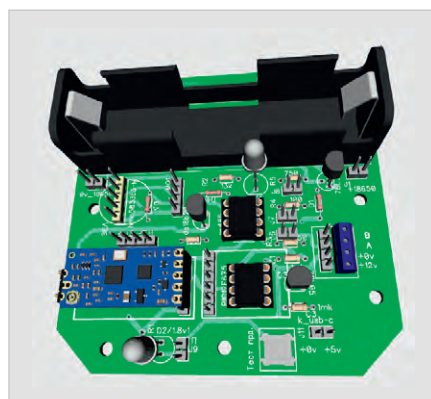


Рис. 10. 3D-модель печатной платы РПТ



Рис. 11. РПТ в монтажных коробках

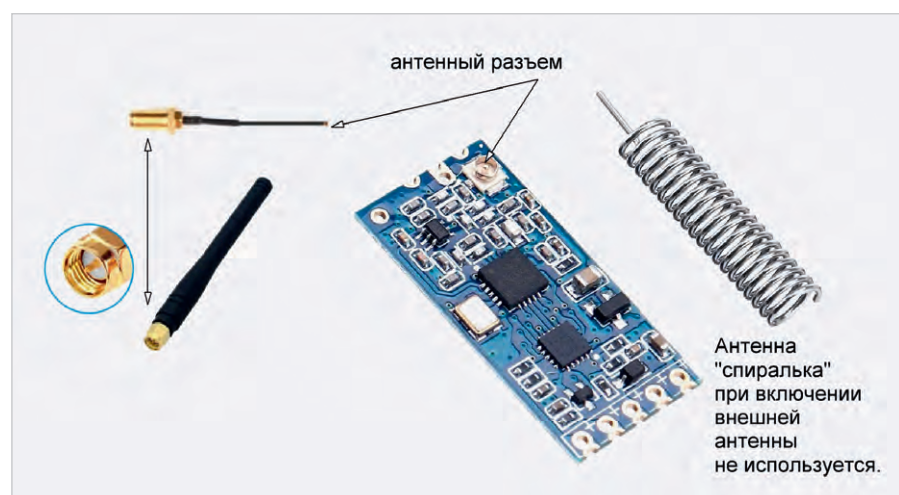


Рис. 12. Подключение внешней антенны HC12



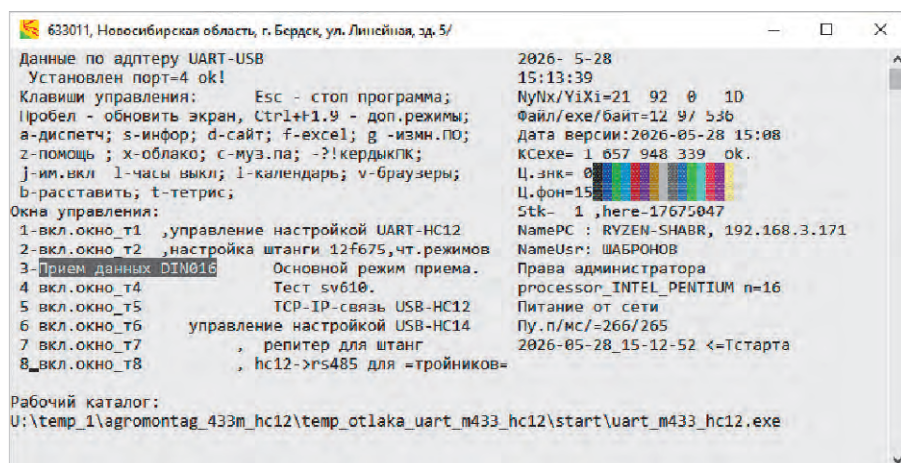


Рис. 13. Окно консоли для выбора варианта работы с РПТ и ТП

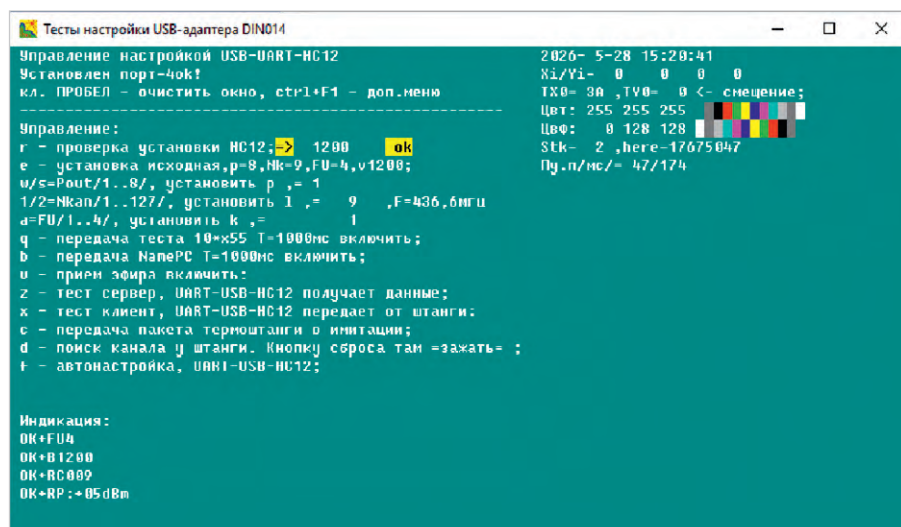


Рис. 14. Окно настройки HC12

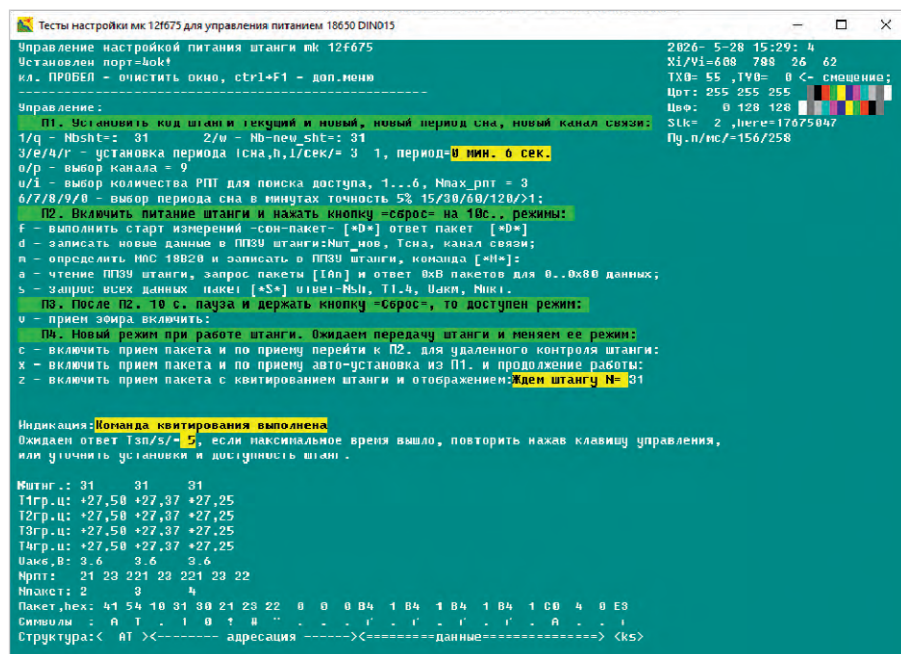


Рис. 15. Окно настройки ТП

● резервирование питания РПТ выполняется через аккумулятор 18650 [8], который включён через

диод D1 буфером в шину 5 В. При пропадании основного питания резервное питание через D1 поступа-

ет в шину 5 В без скачков напряжения, и МК не перезагружается. Однако меньшее значение напряжения питания фиксируется МК и передаётся телеметрией в компьютер сбора информации. После появления питания проводится подзарядка стабилизатором Q1 78L3.3 до уровня 3,3 В, что не создаёт аварийного режима заряда 18 650 мА·ч. Полный заряд 18 650 мА·ч предусмотрен отдельно от РПТ в специальном зарядном блоке;

- в РПТ также предусмотрен режим работы конечным устройством с переходом на интерфейс RS-485. Для этой функции используется микросхема U1 SR485. Сопряжение уровней внешней сети RS-485 выполняется через резисторы R3, R4, R5 и разъёмы-перемычки J6, J7, J8. Если РПТ является конечным устройством обмена интерфейса, то резисторы используются; если промежуточным, то резисторы не требуются;
- выводы GP0, GP5 МК U2 управляют обменом по интерфейсу RS-485, и выводы GP1, GP3, GP4 работают с модулем HC12. Тактовая частота МК задаётся внутренним RC-генератором и определена в 4 МГц.

МК устанавливается через переходную колодку для возможности перепрограммирования на другие условия эксплуатации.

Элементы схемы допускается заменить на любые отечественные или зарубежные аналоги.

Программное обеспечение на МК аналогично предложенному в авторской работе [3], где выполняется сбор данных 1-Wire с внешним питанием. В представленном РПТ предусматриваются различные режимы работы. Можно включать питание постоянно, и в случае работы только от аккумулятора возможен режим «сон-измерение».

Программа `uart_m433_hc12.exe` имеет открытый код, подготовлена на языке Forth [10], доступна для пользователей и находится в [9].

## Конструкция РПТ

Конструкция РПТ выполнена на печатной плате.

Модули подключаются через штыревые гнезда. Вид 3D-модели печатной платы представлен на рис. 10. Принципиальная схема (файл `sh_RPT.dch`), печатная плата (файл `sh_RPT.dip`) подготовлены в редакторе DIP-TRACE и

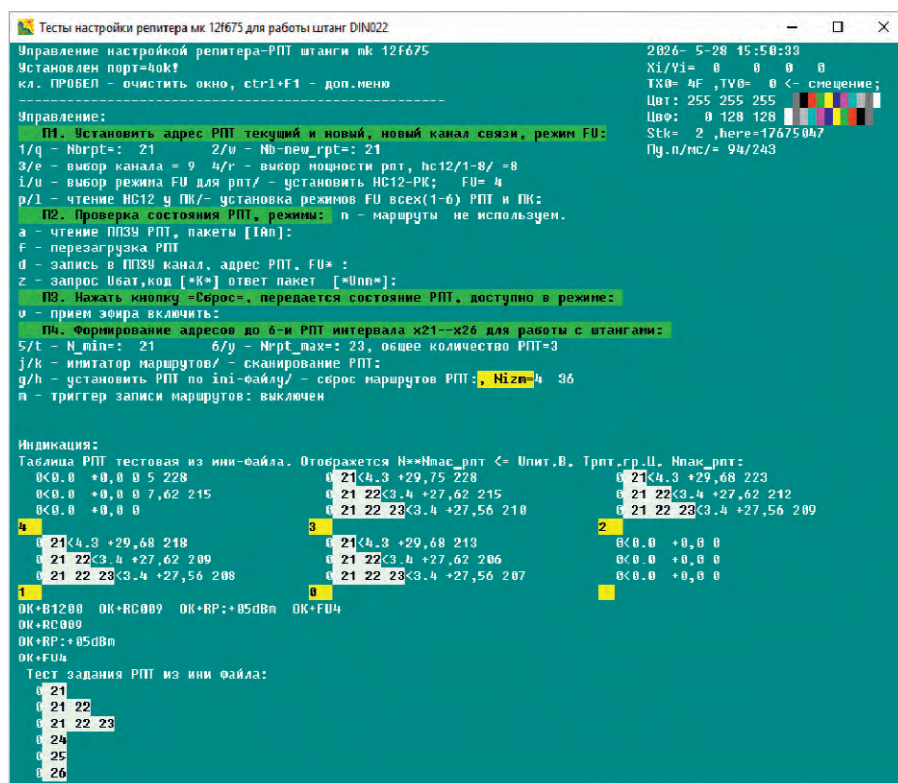


Рис. 16. Окно настройки РПТ

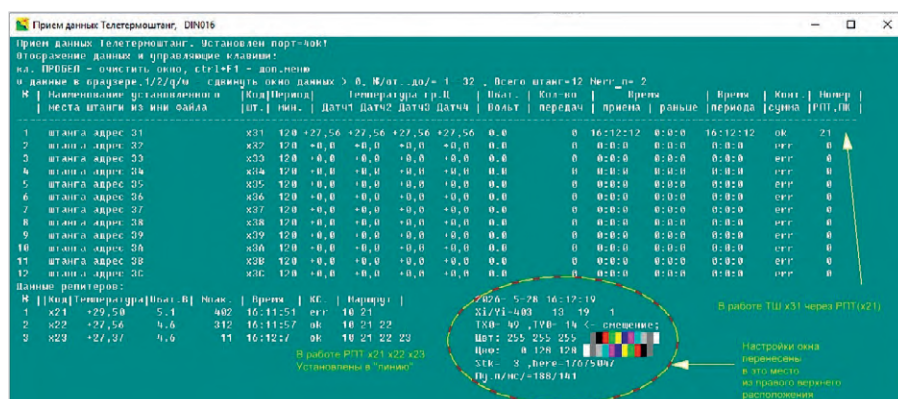


Рис. 17. Окно данных ТШ и РПТ

находятся в программе **uart\_m433\_hc12.exe** каталога [9].

Конструкция подготовлена для установки в монтажную коробку 100×100×60 мм с использованием антенны HC12 типа «спиралька».

На рис. 11 представлены пять РПТ, установленных в монтажных коробках с подключённым кабелем для питания от 5 В.

При повторении конструкции допускается использовать любые аналогичные материалы и элементы крепления. Необходимо обратить внимание на отсутствие влияния используемых материалов на цели устройства – приём и передачу по радиоканалу.

Для удобства крепления на металлических поверхностях с нижней стороны монтажной коробки установлены

два неодимовых магнита, как видно на пятом, показанном с обратной стороны, РПТ.

Возможно использование внешней антенны, которая подключается через малогабаритный ВЧ-разъём на HC12. Соединение кабеля с разъёмом и внешней антенной на 433 МГц представлено на рис. 12.

В программе для РПТ предусмотрен тест связи. Это позволяет выбрать тип антенны и место установки РПТ. Приблизительно «спиралька» обеспечивает устойчивую связь до 500 метров на открытом пространстве или через небольшие препятствия, такие как стена из кирпича или дерева.

Конструкция и схема РПТ предусматривают работу с ПК, предназначенным для сбора данных, т.е. с адресом

x10 при адресации маршрутов пакетной передачи. В этом случае модуль USB-UART устанавливается в разъём J10, и других элементов схемы не требуется. Необходимо предусмотреть прохождение полного соединительного кабеля USB через корпус монтажной коробки. Питание HC12 выполняет модуль USB-UART от ПК.

## Программное обеспечение

В данной реализации использовался язык Forth [10], который создавался для систем с минимумом памяти. Возможности данного языка позволили уложить в 8 Кбайт МК 12F675 сложную логику ретрансляции (счётчики, таймауты, обработка коллизий).

Все используемые тексты программ, схемы плат, пояснительные файлы форматов PDF, HTML, а также сам компилятор находятся в исполняемом файле **uart\_m433\_hc12.exe** каталога [9].

Первоначальный запуск программы вызовет стартовое меню, на котором необходимо выбрать требуемый режим работы и для этого нажать цифровые клавиши на выбор из четырёх: 1 – восстановить инициализацию, 2 – открыть файл помощи, 3 – восстановить всю информацию для дальнейшей модернизации, 4 – восстановить и скомпилировать новую программу, 5 – восстановить драйвера используемых USB-UART модулей. Цифра 6 – запуск демонстрационного режима для проверки графических возможностей терминала.

Запуск программы в каталоге с наличием файла инициализации выполняется по опциям данного файла. Это текстовый файл, который доступен для редактирования. Программа подготовлена для работы ТШ на конкретном объекте – элеваторе. Предусмотрены настройка и программирование микросхем ТШ и РПТ. Первично начинает работать окно консоли (рис. 13), и далее выбираются окна и режимы работы для ТШ и РПТ.

Все окна программы и консоли имеют возможность установок цвета фона и знаков. В «старых» компьютерах графический знакогенератор может быть установлен пользователем в панели управления через настройку системы. Обычно используется набор кодов ASCII для русскоязычной реализации WINDOWS и кодовые страницы 1251 или 866. Если отображаются «кракозябры», то необходимо в настройках язы-



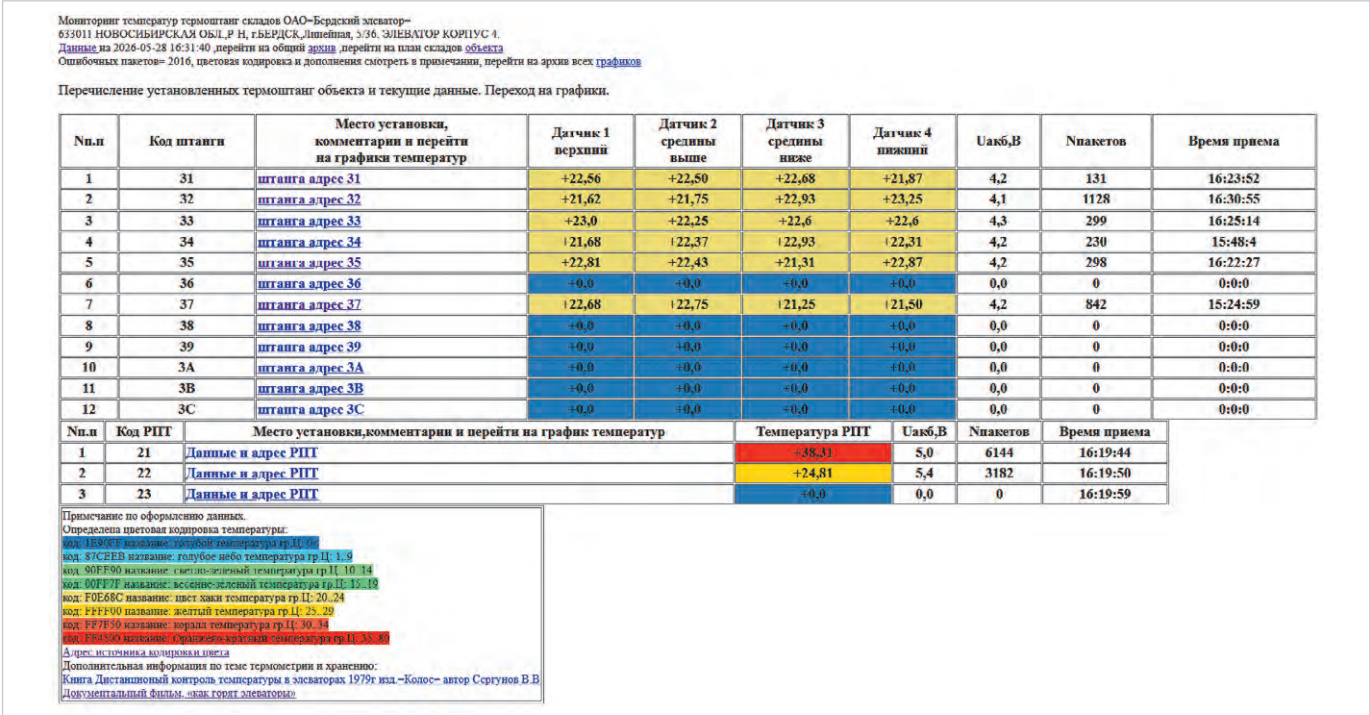


Рис. 18. Окно данных ТШ и РПТ через браузер

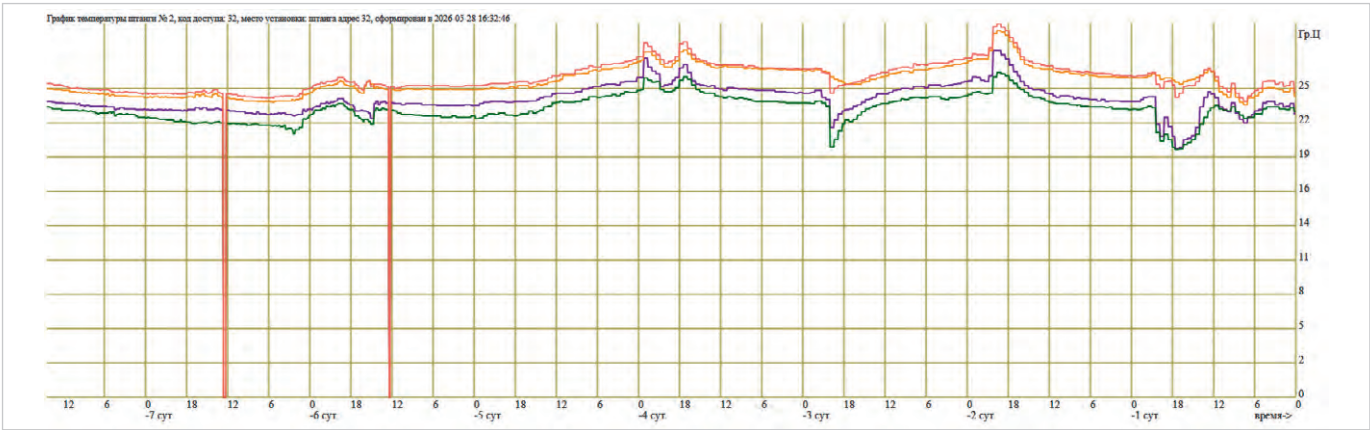


Рис. 19. Окно данных графиков ТШ через браузер

ка системы поменять кодовую страницу при запуске данной программы. В современных компьютерах при использовании системой двухбайтной кодировки UTF-8 с кодовой страницей 65001 отображение устанавливается автоматически.

Программа работает только через DLL API библиотеки WINDOWS KERNEL32.DLL и поэтому совместима со всеми 32- и 64-разрядными версиями этой операционной системы.

Далее приведём последовательность включения режимов.

При нажатии в консоли цифровой клавиши «1» откроется окно настройки USB-UART-NC12 для работы с NC12, как показано на рис. 14. Требуется нажать клавишу «е» для записи режима NC12. Для проверки установленного режима нажать клавишу «г». Дру-

гие режимы этого окна выполняют различные тестовые и контрольные проверки других разработок автора с использованием модуля NC12.

При нажатии в консоли цифровой клавиши «2» открывается окно настроек ТШ, как показано на рис. 15.

В окне настройки ТШ предусмотрены установки для работы системы удалённого термоконтроля:

- определяется и устанавливается канал связи, номер ТШ, период сна, количество доступных РПТ;
- проводится проверка микросхем цифровых датчиков температур DS18B20, запись MAC-адресов в ПЗУ МК ТШ.

Работоспособность настроенных ТШ проверяется по клавишам «с» «х» «z». Например, на рис. 15 приведён вариант квитирования по «z», т.е. ТШ с номером x31 передала через РПТ x21

x22 x23 пакет с данными температур и напряжением аккумулятора. Крайний принятый пакет по счёту равен 4, и интервал сна установлен в 6 секунд.

Таким образом, ТШ работает, и её можно перевести в режим большого интервала сна, выбрав соответствующие настройки.

При нажатии в консоли цифровой клавиши «7» откроется окно настройки РПТ, как показано на рис. 16. Клавиши управления в окне предназначены для проверки РПТ и их конфигурирования.

На рис. 16 приведён вариант записи данных для трёх из шести возможных РПТ из конфигурационного файла. В процессе записи выполняется чтение напряжения питания и чтение данных температурного датчика DS18B20. Эти данные отображаются для каждого РПТ и подтверждаются включением белого



Рис. 20. Размещение ТШ на объекте при измерении и на выставке «Сибирское поле»

фона адреса РПТ. Если РПТ недоступно, то индикация белым фоном соответствующей строки отсутствует.

На рис. 17 приведено отображение окна «З», где показаны все доступные ТШ и РПТ.

Для чтения данных ТШ и их анализа предусмотрен веб-интерфейс, который также написан на языке Forth. Формируются HTML-файлы, которые располагаются в месте работы программы в папке **www\_shtanga\_v1**. Формирование файлов выполняется с периодом опции **PKZ\_GRAF=** из ини-файла, который по умолчанию установлен в 300 с.

Предусмотрены графическое отображение развёртки температур за 7 суток и цветовые маркеры предупреждения температур. Вариант отображения объекта через браузер приведён на рис. 18. На рис. 19 представлен график температур ТШ за период 7 суток.

Текст HTML-формирования на языке Forth находится в файле **grafik\_HTML\_din019.f** и доступен для изучения и повторения. В тексте программы приведены подробные комментарии по формированию слов и алгоритму. Особенность формирователя – это работа в отдельном потоке. Передача данных от программы сбора выполняется через массив выделенной памяти.

Передачу данных для отображения браузером выполняет сервер Apache версии 2.4 [11]. Настройка сервера заключается в указании каталога работы программы и в ней папки **www\_shtanga\_v1**. Выполняются обычные условия системы локальной связи по настройке TCP/IP портов.

Для доступа через Интернет системный администратор разрешает входящее TCP/IP соединение на выбранный порт компьютера сбора данных. Таким образом обеспечивается доступ к дан-

ным сбора в локальной сети. Доступ из внешней сети может быть ограничен системным администратором для определённых пользователей. Порт занят только для чтения запросов и передачи данных термометрии.

Особенность формирования данных для браузера заключается в том, что нет команды записи данных, а есть только чтение. Следовательно, любой пользователь может только читать данные, а запись невозможна. Это обеспечивает необходимую защиту от возможных вирусов и злоумышленников.

В каталоге **Forth\_assmb\_pik12** находятся файлы программы работы микроконтроллера, написанные на языке Forth-ассемблера. При компиляции общей программы они также компилируются и формируют в каталоге **shtanga\_hc12\_12f675\_v1** файлы HEX-кодов для записи в МК. Файлы для МК имеют расширение **.hex** и записываются в МК любым доступным программатором.

Работа с МК построена на структуре AT-команд. Команды AT для ТШ и РПТ подробно приведены в файле **shtanga\_hc12\_12f675\_v1.f** и **rpt\_hc12\_12f675\_v1.f**: доступно программирование и на других языках при обращении к МК. Скорость обращения к МК выбрана в 1200 Кбод в стандарте 8N1.

На рис. 20 приведён внешний вид ТШ в эксплуатации и демонстрация ТШ на с/х выставке «Алтайское поле» в 2025 году.

Схема и принцип работы ТШ приведены в [3], однако для работы с РПТ программное обеспечение доработано и также находится вместе с программой на РПТ в файле **uart\_m433\_hc12.exe** каталога [9].

Подробности измерения температур хранения зерна при использовании ТШ выходят за рамки данного изло-

жения, но доступны для самостоятельного исследования.

## Заключение

В предлагаемой схеме пакетной связи решена задача обеспечения доступности радиоканала в местах экранирования или сильного ослабления радиосигнала. Большим плюсом является то, что в предлагаемой системе пакетной связи данные могут передаваться, «обходя» РПТ и с автоматическим подключением к доступному РПТ.

Перемещение по объекту ТШ – это необходимое требование для измерений, а автоматическое подключение это обеспечивает.

Предусмотренные в конструкции РПТ датчики температуры и газа позволяют создавать удалённые регистраторы и системы предупреждения об опасности.

Возможность получения данных через веб-браузер позволяет использовать обычные сотовые телефоны для анализа и контроля термометрии.

## Литература

1. Радиомодули HC12. URL: <https://3d-diy.ru/wiki/arduino-moduli/radiomodul-hc-12/>.
2. Протокол AX25. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/AX.25>.
3. Аккумулятор 18650 для радиоканала и интерфейса 1-Wire // Современная электроника. 2024. № 6. С. 46. URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2024/2024-6/180271/>.
4. Антенна АШ-433. URL: <https://alpatech.ru/sistemy-ops/gsm-monitoring/altonika-gsm/antenny/ash-433-antenna-shtyrevaya-altonika/>.
5. Описание 12F675. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/710/DOC011710931.pdf>.
6. Датчики газов серии MQ. URL: <https://www.chipdip.ru/product/datchik-gaza-mq-2-shirokogo-spektra-gazov-trema-modul-9001322155?ysclid=mpovoeoue7558853924>.
7. Датчики DS18B20. URL: <https://radioparty.ru/programming/avr/c/377-lesson-ds18b20>.
8. Данные на аккумулятор 18650: URL: <https://static.chipdip.ru/lib/333/DOC005333343.pdf>.
9. Каталог программы, схемы и платы. URL: [http://90.189.213.191:4422/temp/agromontag\\_433m\\_hc12/test/](http://90.189.213.191:4422/temp/agromontag_433m_hc12/test/).
10. Описание языка Форт spf4.exe, автор версии А. Черезов. URL: <http://www.Forth.org.ru/>.
11. Сервер Apache2-4. URL: <https://httpd.apache.org/docs/2.4/>.





# Базовый модуль для охранного устройства с применением микроконтроллера AVR и двухстрочного индикатора

Сергей Шишкин

В статье представлен базовый модуль для охранного устройства, выполненного на базе восьмиразрядного микроконтроллера AVR и жидкокристаллического двухстрочного индикатора фирмы Data Vision. Автор приводит развёрнутый алгоритм работы модуля и его схемотехнику.



Дополнительные материалы к этой статье можно скачать, перейдя по ссылке в QR-коде

Любая охранная сигнализация имеет стандартное, типовое построение [1]. В её состав могут входить следующие основные составные части:

- датчики (охранные извещатели) различного типа – акустические, магнитоконтактные, вибрационные и т.д.;
- базовый модуль (плата контроллера) или приёмно-контрольный прибор (ПКП);
- исполнительные устройства, к которым относятся средства оповещения и передачи тревожных сообщений;

- пульт или панель управления, оснащённые дисплеем, кнопками/клавишами и т.д.;
- соединительные кабели и жгуты (для проводных систем);
- модуль питания (устройство бесперебойного питания).

Структурная схема охранной сигнализации, где может быть задействован представляемый базовый модуль (далее модуль или устройство), приведена на рис. 1.

Основные составные части устройства: A1...A4 – нагрузки (исполнительные устройства); базовый модуль (плата контроллера) A2; выносные датчики (охранные извещатели) BQ1...BQ3; модуль питания U1. В плате контроллера A2 предусмотрены три независимые линии контроля для подключения охранных извещателей. Охранные извещатели (датчики охраны) к плате контроллера A2 по каждой независимой линии можно подключать

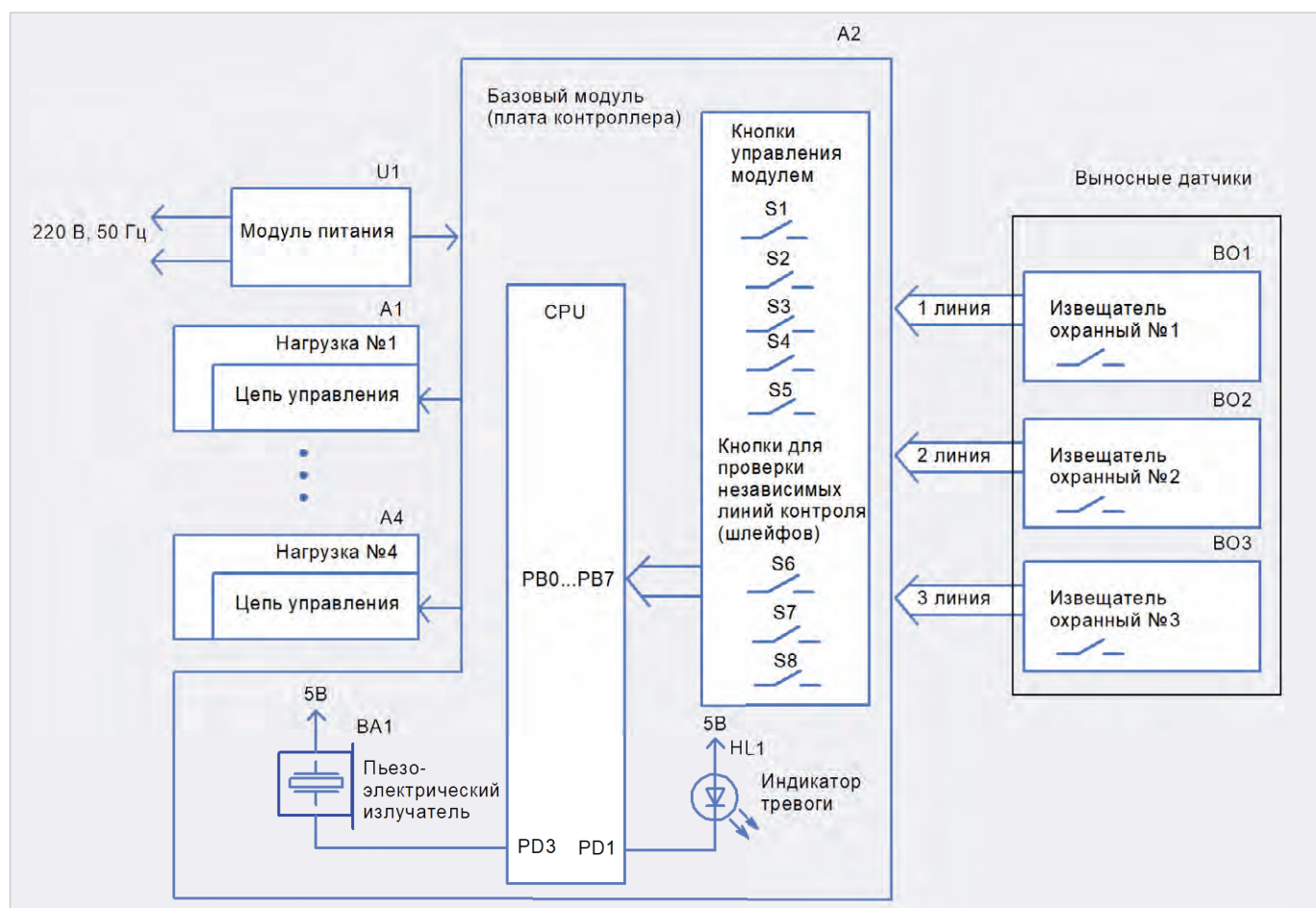


Рис. 1. Структурная схема охранной сигнализации

в шлейф. Например, это могут быть точечные магнитоконтактные извещатели типа ИО 102-26 исполнения 4. Внешний вид охранного извещателя ИО-102-26 (далее датчик ИО102-26) исполнения 4 с переключающимся герконом представлен на рис. 2.

У датчика ИО102-26 исполнения 4-й тип геркона – переключающий-



Рис. 2. Внешний вид охранного извещателя ИО-102-26

ся. Датчики ИО 102-26 исполнения 4 предназначены для блокировки дверных и оконных проёмов, организации устройств типа «ловушка», а также блокировки других конструктивных элементов зданий и сооружений на открывание или смещение с выдачей сигнала «Тревога». Извещатель любого исполнения данного типа конструктивно состоит из датчика магнитоуправляемого (датчика) на основе геркона и задающего элемента (магнита), выполненных в корпусах из пластика. Крепёжные отверстия извещателя сверху закрыты накладной декоративной крышечкой. Более подробное описание датчика ИО102-26 приведено в [2].

В качестве нагрузок (исполнительных устройств) в охранной сигнализации могут быть задействованы: лампочки, световые полосы, стробоскоп и пр. или звуковая сигнализация (ревун,

сирена и пр.), а также цепи управления устройств более высокого уровня в системе охранной сигнализации. Внутренние кнопки платы контроллера S6...S8 – кнопки для проверки работоспособности линий контроля, к которым подключаются выносные датчики охраны BQ1...BQ3. Основные технические характеристики модуля приведены в таблице.

Принципиальная схема модуля представлена на рис. 3.

Интерфейс управления модуля (информация на индикаторе HG1) после инициализации приведён на рис. 4.

Рассмотрим принципиальную схему устройства. Его основные элементы: микроконтроллер AVR типа ATTINY2313-20PU DD3 и двухстрочный знакосинтезирующий жидкокристаллический индикатор типа DV-16232 FBLY-H/R HG1. Рабочая частота

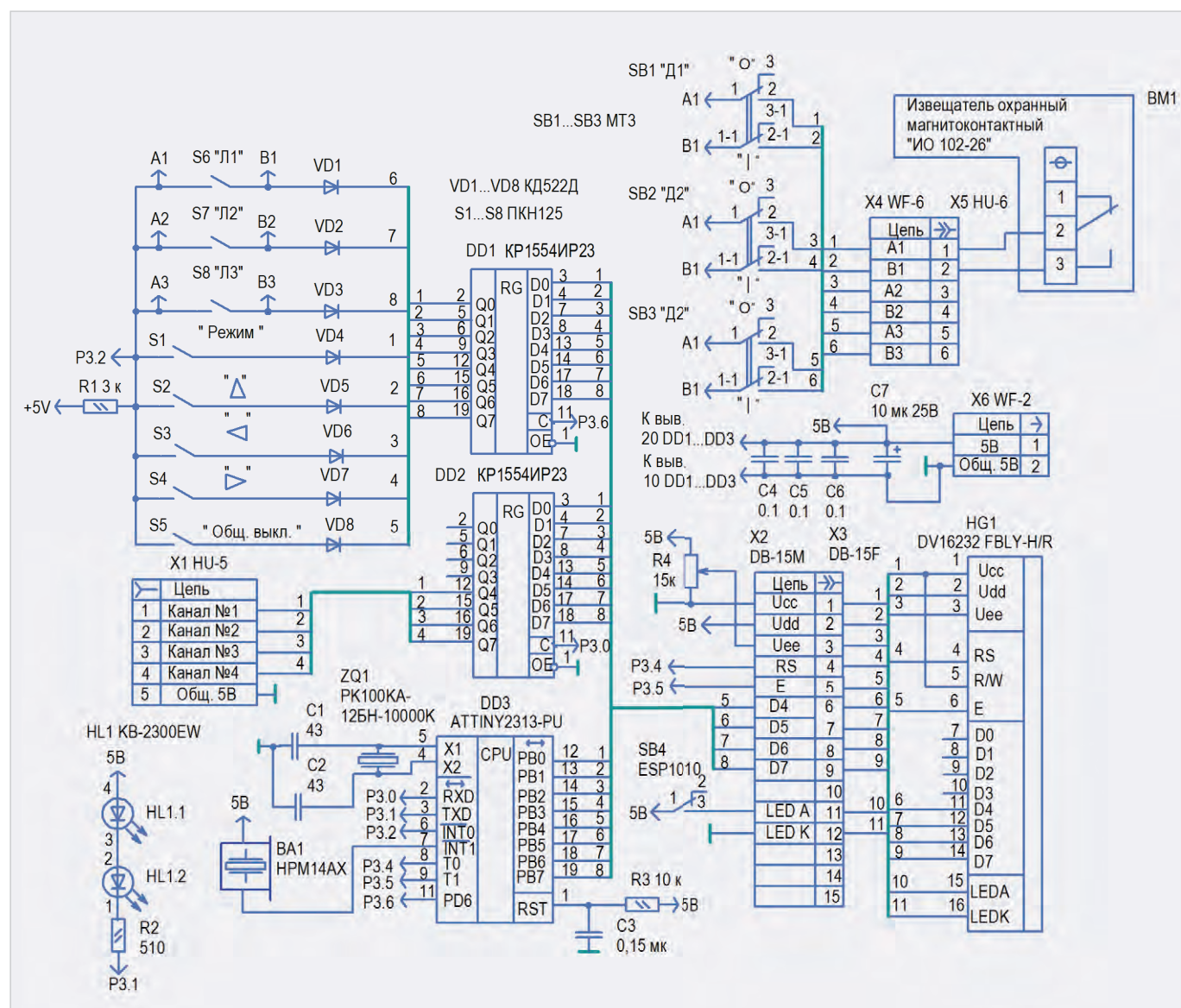


Рис. 3. Принципиальная схема модуля



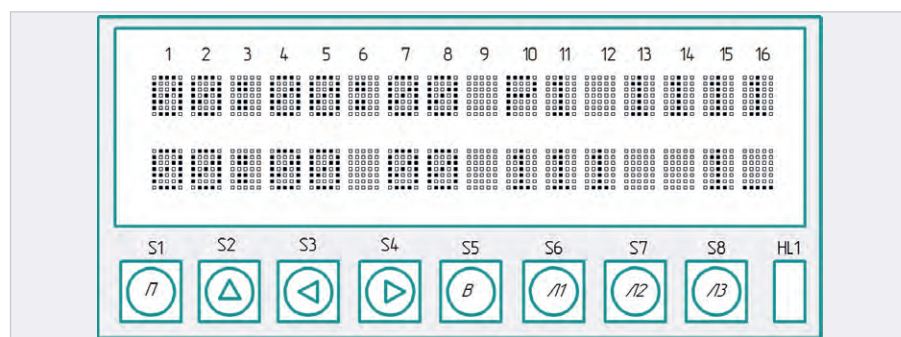


Рис. 4. Интерфейс управления модуля после инициализации

та микроконтроллера DD3 задаётся генератором с внешним резонатором ZQ1 на 10 МГц. Пьезоэлектрический излучатель BA1 включается с вывода 7 микроконтроллера DD3. Сигнал с выхода 3 микроконтроллера DD3 через резистор R2 управляет световой полосой HL1. С порта PB микроконтроллер DD3 управляет ЖК-индикатором HG1 и клавиатурой (кнопки S1...S8) через резистор DD1. Для функционирования клавиатуры также задействован вывод 6 микроконтроллера DD3. Сигнал с любой нажатой кнопки S1...S8 поступает на вывод 6 микроконтроллера DD3.

Резистор R2 – токоограничительный, для световой полосы HL1. Состояние выходных сигналов блока определяет регистр DD2. Питательное напряжение 5 В поступает на блок с соединителя X6. Конденсаторы C4...C7 фильтруют пульсации в цепи питания 5 В. Сразу после подачи питания на блок на выводе 1 микроконтроллера DD3 через RC-цепь (резистор R3, конденсатор C3) формируется сигнал его аппаратного сброса. Далее идёт инициализация программы, в которой настраивается индикатор HG1. При этом происходит очистка его буфера, разрешается отображение курсора. В регистр DD2 записываются сигналы уровня лог. 1

Таблица. Основные технические характеристики модуля для охранного устройства

| № | Наименование параметра                                                | Значение                                             |
|---|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| 1 | Число независимых каналов управления                                  | 4                                                    |
| 2 | Число независимых линий контроля для подключения охранных извещателей | 3                                                    |
| 3 | Напряжение питания                                                    | 5 В                                                  |
| 4 | Режим работы                                                          | Круглосуточный                                       |
| 5 | Тип выходных сигналов управления                                      | ТТЛ<br>лог. 1 (2,4...2,7) В<br>лог. 0 (0,36...0,5) В |
| 6 | Количество режимов в алгоритме работы модуля                          | 4                                                    |

(нагрузки выкл.). Тумблеры SB1...SB3 подключают модуль к линиям контроля охранных извещателей. На рис. 3 приведено подключение только одного охранного излучателя BM1 в линии контроля № 1 (или шлейф № 1). В модуле предусмотрены следующие режимы работы. Режим № 1 – режим конфигурирования. Режим № 2 – режим ожидания. Режим № 3 – режим охраны. Режим № 4 – режим тревоги.

Выполняемые функции:

- счёт реального времени, индикация текущего времени в 24-часовом формате в режиме часы/минуты/секунды;
- установка текущего времени и его корректировка;
- установка и отображение времени для перехода устройства в режим № 3;
- установка интервала перехода из режима № 3 в режим № 4;
- управление 4 нагрузками по 4 независимым каналам (каналы № 1...№ 4).

В интерфейс управления модуля (по рис. 4) входит клавиатура (кнопки S1...S8), световая полоса HL1 и ЖК-индикатор HG1. В каждой строке ЖК-индикатора HG1 отображается 16 символов (знакомест). Разряды дисплея индикатора HG1 имеют следующее назначение (слева направо по рис. 4). Номера разрядов на рис. 4 сверху условно отмечены цифрами с 1 по 16, которые не отображаются в ЖК-индикаторе.

Первая строка:

- 1 разряд отображает «десятки часов» текущего времени;
- 2 разряд отображает «единицы часов» текущего времени;
- 3 и 6 разряды отображают символ «:» с периодом включения 1 с в режимах № 2, № 3, № 4, в режиме № 1 символ «:» включён постоянно;
- 4 разряд отображает «десятки минут» текущего времени;

- 5 разряд отображает «единицы минут» текущего времени;
- 7 разряд отображает «десятки секунд» текущего времени;
- 8 разряд отображает «единицы секунд» текущего времени;
- 9 разряд отображает пробел (Space);
- 10, 11 разряды отображают текущий режим работы устройства – отображается «P1», или «P2», или «P3», или «P4»;

- 12 разряд отображает пробел (Space);

- 13...16 разряды отображают состояние нагрузок в каналах № 1...№ 4 (1 – включено, 0 – включено).

Вторая строка:

- 1...5 разряды отображают в часах/минутах (через символ «:») время постановки модуля под охрану (режим № 3);
- 6 разряд отображает пробел (Space);
- 7, 8 разряды отображают заданный интервал времени (в секундах), по истечении которого (при обратном отсчёте) модуль перейдёт из режима № 3 в режим № 4;
- 9 разряд отображает пробел (Space);
- 10...12 разряды отображают состояние линий контроля извещателей охраны (1 – режим ожидания, 0 – сработал охранный извещатель);
- 13, 14 разряды отображают пробел (Space);
- 15 разряд отображает состояние флага RAZ, разрешающего включение нагрузок в режиме № 4;
- 16 разряд отображает курсор (сразу после подачи напряжения питания). Управление модуля осуществляется с помощью клавиатуры, кнопки которой (по схеме S1...S8) имеют следующее назначение:

- S1 (П) – пуск. Запуск устройства после установки всех необходимых параметров. После нажатия на данную кнопку модуль переходит в режим № 2. Идёт отсчёт текущего времени;
- S2 (▲) – увеличение на единицу (инкремент) в индикаторе HG1 выбранного разряда. Разряд выбирается перемещением курсора. В разрядах отображения состояния нагрузок при нажатии данной кнопки происходит инвертирование состояния (было «1», стало «0», и наоборот);
- S3 (◀) – выбор разряда при установке значений. У выбранного разряда устанавливается курсор, при каждом нажатии на данную кнопку курсор сдвигается справа налево на один разряд во второй строке

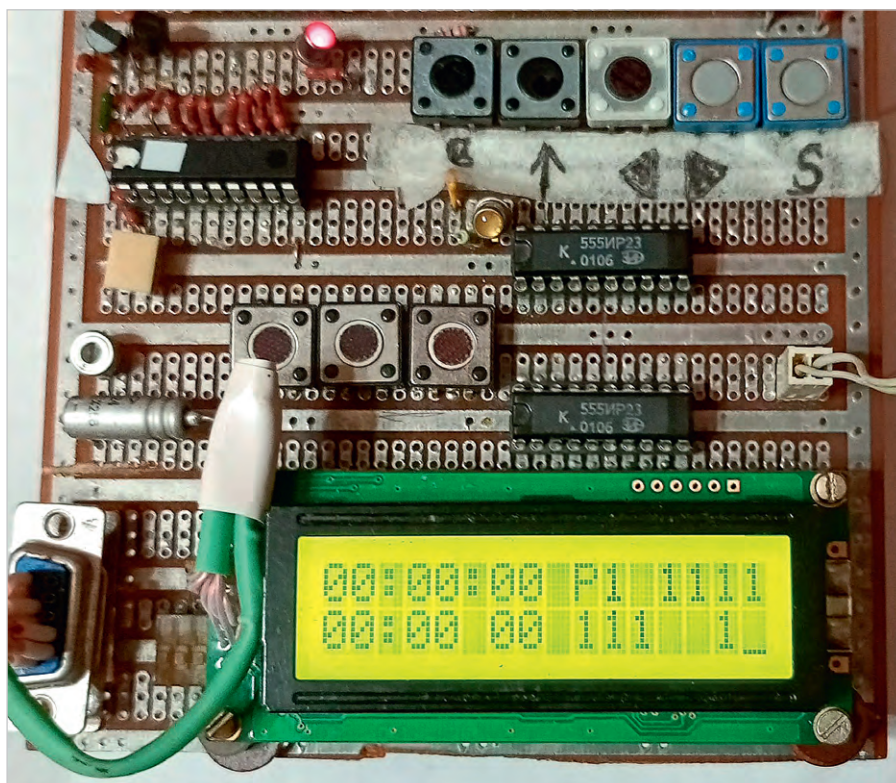


Рис. 5. Фотография макета базового блока

индикатора HG1 и слева направо на один разряд в первой строке индикатора HG1;

- S4 (▶) – выбор разряда при установке значений. У выбранного разряда устанавливается курсор, при каждом нажатии на данную кнопку курсор сдвигается слева направо на один разряд во второй строке индикатора HG1 и справа налево на один разряд в первой строке индикатора HG1;
- S5 (B) – выключение всех нагрузок, подключённых к модулю (установка выходных сигналов уровня лог. 1 во всех каналах), а также выключение световой и звуковой сигнализаций;
- S6 (Л1) – кнопка проверки линии контроля № 1 подключения охранных извещателей;
- S7 (Л2) – кнопка проверки линии контроля № 2 подключения охранных извещателей;
- S8 (Л3) – кнопка проверки линии контроля № 3 подключения.

Рассмотрим подробно каждый из режимов работ модуля.

Режим № 1. В данный режим устройство переходит сразу после подачи питающего напряжения. Информация, отображаемая на индикаторе HG1 в режиме № 1, приведена на рис. 4. Отсчёт текущего времени запрещён. При этом можно установить:

- а) текущее время в формате часы/минуты/секунды;
- б) время перехода в режим № 3 в формате часы/минуты;
- в) интервал перехода из режима № 3 в режим № 4 в формате десятки секунд / единицы секунд;
- г) состояние нагрузок в данном режиме. Выходные управляющие сигналы каналов № 1...№ 4 – это соответственно выходы 12, 15, 16, 19 регистра DD2. При инициализации в них загружается лог. 1. Далее в данном режиме пользователь сам устанавливает нужную конфигурацию.

Эти сигналы могут быть задействованы для подачи в цепи управления различных исполнительных устройств, которые будут подключены к модулю и должны будут включиться в режиме № 4 (режим «тревога»). Также в данном режиме можно проверить работоспособность линий контроля № 1, № 2, № 3 охранных извещателей соответственно с помощью кнопок «Л1», «Л2» «Л3». Перед переходом в следующий режим данными кнопками необходимо установить лог. 1 соответственно в разрядах 10, 11, 12 второй строки индикатора HG1.

Режим № 2. В данный режим из режима № 1 модуль переходит после нажатия кнопки S1 (Пуск).

Разрешается отсчёт текущего времени. Текущее время сравнивается с заданным временем перехода в режим № 3. Как только вышеуказанные времена станут одинаковыми, модуль автоматически переходит в режим № 3.

Режим № 3. В данном режиме модуль «ждёт» срабатывания хотя бы одного извещателя охраны в любой линии контроля. После срабатывания извещателя начинается обратный отсчёт временного интервала, отображаемого на 7 и 8 разряде второй строки индикатора HG1. Когда он примет нулевое значение, модуль автоматически переходит в режим № 4.

Режим № 4. В данном режиме включаются световая (световая полоса HL1) и звуковая (пьезоэлектрический излучатель BA1) сигнализации с частотой повторения 2 Гц, и в регистр DD2 загружается байт управления нагрузками, который задан в режиме № 1. Выходные сигналы регистра DD2 поступают на соединитель X1.

Для перехода из режимов № 1...№ 4 в режим № 1 необходимо нажать кнопку S5 (B). На рис. 5 приведена фотография макета базового блока.

На вышеуказанном рисунке модуль находится в режиме № 1. На рис. 6 приведена фотография индикатора HG1 модуля в режиме № 2.

На рис. 6 отображаются следующая информация и временные параметры модуля:

- текущее время – 8 часов, 45 минут 20 секунд;
- время перехода в режим № 3 – 22 часа 30 минут;
- время перехода из режима № 3 в режим № 4 – 36 секунд;
- в режиме № 4 в каналах № 1 и № 3 будут установлены лог. 0.

В модуле применены резисторы C2-33H-0.125, подойдут любые другие с такой же мощностью рассеивания и погрешностью 5%. Резистор R4 типа СП5-2ВА. Конденсаторы C7 типа K50-35. Остальные конденсаторы типа K10-17. В модуле нет никаких настроек и регу-



Рис. 6. Фотография индикатора модуля HG1 в режиме № 2



лировок, кроме регулировки контрастности индикатора HG1 переменным резистором R4. Движком переменного резистора R4 выставляется приемлемый контраст изображения индикатора HG1.

Разработанная программа на ассемблере в среде Atmel Studio 7.0 занимает порядка 1,546 Кбайт памяти программ микроконтроллера и состоит из трёх основных частей: инициализации, основной программы, работающей в замкнутом цикле, и подпрограммы обработки прерывания от таймера

T/C1 (соответственно метки INIT, SE1, TIM0). В основной программе выполняется счёт текущего времени, работа в режимах № 1...№ 4, инкремент параметров в выбранных разрядах индикатора HG1. В подпрограмме обработки прерывания выполняется вывод информации на двухстрочный индикатор HG1, опрос клавиатуры (кнопки S1...S8). При инициализации задаётся необходимая конфигурация параметров микроконтроллера DD3 и двухстрочного индикатора HG1.

В памяти данных микроконтроллера DD3 с адреса \$2 по \$13 организован буфер отображения для вывода информации на индикатор HG1. Адресное пространство памяти данных контроллера разбито на следующие функциональные группы.

- \$2...\$7 – адреса, где хранится текущее время в минутах и секундах (регистры R2...R7). Эти адреса выводятся на индикатор во всех режимах работы модуля.
- \$8...\$11 – адреса, где хранится в часах и в минутах (регистры R8...R11) время перехода модуля из режима № 2 в режим № 3.
- \$12, \$13 – адреса, где хранится в секундах (регистры R12, R13) интервал времени, по истечении которого модуль переходит из режима № 3 в режим № 4.

По адресу \$75 находится байт управления нагрузками. Для программирования подключаемых нагрузок в режиме № 1 необходимо подвести курсор к нужному разряду и кнопкой S2 изменить его значение. Каждое нажатие кнопки S2 в данном случае инвертирует предыдущее состояние разряда, было «0» – будет «1», и наоборот. В режиме № 4 байт управления нагрузками, сконфигурированный в режиме № 1, будет выведен через регистр DD2 на выходной разъём X1.

В предлагаемом устройстве получилось максимально, насколько это возможно для данного случая, задействовать аппаратные и программные ресурсы микроконтроллера AVR, а также выполнить основные требования, которые предъявляются к подобным устройствам при эксплуатации:

- простой и удобный пользовательский интерфейс;
- ремонтпригодность. Модуль (плату контроллера) при необходимости можно оперативно заменить.

Файл с текстом программы для микроконтроллера DD1, а также файл HEX приведены на сайте редакции. В тексте программы приведены подробные комментарии и назначение всех задействованных флагов в регистрах R19, R20, R28.

## Литература

1. ГОСТ 31817.1.1-2012. Системы тревожной сигнализации.
2. Руководство по эксплуатации. Извещатель охранный точечный магнитоконтактный. ИО 102 – «ЛЮКС» ПАШК.425119.080.



## ВАШ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОПУТЧИК!

### Полосковые дисплеи для транспорта

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

**ProCHIP**  
POWERED BY ProSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

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



Реклама

# Гибридный подход к мониторингу территорий

Григорий Косарев, Екатерина Михайлова

В статье рассматривается применение технологий искусственного интеллекта для мониторинга территорий. Мультимодальные нейронные сети обработки и интерпретации разнородных данных, экспертные системы, обладающие формализованными знаниями и логическими правилами, и прецедентный подход, обеспечивающий гибкость системы искусственного интеллекта при принятии решений. Совмещение этих технологий позволит повысить адекватность и объяснимость принимаемых решений, предложенных нейронными сетями, в процессе мониторинга территорий. Цель исследования: изучить различные технологии искусственного интеллекта и их гибридизацию для решения задач мониторинга территорий.

## Введение

Под мониторингом территорий понимается решение технических задач систематического наблюдения, оценки и прогнозирования состояния определённого пространства с целью контроля изменений, выявления проблем и принятия соответствующих решений по их устранению. Для решения задач наблюдения широко применяются аэрокосмические средства, в том числе беспилотные летательные аппараты (БЛА). Последние, в свою очередь, способны обеспечить эффективный поиск причин внештатных ситуаций ввиду своей высокой мобильности. Для обработки кадров, полученных с оптико-электронных систем, используются нейронные сети (НС), обученные выделять аномалии на изображении. Информация об обнаруженных аномалиях обрабатывается людьми, которые принимают соответствующие решения на основе полученных данных. Идея авторов данной статьи состоит в том, чтобы рассмотреть различные технологии искусственного интеллекта и их гибридиза-

цию для решения задач мониторинга территории.

## Обзор мультимодальных нейронных сетей

Машинное обучение (МО) как одна из технологий ИИ в настоящее время используется в различных областях: медицинская диагностика, автономные системы управления, финансовая аналитика и информационная безопасность. В зависимости от специфики решаемых задач, таких как сегментация изображений, машинный перевод, распознавание речи и т.д., для их решения используются различные архитектуры нейронных сетей, включая, помимо прочего, свёрточные нейронные сети (CNN) для задач, связанных с пространственными данными, рекуррентные нейронные сети (RNN) и их варианты (LSTM, GRU) для обработки последовательностей и сети-трансформеры для задач, требующих внимания к контексту.

Типовые задачи и архитектуры, применяемые для их решения, приведены в табл. 1.

Большинство представленных архитектур демонстрируют высокую эффективность, но их возможности ограничены выполнением одной конкретной практической задачи или работой с одним видом данных (текст, изображения, аудио или видео). Однако при решении нетривиальных практических задач, в которых требуется параллельный анализ разнородной информации, используется комбинация различных архитектур. Такой подход к формированию систем машинного обучения получил название «мультимодальный» [1, 2]. Мультимодальными системами машинного обучения называются вычислительные модели, которые объединяют несколько архитектур нейронных сетей для решения разнотипных задач.

Мультимодальные нейронные сети (МНС) обычно состоят из взаимосвязанных слоёв, которые представляют разные архитектуры нейронных сетей, такие как свёрточные и рекуррентные нейронные сети. МНС могут параллельно обрабатывать несколько типов данных и эффективно решать различные задачи, например, распознавание изображений, обработки естественного языка и прогнозирования временных рядов.

Анализ показал, что выделяются три предметные области, в которых уже сейчас используются МНС.

В работе [3] решается задача точного прогнозирования траекторий пешеходов в динамичной среде. Были проанализированы несколько архитектур, сочетающих разные типы нейронных сетей – свёрточную нейронную сеть (CNN), используемую

Таблица 1. Типовые задачи и архитектуры, применяемые для их решения

| Типовые задачи                                                         | Архитектуры нейронных сетей                                   |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Классификация изображений                                              | ResNet152, WideRes-Net101, EfficientNet, MobileNetV2, AlexNet |
| Семантическая сегментация                                              | Unet, MobilenetV2, DeepLabV3+                                 |
| Обнаружение объектов / обнаружение по многоспектральным данным         | ShuffleNetV2, YOLOv4                                          |
| Ориентированное обнаружение                                            | BBAVectors                                                    |
| Дешифрование                                                           | Faster R-CNN                                                  |
| Слежение за одним объектом                                             | SiamMask                                                      |
| Слежение за несколькими объектами                                      | ByteTrack                                                     |
| Обработка изображений (устранение смаза, расфокусировки, шумов, помех) | DnCNN, Pixel, PatchGAN                                        |
| Синтез изображений                                                     | ProGAN, StyleGAN                                              |
| Обработка одномерных и многомерных сигналов                            | SampleCNN, EnvNet, Wave-U-Net, архитектуры на базе LSTM и GRU |



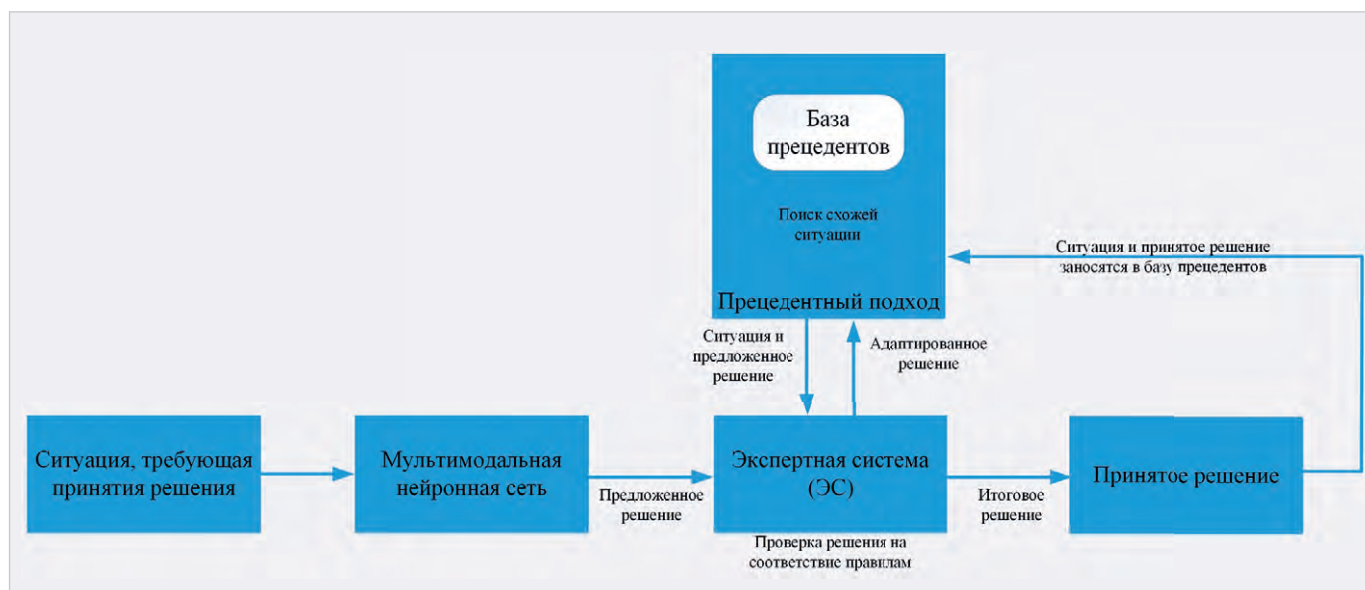


Рис. 1. Схема предлагаемого подхода

для обработки пространственных данных, сеть внимания на графах (GAT) и рекуррентную нейронную сеть с механизмом памяти (LSTM), применяемую для обработки временных последовательностей. Исследование подтвердило необходимость применения мультимодальных архитектур при решении задач прогнозирования движения объектов в динамичной среде.

Работа [4] посвящена разработке и анализу гибридных методов машинного обучения, сочетающих преимущества глубокого обучения и ансамблевых алгоритмов для решения задач медицинской диагностики, характерной особенностью которых является ограниченный объём данных. Гибридный подход показал увеличение меры производительности нейронной сети – AUC (Area Under the ROC Curve – площадь под кривой) – на 10% по сравнению с отдельно используемыми методами.

Авторы статьи [5] решают проблему затруднённой классификации данных с высокой размерностью и малым объёмом обучающих выборок. Предложенная гибридная архитектура, соединяющая глубокие нейронные сети (DNN) и градиентный спуск XGBoost (Extreme Gradient Boosting), демонстрирует повышение точности классификации в два раза.

Проведённый анализ позволяет сделать вывод о том, что МНС способны решать нетривиальные практические задачи за счёт объединения различных архитектур.

Однако риски применения искусственных нейронных сетей при решении задач с высокой степенью ответ-

ственности связаны с нерешённой проблемой интерпретируемости полученных результатов.

### Об использовании экспертизы в гибридном подходе

При всех преимуществах систем машинного обучения существует проблема интерпретируемости результатов их работы. Интерпретируемость призвана дать понятие о работе модели и объяснить, каким образом она принимает те или иные решения, за счёт чего повышается доверие к модели, что особенно важно при решении критических задач. В том числе к таким задачам относится мониторинг территорий. Для устранения этого недостатка применяются экспертные системы.

Экспертные системы (ЭС) – это системы ИИ, предназначенные для решения практических задач путём имитации рассуждений эксперта в предметной области. Эти системы широко применяются в информатике, медицине, финансах, производстве и других сферах деятельности. Классическими примерами ЭС могут послужить MYCIN (диагностика инфекционных заболеваний), Dendral (анализ химических структур), XCON (конфигурация компьютерных систем) [6, 7].

Экспертные системы обучаются специалистами в конкретной области знаний, и качество системы зависит от квалификации экспертов. Нейронные сети самообучаются путём самостоятельного поиска зависимости между входными и выходными данными обучающей выборки. Также эксперт-

ные системы, как правило, статичны после первоначального обучения, в то время как нейронные сети могут дообучаться в процессе функционирования.

Статья [8] посвящена анализу особенностей построения экспертных систем (ЭС), их архитектуре, этапам разработки и применению в современных условиях. Авторы рассматривают как классические подходы, так и современные методы, сочетающие традиционные подходы с нейронными сетями и нечёткой логикой. В статье отмечается тенденция интеграции ЭС с нейронными сетями для улучшения взаимодействия с пользователями. Авторы отмечают, что предложенная ЭС показала неправильные результаты только в 3% тестовых случаев.

В статье [9] отмечается адаптивность миварных экспертных систем к изменениям и их способность интегрироваться с современными технологиями, такими как нейронные сети. Это подтверждается результатами работы [10], где предложен алгоритм динамического планирования траектории для наземных роботов, объединяющей семантическое обнаружение объектов с миварными экспертными системами, которые являются расширенным вариантом ЭС, способным анализировать многокритериальные сценарии, адаптироваться к неполным данным и предлагать оптимальные решения [11]. Алгоритм позволяет повысить безопасность работы робота и адаптацию к динамически меняющимся средам. Однако данный алгоритм имеет ряд недостатков, таких как необходимость дообучения модели и зависимость от качества данных.

Важной частью ЭС является проведение экспертного анализа и обработка экспертных мнений для формирования решений. В связи с этим целесообразно особое внимание обратить на правильность организации такой экспертизы на различных временных интервалах и для решения различных задач.

Экспертные системы призваны помочь в оценке решений, опираясь на опыт и оценку специалистов, так как предлагаемые решения могут не соответствовать требуемому качеству. Соединение систем машинного обучения и экспертных систем обеспечит совместное решение задачи управления мониторинговой группой БЛА в условиях априорной неопределённости. Современные исследования показывают рост популярности архитектур, где нейронные сети используются для обработки и анализа данных, а экспертные системы обеспечивают контроль качества и соответствие нормативным требованиям.

Однако у большинства экспертных систем имеется ряд недостатков, таких как затруднённый анализ больших и неструктурированных баз знаний,

необходимость привлечения экспертов узкой специализации для их создания и наполнения.

### Прецедентный подход как способ поиска решений

Прецедентный метод заключается в том, что решения прошлых задач могут быть использованы для решения новых задач, анализируя их сходство и применяя схожие методы и стратегии. Этот подход особенно эффективен в ситуациях, когда имеется ограниченное количество информации или когда нет чёткого алгоритма для решения задачи. Прецеденты, используемые в рассуждении, обычно представляют собой пары «проблема-решение», где проблема – это конкретная ситуация или задача, а решение – это способ, которым она была решена. Когда поступает новая задача, анализируются уже имеющиеся прецеденты, находится наиболее подходящий и адаптируется для новой ситуации [12].

Прецедентный метод состоит из основных этапов:

- 1) представление характеристик текущей задачи в виде логико-лингвистической модели [13];

- 2) поиск в базе прецедентов наиболее релевантных решений на основе метрик схожести;
- 3) адаптация найденного решения к новой задаче (при необходимости);
- 4) после применения решения текущая задача и принятое решение заносятся в базу прецедентов для дальнейшего использования.

Прецедентный метод сочетает принципы человеческого мышления с вычислительной эффективностью, что делает его перспективным для решения задач с неопределённостью. Главным преимуществом прецедентов является развитие системы с появлением новых данных. Также прецеденты позволяют динамически обновлять правила экспертной системы, благодаря чему возможно более эффективно решать сложные задачи и адаптироваться к изменяющимся условиям. Кроме того, использование прецедентов способствует снижению нагрузки на специалистов, обладающих ограниченным опытом или недостаточными знаниями. База прецедентов компенсирует недостаток знаний операторов, предоставляя проверенные решения.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

**ЭЛЕКОНД**

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

**Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...**

Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 3,2 ... 485

Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , мкФ, 1,0 ... 470 000

Диапазон температур среды при эксплуатации,  $T_{ср}$ , °C -60 ... 125

**Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...**

Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 3,2 ... 200

Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , мкФ, 1,5 ... 60 000

Диапазон температур среды при эксплуатации,  $T_{ср}$ , °C -60 ... 175

**Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...**

Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 2,5 ... 63

Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , мкФ, 0,033 ... 2 200

Диапазон температур среды при эксплуатации,  $T_{ср}$ , °C -60 ... 175

**Суперконденсаторы K58-...**

Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 2,5 ... 2,7

Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , Ф, 1,0 ... 4 700

Диапазон температур среды и эксплуатации,  $T_{ср}$ , °C -60 ... 65

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

Номинальное напряжение,  $U_{ном}$ , В, 5,0 ... 48

Номинальная емкость,  $C_{ном}$ , Ф, 0,08 ... 783

Диапазон температур среды при эксплуатации,  $T_{ср}$ , °C -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](mailto:elecond-market@elcudm.ru), [www.elecond.ru](http://www.elecond.ru)



Реклама



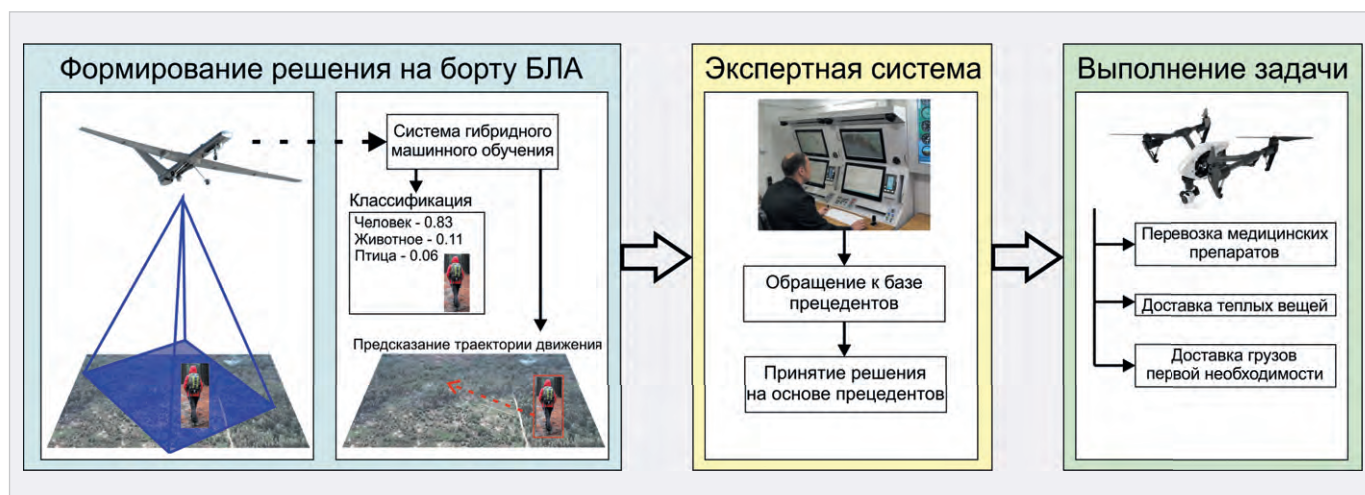


Рис. 2. Пример реализации подхода

Это особенно важно в условиях дефицита высококвалифицированных кадров, так как позволяет менее опытным операторам принимать обоснованные решения, опираясь на предыдущий опыт.

## Основные положения гибридного подхода

Авторы выдвигают научную гипотезу, состоящую в том, что объединение описанных технологий ИИ (нейронных сетей, экспертной системы и прецедентного метода) позволит получить гибридный подход к решению задачи мониторинга территорий. Такое решение позволит устранить недостатки каждой технологии и обеспечит рациональное распределение средств с целью оперативного решения поставленной задачи. При этом нейронные сети предполагается использовать для обработки мультимодальных данных, экспертные системы – для обеспечения логической согласованности, а прецедентный подход – для адаптации к новым сценариям.

Гибридный подход предлагается построить следующим образом.

1. МНС обрабатывают входные данные и генерируют первичные гипотезы решений.

Для реализации устройства, способного выполнять указанные функции, могут быть применены вычислительные модули, позволяющие работать с нейронными сетями различной вычислительной сложности, например, «NM Pilot» (НТИЦ «Модуль»), Rock 5B (Radxa) и Jetson Nano (NVIDIA).

Важным фактором является качественная подготовка обучающей выборки для используемой архитектуры нейронной сети. Для реализации

системы технического зрения поиска объекта (человека), установленной на БЛА, рекомендуется использовать кадры естественного ландшафта, в котором предполагается применение, с фигурами объекта в различных ракурсах и положениях, что позволит более точно определить его физическое состояние (в сознании, без сознания, в движении, неподвижен и т.д.), и вариантами внешнего вида (камуфлированный, заметный и т.д.). Обучающая выборка может быть получена при помощи натурных съёмок либо с использованием синтетических кадров, которые могут быть получены посредством трёхмерного моделирования в графических редакторах.

При использовании МНС возможно осуществление прогноза дальнейших действий обнаруженного объекта на основании данных о его пространственно-временном положении и внешних факторах, которые влияют на его мобильность (нахождение под завалами, свободное перемещение по местности и т.д.) [3].

2. Экспертная система проверяет найденное решение на соответствие правилам, составленным экспертами, и объясняет итоговый вывод через цепочку прецедентов.

3. В базе прецедентов с помощью метрик близости определяется ближайший прецедент к текущей ситуации и при необходимости адаптируется [13].

Автоматическое пополнение базы прецедентов позволит сохранить актуальность данных, а большое количество прецедентов повысит точность поиска ближайших прецедентов и, следовательно, правильность принятия решения.

Предложенный гибридный подход (рис. 1) сочетает преимущества трёх

рассмотренных парадигм: адаптивность нейронных сетей, гибкость прецедентных решений, объяснимость экспертных систем – и устраняет недостатки (непрозрачность нейросетей, ограниченность квалификации экспертов и трудность получения значительного объёма базы прецедентов).

## Практическое применение гибридного подхода

В рамках данной статьи предложенный гибридный подход используется для решения задач мониторинга территорий, к которым могут относиться:

- поиск и спасение людей, находящихся в зонах стихийных действий и чрезвычайных ситуаций;
- фиксация информации о точках возникновения чрезвычайных ситуаций (повреждение трубопровода, обрыв линий электропередач и т.д.) с целью принятия решений по их устранению [14–16];
- создание графической картины территории, охваченной стихийными бедствиями;
- оказание первой медицинской помощи пострадавшим с помощью доставки медикаментов и необходимых средств.

В качестве примера использования такой системы можно рассмотреть решение группой БЛА задачи помощи человеку, оказавшемуся в труднодоступном районе лесного массива (рис. 2).

При поступлении информации о пропаже человека в лесном массиве исходной информацией может выступать внешний вид человека, время и место его последнего контакта для определения ориентировочного радиуса поиска.

База данных прецедентов содержит информацию об отдельных БЛА и группах, объектах интереса/поиска, окружающей среде и принятых решениях. Данные хранятся в базе в виде логико-лингвистической модели, которая описывает каждую отдельную ситуацию.

Сотрудниками поисковых служб в данном случае используется наблюдательный БЛА, на бортовом вычислителе которого функционирует нейронная сеть с целью детекции объекта на фоне естественного ландшафта, классификации и последующей идентификации, то есть определения его физического состояния, а также прогноза его дальнейших действий. При обнаружении человека системой искусственного интеллекта выдвигается предлагаемое решение на основании проанализированных данных о пространственно-временном положении человека. Так, при обнаружении человека в сознании система предлагает в качестве решения отплату продовольственных ресурсов и средств связи со службой спасения.

Предложенное решение передается в экспертную систему. В базе прецедентов с помощью метрик близости определяется ближайший прецедент к текущей ситуации. Используются меры разнообразия, концентрации, меры включения, сходства, различия, совместимости и несовместимости событий, меры взаимозависимости, ассоциативные меры, меры подобия и др. [17]. При этом используются два типа основных показателей: основанные на качественных данных (то есть присутствие или отсутствие сущности) и количественных данных (обилие сущностей и их численность). Большинство коэффициентов различных метрик близости нормируются и находятся в диапазоне от 0 (сходство отсутствует) до 1 (полное сходство).

Вариант из базы прецедентов сравнивается с предложенным решением и оценивается экспертной системой. На основании полученной оценки формируется окончательное решение и отправляется на исполняющий БЛА, который выполняет целевую функцию в отношении обнаруженного человека.

## Заключение

В рамках предложенного гибридного подхода к мониторингу территорий рассмотрена целесообразность применения экспертных систем совместно с базами прецедентов для повышения

качества принимаемых решений, предложенных нейронными сетями.

Результаты исследования показали, что нейронные сети способны обеспечивать обработку неструктурированных мультимодальных данных. Прецедентный метод позволит экспертной системе принимать решения на основе предыдущего опыта при отсутствии достаточной компетенции экспертов, а автоматическое пополнение базы прецедентов обеспечит поддержание корректности принимаемых решений.

Таким образом, гибридизация нейронных сетей, экспертных систем и прецедентного подхода к принятию решений позволяет минимизировать недостатки, присущие каждому методу в отдельности, обеспечить рациональное распределение ресурсов, повысить точность и интерпретируемость систем искусственного интеллекта.

## Литература

1. Абдельрахман Э. Мультимодальные модели и мультимодальное обучение: Расширение возможностей ИИ // Платформа для работы с искусственным интеллектом Ultralytics: сайт. URL: <https://www.ultralytics.com/ru/blog/multi-modal-models-and-multi-modal-learning-expanding-ai-capabilities> (дата обращения: 15.07.2025).
2. Мультимодальный ИИ: новое слово в нейронных сетях // Блог ServerFlow: сайт. URL: <https://serverflow.ru/blog/stati/multimodalnyy-ii-novoe-slovo-v-neyronnykh-setyakh/> (дата обращения: 15.07.2025).
3. Абрамов Н.А. Исследование методов прогнозирования траектории движения пешеходов // Научный аспект. 2024. Т. 46, № 6. С. 5889–5900.
4. Gavrishchaka V. Advantages of hybrid deep learning frameworks in applications with limited data / Z. Yang, R. Miao, O. Senyukova // International Journal of Machine Learning and Computing. 2018. Vol. 8. P. 549–558.
5. Mavaie P. Hybrid deep learning approach to improve classification of low-volume high-dimensional data / P. Mavaie, L. Holder, M. Skinner // BMC Bioinformatics. 2023. Vol. 24.
6. Schnepptat J.O. AI XCON: сайт. [Электронный текст]. URL: [https://schnepptat.com/xcon\\_expert-configurer.html](https://schnepptat.com/xcon_expert-configurer.html) (дата обращения: 14.07.2025).
7. Buchanan B. Rule-based expert systems: The MYCIN experiments of the Stanford heuristic programming project / B.G. Buchanan, E.H. Shortliffe. MA: Addison-Wasley, 1984. 754 pp. URL: <https://www.shortliffe.net/Buchanan-Shortliffe-1984/MYCIN%20Book.htm> (дата обращения: 14.07.2025).
8. Эрькина О.В., Пальмов С.В. Экспертные системы: структура, возможности, классификация // Форум молодых ученых. 2018. № 5–3 (21). С. 1042–1045.
9. Шэнь Цюцзе, Гун Шэньшо, Варламов О.О. [и др.]. Динамическое планирование траектории робота на основе семантического обнаружения объектов с использованием миварной экспертной системы // Проблемы искусственного интеллекта. 2024. № 4 (35). С. 164–176.
10. Речинский А.В., Станкевич Л.А., Черненко Л.В., Черненко А.В. Анализ особенностей построения экспертных систем // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. № 4.
11. Яковлева М.В., Аспиева Л.М. Эффективность применения миварных экспертных систем в оптимизации бизнес-процессов и принятии управленческих решений // Информатизация в цифровой экономике. 2025. Т. 6. № 2.
12. Варламов О.О. Применение миварных технологий логического искусственного интеллекта для создания умных производственных систем // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2025. № 2 (38).
13. Михайлова Е.С. Логико-лингвистическая модель группового прецедента // «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2024). 2025. С. 1124–1131.
14. Прохоров А.В., Носков И.В. Мониторинг магистральных нефтегазопроводов при помощи беспилотных летательных аппаратов // Вестник евразийской науки. 2022. Т. 14. № 6.
15. Абрисимов В.К., Лапин С.М. Об использовании теории сходства для оценки динамики скоплений объектов интереса на местности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. №. 1. С. 29–43.
16. Фомищев А.А., Сидоров А.А. Самоорганизующийся и самоуправляемый БПЛА и способ контроля территории на наличие установленного события посредством такого роля, 2023, патент RU2805431C1.
17. Айроян З.А., Коркишко О.А., Сухарев Г.В. Мониторинг магистральных нефтепроводов с помощью беспилотных летательных аппаратов // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43).



# Интеграция ИИ в электронные системы для специальных задач. Новые способы дистанционного контроля с помощью РЭА

Надежда Ласорла

До широкого применения методов искусственного интеллекта для обработки слабых и зашумлённых сигналов использовались аналоговые и цифровые методы, включая усиление, фильтрацию, демодуляцию и аналого-цифровое преобразование. С развитием методов машинного обучения и генеративных моделей появились дополнительные возможности для восстановления и повышения разборчивости сигналов, содержащих полезную информацию. В статье рассмотрены два подхода к получению информации с использованием электронных средств: регистрация акустических вибраций и анализ отражённых радиосигналов различных частот в жилых помещениях. Также рассмотрены особенности соответствующих методов обработки сигналов и ограничения их применения.

## Введение

Для определения местонахождения человека в жилом помещении сегодня не всегда требуется непосредственное визуальное наблюдение. Современные электронные системы позволяют получать информацию о положении и перемещении человека с помощью радиочастотных, акустических и других датчиков. В отличие от традиционного визуального наблюдения, такие системы могут работать автоматически и обеспечивать непрерывный сбор данных в пределах зоны действия датчиков. Полученная информация может использоваться для определения положения человека, характера его перемещений и других параметров в зависимости от возможностей конкретной системы.

## Использование свойств MEMS-микрофонов при контроле через стены

Новые алгоритмы искусственного интеллекта применяются для преобразования отражённых сигналов. В ПК, ноутбуках, электронных планшетах, смарт-часах и многих других устройствах, особенно тех, в которых предусмотрены функции записи звука, используются встроенные микрофоны. Привычное название «электретные» (конденсаторные) микрофоны постепенно уступает более современному обозначению – MEMS-микрофоны. К ним относятся, например, востребованные разработ-

чиками радиоэлектронной аппаратуры изделия STMicroelectronics, Knowles (Synaptics), TDK InvenSense и Vesper (Qualcomm). Эти устройства представляют собой микромеханические датчики, в которых звуковое давление вызывает перемещение чувствительной мембраны, а её механические колебания преобразуются в электрический сигнал.

Микрофоны в сотовых телефонах – усовершенствованные устройства относительно прообраза советского конденсаторного микрофона МКЭ-3 (рис. 1). По частотной характеристике такой микрофон несколько срезает низкие частоты (НЧ), но в этом и польза – так отсекаются шумы НЧ, в частности фон с частотой 50 Гц от работающих повсеместно потребителей электроэнергии. А «подъём» частотной характеристики в области ВЧ, наоборот, делает записанную речь естественной. Питается микрофон от источника с напряжением 1,5–5 В при токе потребления



Рис. 1. Электретный микрофон МКЭ-3, являющийся по принципу работы сенсора прообразом современных миниатюрных микрофонов в сотовых телефонах

до 0,2 мА. Динамические микрофоны имеют иные характеристики, но, кроме высококачественной аудиоаппаратуры, в бытовых условиях почти не применяются. Наоборот, давно получили распространение беспроводные микрофоны на основе электретных или конденсаторных аудиодатчиков (рис. 2).

Кроме прямого своего назначения, любые микрофоны, динамические излучающие звук головки (капсюли), в том числе пьезоэлектрические, работают как излучатели сигналов. Сигналы нужно лишь уловить и дешифровать, а иногда и восстановить по обрывочным данным – для этого и применяют новые алгоритмы ИИ.



Рис. 2. Микрофоны в устройствах беспроводной передачи



Рис. 3. Вид на плату приёмника FM-диапазона частот

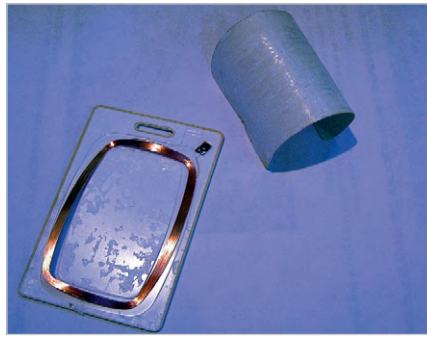


Рис. 4. Карта доступа в разрезе

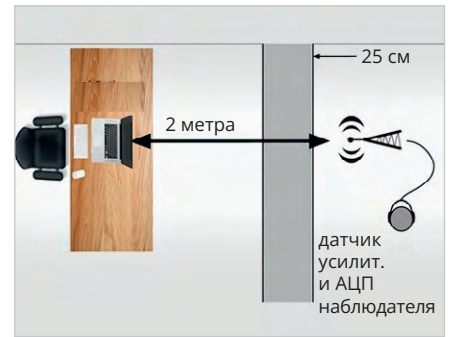


Рис. 5. Способ дистанционного негласного съёма информации через стену

Кроме того, излучающими антеннами являются незранированные соединительные кабели (в том числе в системе соединения Ethernet), причём чем длиннее кабель, тем больше излучения, микрофоны и даже клавиатура ПК – все эти средства кроме прямой функции работают по принципу антенны.

Любая вибрация, в том числе голос человека, способствует изменению микромагнитного поля. Микрофон улавливает эти акустические колебания и посредством электронного усилителя преобразует их в электрический ток. Затем по цепочке, в зависимости от конечного функционала устройства, могут применяться акустические частотные фильтры, модуляторы сигнала и аналого-цифровые преобразователи (АЦП) для формирования сигналов в цифровой вид, а это уже позволяет обрабатывать его алгоритмами ИИ, а также с помощью сопоставления с базами данных выявлять (анализировать) особенности и даже создавать новый контент. К примеру, электромагнитные излучения от микрофона улавливаются с помощью недорогого FM-приёмника и антенны – даже сквозь стены [8]. Плата с элементами простого радиоприёмника сигналов в частотном диапазоне FM представлена на рис. 3.

Любая акустическая информация связана с колебаниями воздуха, излучением гармоник и акустического фона определённой частоты. Даже типичная карта доступа, транспортная или банковская (рис. 4) – всё, что имеет намотку в любой форме, является антенной и элементом передачи данных.

Чтобы активировать такой способ слежения, достаточно создать магнитное поле, действующее на индуктивную обмотку-антенну. При звуковом воздействии, к примеру раз-

говоре человека, отражённое антенной магнитное поле относительно спокойного фона акустической тишины изменяется. И эти изменения улавливают устройства дистанционного контроля.

Даже чипы, встроенные в пластиковую и привычную всем банковскую карту, можно использовать как антенну, отражающую воздействующие на неё акустические или механические вибрации.

Для успешного результата применения таких способов необходимы лишь специальная электронная техника, создающая магнитное и электрическое поле на расстоянии в нескольких метрах от объекта съёма информации, и в её составе электронные устройства, улавливающие и демодулирующие отражённый антенной сигнал с выделением его алгоритмами ИИ относительно прочих сигналов шумового фона. Подобные устройства стали использоваться в арсенале специальных подразделений правоохранительных органов ещё 15 лет назад. С развитием технологий и Интернета таких устройств будет всё больше, а технологии будут усовершенствованы, в том числе для съёма информации на более дальних расстояниях от объекта.

Современные технические средства позволяют осуществлять дистанционный сбор различных типов цифровой информации. В зависимости от используемой системы могут анализироваться сетевой трафик, данные с компьютеров и мобильных устройств, аудиосигналы и изображения. Полученные данные могут автоматически обрабатываться, сохраняться и передаваться по каналам связи. Возможности и способы работы таких систем зависят от используемого оборудования, программного обеспечения и параметров сетевой инфраструктуры.

Сигналы PDM в оцифрованном виде импульсов прямоугольной формы являются основой акустической информации, передающейся затем на расстояние. В приёмном устройстве эти сигналы демодулируются.

На практике с помощью генеративного ИИ от OpenAI уже добились точности распознавания произнесённых цифр до 94,2% с расстояния 2 метров сквозь бетонную стену толщиной 25 см. Ошибка транскрипции составила всего 6,5% (рис. 5). На иллюстрации показан способ негласного съёма информации лицом, находящимся в соседнем помещении.

Уязвимость характерна для цифровых MEMS- и PDM-микрофонов, но может быть устранена на системном уровне с помощью надлежащего экранирования [2]. Экранирование кабелей, сокращение их длины и использование технологии синхронизации с расширенным спектром (Spread-Spectrum Clocking) заметно снижают риск утечек. Также помогает минимальное изменение тактовой частоты обработки аудио.

## ИИ как инструмент отслеживания в других сферах

MammAlps явился первым в своём роде мультимодальным видео-датасетом, фиксирующим поведение диких млекопитающих. Его разработали учёные из швейцарской высшей технической школы в Лозанне (EPFL).

Такой способ дистанционного контроля может стать поворотным моментом в мониторинге дикой природы, обеспечив экологов, биологов и специалистов по ИИ новой платформой для анализа поведения животных в естественной среде [3].

Устройство интегрировано в систему с банком данных высококачественной коллекции видеозаписей,





Рис. 6. Фиксация с помощью электронной фотоловушки действий животного в естественных условиях с последующим анализом посредством алгоритмов интегрированного в РЭА генеративного ИИ

на которых зафиксировано поведение диких животных в реальной среде. MammAlps с ИИ также предназначен для обучения ИИ-систем задачам распознавания видов и паттернов поведения, облегчая дальнейшее дистанционное автоматическое наблюдение и анализ.

Фотоловушки, являющиеся одним из традиционных средств автоматической фиксации событий, могут формировать большие объёмы неструктурированных видеоданных, обработка которых вручную требует значительных временных и трудовых затрат. Методы искусственного интеллекта позволяют автоматизировать анализ таких данных. С использованием обучающих выборок и накопленных баз данных алгоритмы могут обнаруживать и классифицировать объекты, выделять значимые события и отфильтровывать видеоматериалы, не содержащие интересующих признаков. Поэтому технологии искусственного интеллекта являются перспективным инструментом автоматизированной обработки данных, получаемых с помощью фотоловушек.

С помощью электронных датчиков различного назначения алгоритмы машинного обучения могут распознавать как отдельные движения объекта, так и более общие поведенческие паттерны. Поведение животных может анализироваться на двух уровнях: от определения общих действий, таких как приём пищи или игровая активность, до выделения отдельных элементов поведения. На детальном уровне могут анализироваться перемещения, движения конечностей,

уход за шерстью и другие характерные действия.

С учётом погодных условий и активности людей и животных дополнительным смыслом стало создание пространственных карт в цифровой форме, отражающих особенности местности, такие как источники воды, кустарники и скальные образования.

В процессе испытания исследователи установили 9 фотоловушек с электронными видеокамерами и пирозлектрическими датчиками движения, за несколько недель записали полсотни часов видеоматериала. Примерно 8,5 часов видеопотока с аудиозаписями сопровождения в ситуациях, наиболее насыщенных взаимодействием животных с окружающей средой, выбраны для дальнейшего исследования и предсказания поведения животных в ситуациях угроз или, наоборот, адекватного биологического равновесия в природе [3]. В условиях изменения климата и антропогенных факторов такие инновации весьма полезны для безопасности экосистем.

До появления системы MammAlps для мониторинга животных применялись традиционные методы, включая непосредственное наблюдение и использование носимых электронных датчиков. Носимые датчики позволяют получать данные о перемещении и отдельных параметрах активности животных, однако их применение может быть связано с определёнными ограничениями. В частности, установка датчика требует доступа к животному, а набор регистрируемых параметров зависит от конструкции устройства. Кроме того, такие системы могут обеспечивать наблюдение только за животными, оснащёнными соответствующими датчиками.

Теперь с помощью ИИ развивается обновлённый стандарт в наблюдении за дикой природой с охватом более широкого спектра дистанционного контроля параметров, что позволяет анализировать события в динамике, следовательно, с большой долей вероятности предсказывать их при прочих равных условиях ситуаций.

Таким образом уже анализируют сложные эпизоды «натуральной жизни», к примеру, как человек-агрессор действует при нападении на свою жертву или оппонента, как волк пре-

следует оленя или лань и в других случаях (рис. 6).

## Индивидуальные электронные устройства как возможные средства шпионажа

Известны методы передачи данных между электронными устройствами с использованием акустического или ультразвукового диапазона частот. В качестве передающего элемента может использоваться встроенный громкоговоритель компьютера или другого устройства, а для приёма сигнала – микрофон, например, встроенный в смартфон или smart-часы. При наличии соответствующего программного обеспечения такая система способна преобразовывать цифровые данные в акустический сигнал и передавать их по беспроводному каналу на небольшое расстояние. Возможность применения этого метода определяется характеристиками используемых динамиков и микрофонов, частотным диапазоном и уровнем окружающего шума.

Человеческое ухо воспринимает ограниченный диапазон частот, который принято называть звуковым диапазоном. Для здорового человека молодого возраста условно принимается диапазон от 20 Гц до 20 кГц, при этом верхняя граница слышимости индивидуальна и обычно снижается с возрастом.

Электронные акустические преобразователи, включая громкоговорители и микрофоны, могут работать в диапазоне частот, отличающемся от диапазона наилучшей чувствительности человеческого слуха. В частности, некоторые устройства способны воспроизводить или регистрировать сигналы за пределами слышимого диапазона. Эта особенность может использоваться в системах акустической передачи и обработки данных.

Например, электрическая сеть переменного тока с номинальным напряжением 230 В в большинстве европейских стран работает на частоте 50 Гц. Электрические устройства могут создавать акустические и механические колебания на этой частоте и её гармониках, поэтому рядом с некоторыми мощными потребителями электроэнергии может быть слышен низкочастотный гул. Однако его частота и интенсивность зависят от конкретного оборудования и условий экс-



Рис. 7. Умные часы на руке пользователя ПК (слева) и вид с тыльной стороны (справа)

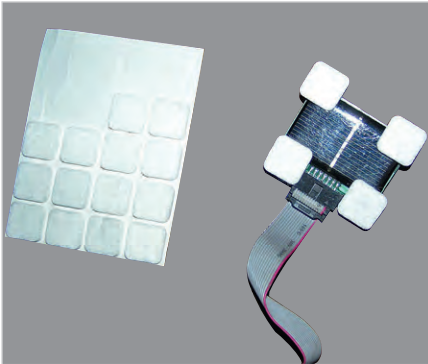


Рис. 8. Электронный модуль с питанием от фотоэлектрического (солнечного) элемента с чувствительным микрофоном-датчиком сбора информации от микровибраций стекла



Рис. 9. Способ установки датчика сбора информации на окне

плуатации. Рассматриваемый сценарий наблюдения предполагает, что злоумышленник заранее устанавливает вредоносное ПО на компьютер и затем либо приближается к нему с умными часами, либо использует для этой цели подставное лицо. Возможен и более хитрый вариант: часы временно похищаются или изымаются, к примеру, во время ночного сна, заражаются и возвращаются [3]. На рис. 7 показаны умные часы на руке пользователя ПК (слева) и вид с тыльной стороны (справа).

Распространённые многофункциональные смарт-часы и совместимые с ними модели других производителей, помимо функций отображения времени, регистрации физиологических параметров и определения местоположения, могут выполнять сбор, хранение и передачу пользовательских данных. Набор таких функций зависит от конкретной модели, используемых датчиков, настроек устройства и подключённых сервисов.

Для синхронизации времени и передачи данных смарт-часы могут использовать различные каналы связи, включая Wi-Fi, Bluetooth и мобиль-

ные сети. Некоторые модели способны получать информацию о точном времени через подключённый смартфон или сетевые сервисы. При наличии соединения данные, собранные устройством, могут синхронизироваться с сопряжённым смартфоном и облачной инфраструктурой производителя в соответствии с настройками пользователя и политикой соответствующего сервиса.

Современные смарт-часы могут оснащаться датчиками для регистрации частоты сердечных сокращений, оценки уровня физической активности, определения местоположения и других параметров. Отдельные модели также имеют микрофон и поддерживают функции записи или обработки звука. Возможность дистанционного управления конкретными функциями, а также состав передаваемых данных определяются аппаратной конфигурацией устройства, установленным программным обеспечением и предоставляемыми производителем сервисами.

Некоторые модели смарт-часов способны автоматически собирать и передавать данные о местоположении, физической активности и других параметрах в зависимости от установленного программного обеспечения и настроек пользователя. Передача дан-

ных может выполняться в фоновом режиме и не сопровождаться заметными для пользователя уведомлениями при каждом отдельном сеансе синхронизации.

Доступ к настройкам и собранным данным обычно регулируется механизмами аутентификации и разрешений операционной системы. Возможность изменения этих параметров зависит от конкретной модели устройства, используемого приложения и настроек безопасности. Поэтому для оценки потенциальных рисков необходимо учитывать как аппаратные возможности устройства, так и установленное программное обеспечение и предоставленные ему разрешения.

Применение технических средств для получения информации может требовать физического доступа к устройству, специального оборудования или определённой квалификации. Такие средства используются в различных областях для регистрации, передачи и анализа данных. Их применение в рамках специальных мероприятий осуществляется уполномоченными организациями в соответствии с установленными законодательством требованиями.

Среди технических средств получения информации по-прежнему востребованы компактные устройства, допускающие оперативную установку и демонтаж. Их характеристики, способы размещения и каналы передачи данных определяются конкретным назначением и условиями эксплуатации.

На рис. 8 показан вид электронного модуля с питанием от фотоэлектрического (солнечного) элемента с чувствительным микрофоном-датчиком съёма информации от микровибраций стекла. Имеет микрофон, датчик вибрации и миниатюрную видеокамеру. Датчик моментально устанавливается с внешней стороны окна на липкой основе в четырёх точках. Передача данных в постоянном режиме организована (по выбору и опционально) через радиоканал FM, Wi-Fi или на радиочастоте в зашифрованном виде. Электронный модуль расширен для установки съёмного аккумулятора, необходимого для устойчивой передачи данных в условиях малой солнечной активности, например, ночью.

На рис. 9 показан способ установки электронного датчика съёма информации непосредственно на окне.



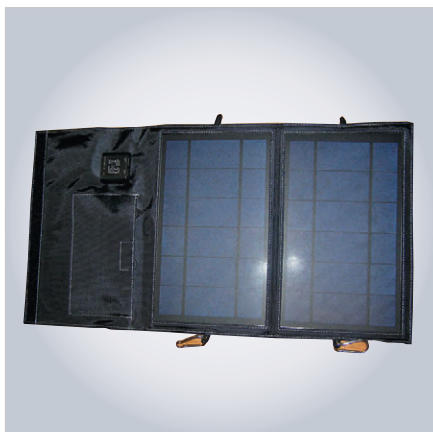


Рис. 10. Быстроустанавливаемый модуль питания специализированных устройств от солнечной энергии

По способу размещения такие радиоэлектронные системы относятся к внешним датчикам, устанавливаемым вне контролируемого устройства или объекта. В состав системы могут входить источники электромагнитного излучения, формирующие сигнал на определённой частоте, а также приёмные устройства для регистрации изменений характеристик электромагнитного поля или отражённого сигнала.

Принцип работы такой системы заключается в формировании и регистрации электромагнитных сигналов и последующем анализе полученных данных. Конкретные характеристики системы определяются частотой работы, параметрами передатчика и приёмника, условиями распространения сигнала и алгоритмами обработки данных.

С помощью передатчика принудительно создаётся радиочастотный или магнитный фон, воздей-

ствующий на площади до 25–30 м<sup>2</sup> в помещении (мощность специальных устройств может быть разной). Другая часть электронной системы улавливает микроколебания – изменения в динамике созданного фона (относительно сигнала «аудиотишины» в помещении, принятого за обычный фоновый сигнал), усиливает их, отфильтровывает полезный сигнал, преобразует его в цифровой вид, далее с помощью алгоритмов ИИ воссоздаёт слова или фразы в потоковом ключе. Современные устройства и РЭА уже достигли такого уровня, что могут улавливать и усиливать даже крайне незначительные слабые сигналы (изменение фона) от человека, в том числе звуки его дыхания.

Для обеспечения бесперебойного и в особых случаях устойчивого функционирования специальных электронных устройств применяют мощные модули питания от источника солнечной энергии. Они быстро монтируются и демонтируются, имеют плоский вид (рис. 10). Выходная мощность показанного модуля до 10 Вт при максимальном токе до 4 А. На практике применяют устройства аналогичного назначения и других моделей.

### Определение движущегося объекта с помощью вибраций и отражённого сигнала 2,4 ГГц

Ранее журнал «Современная электроника» сообщал о перспективных разработках в области сейсмического мониторинга, основанных на анализе изменений фонового уровня и динамики отражённых сигналов в диапазоне частот 2,4 ГГц.

Три года назад специалисты концерна «Созвездие», входящего в состав «Росэлектроники», разработали отечественное цифровое устройство сейсмического мониторинга [5].

В состав комплекса радиоэлектронной аппаратуры входят электронный датчик размером до 20 см, электронный модуль, антенны и программное обеспечение, совместимое с операционными системами различных типов, включая мобильные платформы. Согласно приведённым характеристикам радиус действия антенны составляет до 10 км, при этом система может обеспечивать взаимодействие с 50–70 датчиками. Дальность эффективной работы одного датчика составляет до 400 м [6]. Разработка была отмечена золотой медалью Московского международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед».

Совместное использование датчиков, беспроводных сетей и алгоритмов цифровой обработки сигналов расширяет возможности дистанционного мониторинга. При этом конкретные возможности обнаружения и классификации событий определяются характеристиками датчиков, расстоянием до объекта, условиями распространения сигнала, уровнем помех и используемыми алгоритмами обработки данных.

Обнаружение движущихся людей за стенами без использования видеокамер и LiDAR-систем не является новой технологией. В 2013 году исследователи Массачусетского технологического института представили метод обнаружения людей с использованием радиосигналов, распространяющихся через стены. В 2018 году были представлены усовершенствованные варианты подобных систем [9]. Такие методы основаны на анализе изменений характеристик радиосигнала, возникающих при движении человека, и не требуют формирования обычного оптического изображения.

При изменениях в динамике фона, создаваемого несущими сигналами роутера Wi-Fi (в частотном канале 2,4 ГГц), модуляция 1024-QAM даёт условный прирост скорости передачи данных на 25–30%. А запатентованная технология Smart Antenna даёт увеличение радиуса покрытия до 30%. Технология целевого времени пробуждения (Target Wake Time, TWT) обеспечивает экономию заряда

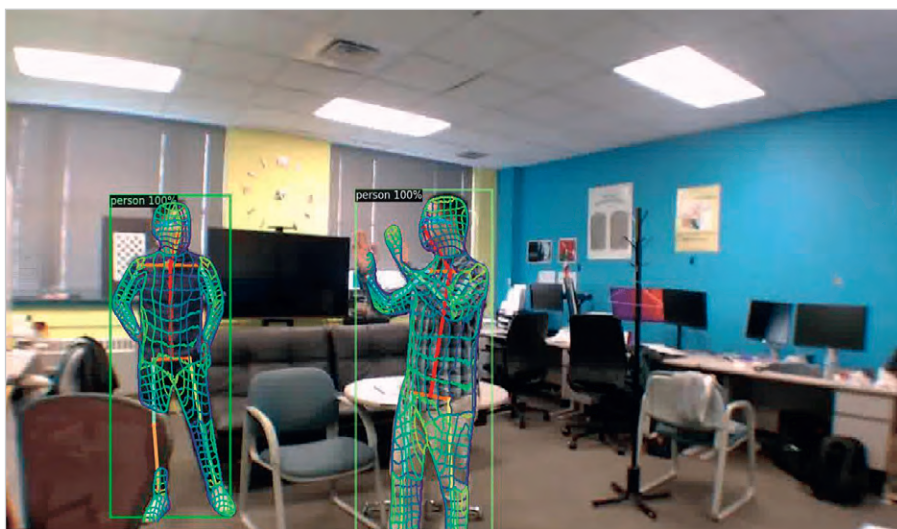


Рис. 11. Иллюстрация оценки позы объекта по отражённому сигналу Wi-Fi

элементов питания, что крайне важно для устройств (в том числе портативных) IoT, особенно когда данные передаются в канал ограниченными сериями. Рисунки 12–14 иллюстрируют, как алгоритм может оценить позу, используя сигнал Wi-Fi в сценариях с окклюзией и несколькими людьми.

На рис. 11 показана иллюстрация определения людей в помещениях при «сканировании» из соседнего помещения. Картина моделирована с помощью алгоритмов ИИ после обработки цифровых потоковых данных, полученных в динамике изменения фона генерации Wi-Fi в конкретном помещении, то есть на основе отражённых и выделенных сигналов. На рисунке показаны истинная поза человека и ключевые точки, выявленные с помощью предварительно обработанной информации на основе точек RGB-изображения.

На рис. 12 приведена иллюстрация метода получения каркасного представления человека на основе анализа отражённого Wi-Fi-сигнала (CSI). Показаны примеры поз и ситуаций, распознавание которых может быть затруднено, в том числе редкие или нестандартные позы, а также наличие одновременно трёх и более людей в зоне наблюдения.

В № 2 за 2023 год журнал «Современная электроника» на с. 51 сообщил о технологии дистанционного определения положения и позы человека с использованием Wi-Fi-сигналов. Исследования специалистов Университета Карнеги – Меллона показали, что изменения параметров Wi-Fi-канала, вызванные движением человека, могут использоваться для оценки его положения и позы при размещении передатчика и приёмника в разных помещениях. Такой подход иногда называют технологией видения сквозь стены [9].

Полученные данные могут использоваться для определения положения и позы человека и последующего формирования их трёхмерных представлений. Алгоритмы машинного обучения, в том числе методы искусственного интеллекта, позволяют обрабатывать эти данные и использовать полученные результаты для дальнейшего анализа. В сравнении с известными и типичными формами наблюдения (камеры слежения, радарные технологии и др.) описываемые

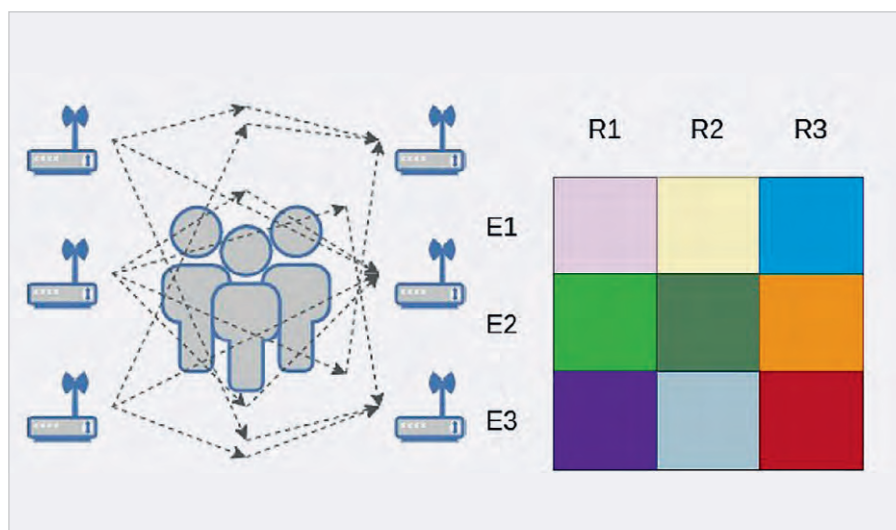


Рис. 12. Иллюстрация способа получения каркасного изображения человека с помощью отражённого сигнала Wi-Fi (CSI)

инновационные способы признаны прорывными в области здравоохранения, безопасности, и даже игр (VR), а также востребованы во многих случаях.

Возможный контроль через стены и перегородки с помощью отражённого сигнала Wi-Fi позволит решить типичные проблемы камер наблюдения, такие как плохое освещение, и составит конкуренцию радарным датчикам типа LiDAR. Кроме того, такое техническое решение дешевле и экономичнее по энергопотреблению.

При совершенствовании технологии, что, несомненно, дело ближайших лет, а не столетий, людям даже на бытовом уровне открываются новые возможности. Подробнее об этом можно прочитать в [9] и [5].

Одними из потенциальных угроз подобных технологий являются риски, связанные с конфиденциальностью данных. Поэтому при разработке радиоэлектронных систем повышенное внимание уделяется защите информации и предотвращению несанкционированного доступа к устройствам и данным. Для этого применяются механизмы аутентификации, шифрования, контроля доступа и другие средства информационной безопасности.

На рис. 13 представлена дополнительная иллюстрация дистанционного обнаружения людей за стенами с использованием Wi-Fi-сигналов. В левой колонке показаны результаты, полученные на основе синхронизированных изображений и данных Wi-Fi, а в правой – результаты обработки с использованием технологии

DensePose на основе изображений. Такое сравнение позволяет оценить соответствие результатов, полученных разными методами.

## Принцип формирования и анализа отражённых сигналов

Данные о состоянии канала (Channel State Information, CSI) дискретизируются с частотой 100 Гц и представлены комплексными значениями для 30 поднесущих, равномерно распределённых в полосе частот шириной 40 МГц с центральной частотой 2,4 ГГц. Передача данных осуществляется с использованием трёх передающих и трёх приёмных антенн. CSI содержит информацию об изменениях амплитуды и фазы сигнала, обусловленных характеристиками радиоканала и движением объектов в зоне распространения сигнала.

Для оценки позы человека используются методы машинного обучения, основанные на анализе изменений CSI. Полученные данные обрабатываются нейросетевой архитектурой, использующей подходы компьютерного зрения. В результате система оценивает положение характерных точек и частей тела человека и формирует его структурированное представление.

Для упрощения и ускорения формирования каркасного представления тела человека исследователи используют модель, в которой поверхность тела разделена на 24 области [9]. На следующем этапе определяются UV-координаты, описывающие соответствие точек поверхности человеческого тела и их положения на



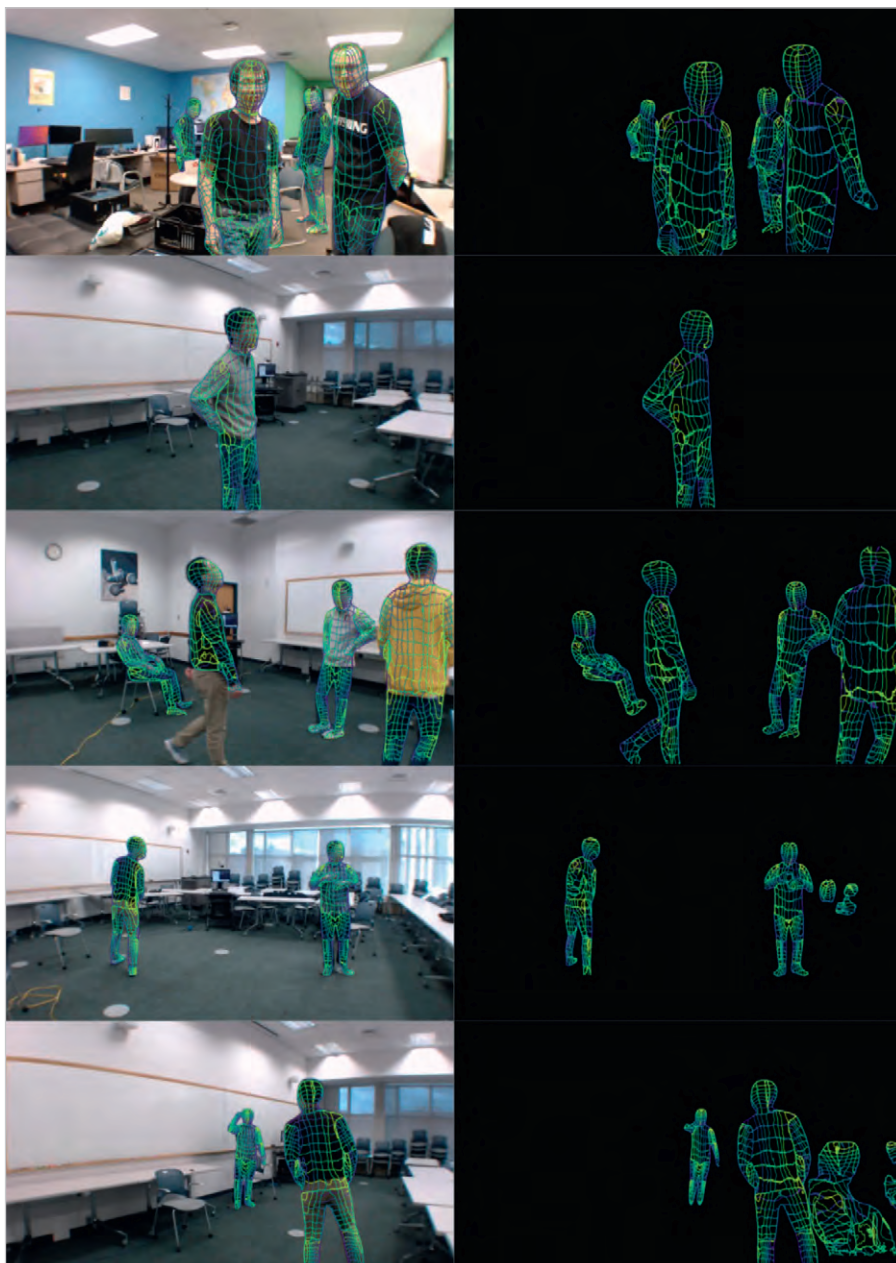


Рис. 13. Иллюстрация выявления объектов с помощью Wi-Fi дистанционно сквозь стены

двумерном представлении. В рассматриваемом подходе эта информация восстанавливается на основе характеристик Wi-Fi-канала, полученных из отражённых сигналов.

Первоначальные данные CSI проходят предварительную обработку, включающую очистку амплитудных и фазовых компонент от шумов и других искажений. Затем из них формируются двумерные представления признаков, которые передаются в модифицированную архитектуру DensePose-RCNN. Нейронная сеть оценивает соответствие между точками двумерного представления и координатами поверхности тела, что позволяет восстановить позу человека в форме плотного двумерно-трёхмер-

ного соответствия [9]. Точность локализации заявлена около 0,5 метра из-за случайного фазового сдвига, допускаемого стандартом связи IEEE 802.11n/ac, и помех от электронных устройств в аналогичном диапазоне частот (микроволновая печь, сотовые телефоны). Для решения задачи исследователи обращались к архитектуре глубокого обучения в компьютерном зрении и нейронной сети, которая выполняла оценку позы по сигналам Wi-Fi.

Приведённые результаты показывают, что современные методы обработки радиосигналов позволяют в определённых условиях обнаруживать присутствие людей и животных в помещении и оценивать их поло-



Рис. 14. Отдельные примеры размещения скрытых камер

жение без прямой видимости. Дальность обнаружения и точность определения параметров объекта зависят от характеристик используемого оборудования, условий распространения радиосигнала, конструкции помещения и применяемых алгоритмов обработки данных. Примеры размещения скрытых камер приведены на рис. 14.

### Особенности легитимной организации негласного наблюдения

Оперативно-розыскные мероприятия могут включать сбор, фиксацию и анализ информации с использованием технических средств. Порядок проведения таких мероприятий, основания для их начала и прекращения, а также условия хранения полученных материалов определяются законодательством.

Современные электронные устройства позволяют получать информацию на расстоянии с использованием микрофонов, оптических и радиотехнических средств, а также систем обработки цифровых данных. Конкретные характеристики оборудования зависят от его назначения и условий эксплуатации. По сравнению с системами, применявшимися несколько десятилетий назад, современные устройства отличаются меньшими размерами, более высокой чувствительностью и расширенными возможностями цифровой обработки сигналов.

Для передачи полученной информации могут использоваться различные беспроводные каналы связи. В профессиональных системах связи применяются средства защиты информации, включая шифрование и аутентификацию. Возможность перехвата или анализа радиопередачи зависит от используемого протокола, параме-

тров системы связи и применяемых средств защиты.

Наряду со специализированным оборудованием существуют компактные электронные устройства общего назначения, оснащённые микрофонами, камерами, радиомодулями и средствами обработки данных. Их функциональные возможности позволяют решать широкий спектр задач, связанных с регистрацией и передачей аудио-, видео- и других данных.

Использование технических средств для скрытого получения информации регулируется соответствующими правовыми нормами. Возможность применения конкретного устройства определяется его техническими характеристиками, назначением, условиями использования и требованиями законодательства. Поэтому при рассмотрении подобных технологий необходимо разделять технические возможности оборудования и правовые основания его применения.

Развитие искусственного интеллекта расширяет возможности автоматической обработки получаемых данных. Алгоритмы машинного обучения могут использоваться для фильтрации шумов, распознавания речи, анализа изображений, определения объектов и выделения других информативных признаков из зарегистрированных сигналов.

## Выводы

Одним из перспективных направлений развития систем дистанционного наблюдения с использованием радиоэлектронных средств и чувствительных электронных датчиков является анализ изменений параметров наблюдаемой среды во времени. Такой подход позволяет выявлять динамику происходящих процессов и использовать полученные данные для оценки положения и активности объектов наблюдения.

Современные алгоритмы машинного обучения позволяют автоматически анализировать большие объёмы данных, выявлять закономерности и классифицировать различные события. Результаты такого анализа могут применяться в системах мониторинга окружающей среды, городской инфраструктуры, транспортных потоков и других объектов. При этом точность прогнозирования зависит от качества исходных данных, выбранной модели и условий её применения.

Развитие радиоэлектронной аппаратуры сопровождается совершенствованием датчиков, средств связи и алгоритмов цифровой обработки сигналов. Современные системы могут объединять данные от нескольких типов датчиков и обрабатывать их с использованием методов машинного обучения. Это позволяет повышать устойчивость к шумам, выделять полезные признаки и автоматизировать обработку информации.

Перспективным направлением является использование алгоритмов искусственного интеллекта для обработки аудиосигналов. Нейронные сети способны снижать влияние фонового шума, восстанавливать отдельные фрагменты речи и повышать разборчивость записей. Эффективность таких методов определяется уровнем шума, характеристиками исходного сигнала и параметрами используемой модели.

Аналогичные методы применяются при обработке изображений и радиосигналов. Исследования в области анализа Wi-Fi-сигналов показывают возможность обнаружения движений человека и оценки его положения по изменениям характеристик радиоканала. В отдельных экспериментальных системах на основе CSI (Channel State Information) выполняется оценка позы человека без использования обычной видеокамеры. Такие системы имеют ограничения по дальности, точности и условиям применения и пока не являются универсальной заменой традиционным средствам наблюдения.

В дальнейшем развитие сенсорных систем может быть связано с объединением данных от радиочастотных, акустических, оптических и других датчиков. Совместная обработка разнородных данных позволяет получать более полное представление о состоянии наблюдаемой среды. При этом возможности конкретной системы определяются физическими принципами используемых датчиков, характеристиками каналов связи и алгоритмами обработки.

Перспективные исследования также включают анализ физиологических сигналов человека. Однако утверждения о возможности определения мыслей или содержания внутренней речи по косвенным изменениям физиологических параметров требуют экспериментального под-

тверждения и не могут рассматриваться как установленная технология. Современные методы анализа биосигналов позволяют регистрировать отдельные физиологические реакции, но их интерпретация существенно зависит от условий эксперимента и используемых методов обработки данных.

## Литература

1. Армави́рца обвиняют в незаконном обороте специальных технических средств, предназначенных для негласного получения информации. URL: <https://krasnodarmedia.su/news/2027586/>.
2. Атака ИИ улавливает голоса с микрофонов. URL: <https://www.eenewseurope.com/en/ai-attack-picks-up-voices-from-mems-microphones/?hash=f8b21655375985>.
3. ИИ-атака позволяет подслушивать MEMS-микрофоны через стены. URL: <https://www.cta.ru/news/cta/181811.html>.
4. *Каушаров А.* Синхронизация по радиоканалу на примере систем, передающих эталонное время // Современная электроника. 2021. № 7. URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2021/2021-7/1378907>.
5. *Любимая Н.* Беспроводные локальные вычислительные сети связи. Новости мониторинговых решений // Современная электроника. 2023. № 7. С. 7–14.
6. «Росэлектроника» создала сейсмодатчики, способные чувствовать движение объектов за сотнями метров. URL: <https://ruselectronics.ru/news/24725-roselektronika-sozdala-seysmodatchiki-sposobnyechuvstvovat-dvizhenie-obektov-zasotni-metrov-/>.
7. Сообщено о технологии слежки за людьми с помощью Wi-Fi-роутера // Современная электроника. 2023. № 2. С. 51. URL: [https://www.soel.ru/magazines/PRINT/SoEl\\_2023-2pr/2/](https://www.soel.ru/magazines/PRINT/SoEl_2023-2pr/2/).
8. AI monitors wildlife behavior in the Swiss Alps. URL: <https://actu.epfl.ch/news/ai-monitors-wildlife-behavior-in-the-swiss-alps/>.
9. DensePose из Wi-Fi. URL: <https://arxiv.org/abs/2301.00250>.
10. Hackers could use smartwatches to eavesdrop on air-gapped computers via ultrasonic signals. URL: <https://techxplare.com/news/2025-06-hackers-smartwatches-eavesdrop-air-gapped.html>.





# К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Часть 6. Возбуждение плазмонов с помощью света и поверхностный плазмонный резонанс

Виктор Алексеев

Продолжаем серию статей о научном наследии Игоря Тамма. Основная идея этой серии заключается в том, чтобы показать, как постепенно шаг за шагом развивались научные идеи, высказанные Игорем Таммом почти сто лет назад.

В этой статье мы остановимся на истории открытия поверхностных плазмон-поляритонов (Surface Plasmon Polariton – SPP), а также эффекта поверхностного плазмонного резонанса (Surface Plasmon Resonance – SPR). Сегодня эти явления используются при разработке новейших сверхбыстрых электронно-оптических устройств и прецизионных ППР-сенсоров, позволяющих обнаруживать как органические, так и неорганические микропримеси в самых различных образцах.

## Введение

В этой статье сохранены первоначальные названия явлений и эффектов, использованных авторами цити-

руемых публикаций. Изложенные ниже исторические факты размещены в хронологическом порядке, соответствующем дате создания оригиналь-

ных работ. Такой подход позволяет более точно говорить о приоритете открытия описываемого феномена тем или иным автором, а также избежать самой распространённой ошибки исторических обзоров: объяснения старых работ с позиции современного знания.

В этот ранний период становления плазмоники устоявшаяся терминология ещё не сформировалась, поэтому в различных статьях, посвящённых опытам по облучению тонких пластинок электронами, а позднее – электромагнитным излучением, использовались такие термины, как Surface Collective Modes, Surface Plasma

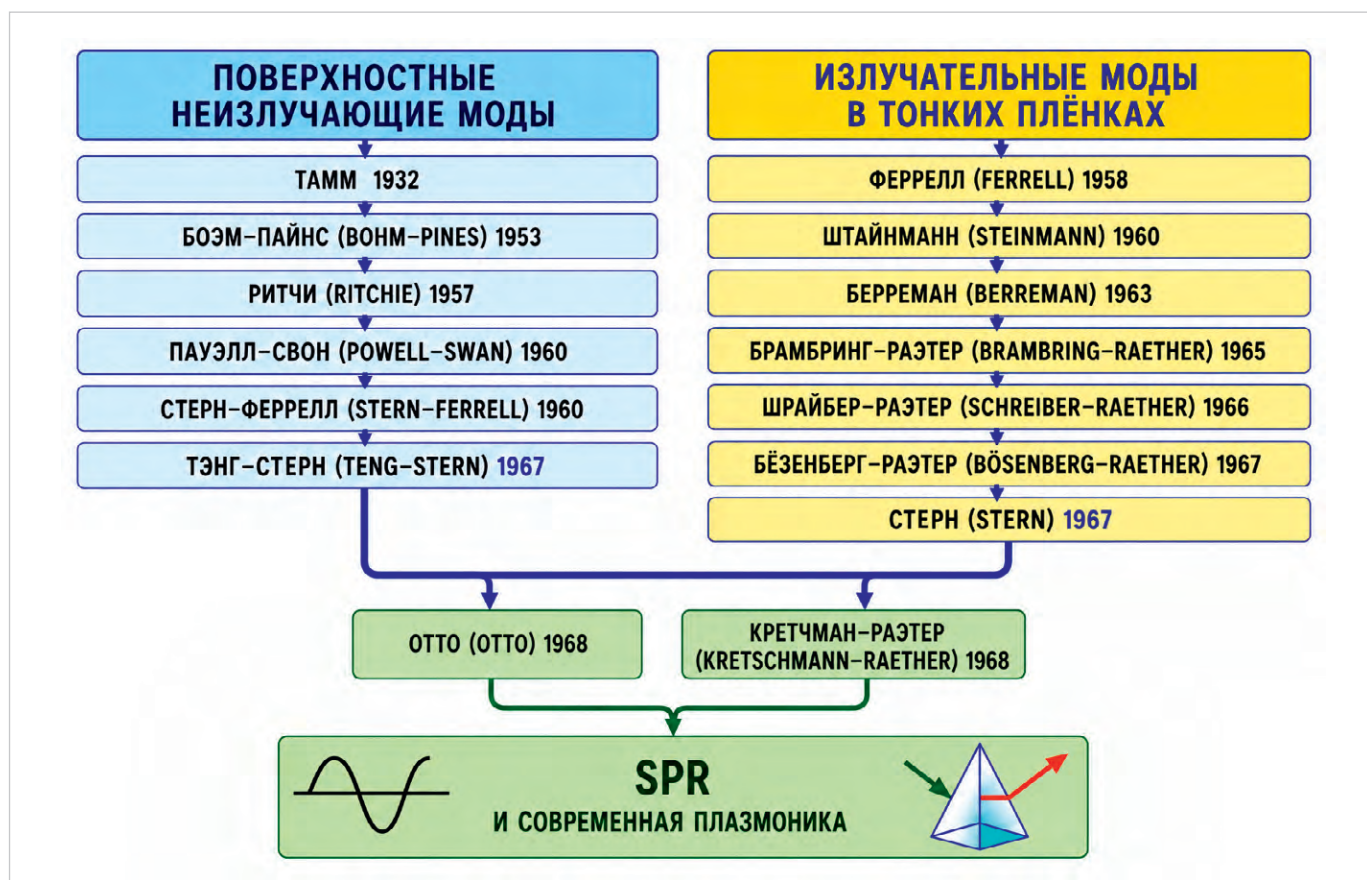


Рис. 1. Две независимые линии основных этапов развития исследований процессов плазменных колебаний в пограничной области между металлом и диэлектриком

Oscillation, Plasma Radiation, Plasma Mode. Однако эти термины не являются синонимами и относятся к двум различным категориям физических явлений, связанных с колебаниями вырожденного электронного газа в металлах.

На рис. 1 показаны два основных направления развития исследований коллективных плазменных возбуждений на границе раздела металла и диэлектрика. Левая ветвь берёт своё начало в статье Игоря Тамма о связанных состояниях электронов на поверхности кристаллов, опубликованной в 1932 году.

Основополагающие работы И.Е. Тамма были подробно рассмотрены нами в журнале «Современная электроника» № 7, 2025. История развития поляритонов и плазмонов обсуждалась соответственно в номерах № 4 и № 6. Поэтому здесь мы остановимся лишь на тех результатах, которые упустили в предыдущих статьях по чисто техническим причинам и которые непосредственно способствовали созданию методов оптического возбуждения поверхностных плазмонов.

Идеи Тамма позднее были развиты Пайнсом и Бомом. Своеобразный промежуточный итог подвёл Руфус Ритчи, опубликовавший в 1957 году статью, обобщившую накопленные к тому времени знания о возникновении плазменных мод [1]. Он доказал, что в тонкой металлической плёнке на границе раздела с диэлектриком могут возникать дополнительные коллективные электронные возбуждения (Surface Collective Modes – SCM). Важно то, что характерная частота SCM меньше собственной частоты объёмных плазмонов и в простейшем случае определяется соотношением  $\omega_s = \omega_p / \sqrt{2}$ . Это явление относится к разряду поверхностных электромагнитных волн, распространяющихся вдоль границы металл–диэлектрик с дисперсией  $\omega(k)$  и волновым числом  $k$ , превышающим волновое число фотона в вакууме ( $k > k_0$ ).

Вторая независимая параллельная ветвь исследований, представленная на рис. 1 справа, родилась позже, когда в 1958 году Р. Феррелл теоретически доказал, что в тонкой металлической плёнке при возбуждении быстрыми электронами могут возникать плазменные колебания радиационного типа (Radiative-Type Plasma Oscillations) [2]. При определённых условиях они

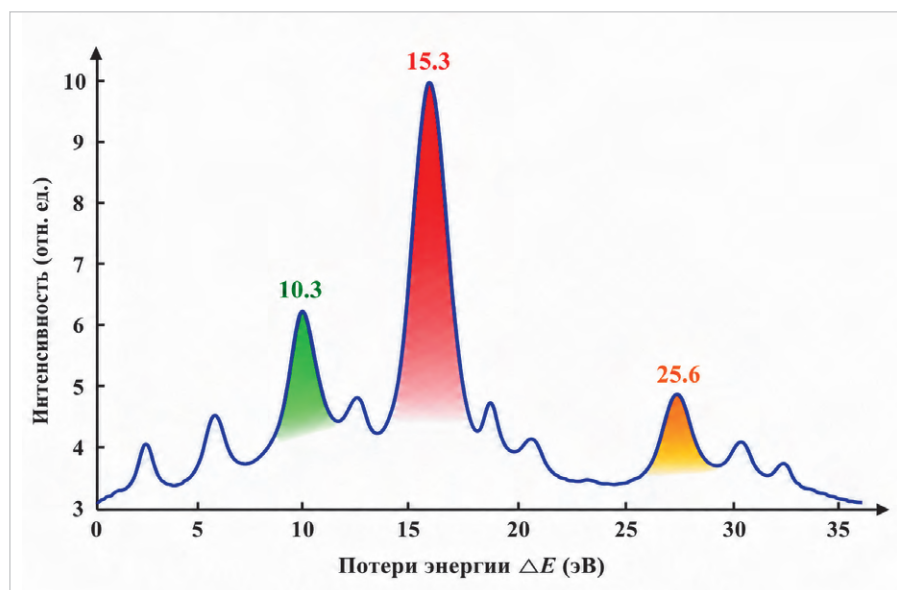


Рис. 2. Современная реконструкция характеристического спектра потерь энергии электронов в алюминии по экспериментальным данным С.Дж. Пауэлла и Дж. Б. Свана (1959 г.). Максимумы 10,3 эВ и 15,3 эВ соответствуют двум фундаментальным потерям энергии, а максимум 25,6 эВ – их комбинации (по рис. 1 оригинальной статьи)

испускают ультрафиолетовое излучение на плазменной частоте. При этом из возможных колебаний в плоскопараллельном слое электронного газа излучать может только мода, связанная с движением нормально к слою (Motion Normal to the Sab).

То есть, если быстрый электрон проходит через достаточно тонкую металлическую плёнку, он может возбудить коллективное колебание электронов проводимости. В особом диапазоне толщин эта плазменная мода способна отдать свою энергию наружу в виде фотона с частотой  $\omega_p$  и энергией  $\hbar\omega_p$ .

Необходимо подчеркнуть, что здесь речь идёт не о принятой сегодня трактовке поверхностных плазменных колебаний (ППО) на одной границе «металл–диэлектрик», а о радиационной плазменной моде тонкой металлической плёнки, возникновение и излучение которой связаны с обеими поверхностями свободно висящей металлической плёнки.

Мода, которая при этом возникает, колеблется на той же самой частоте, что и обычные объёмные плазмоны в толще металла. При этом излучать может только та мода колебаний, которая возбуждается нормально падающими и неупруго рассеянными плёнкой электронами. В этом случае движение электронного газа происходит перпендикулярно плоскости плёнки.

Важно отметить, что, в отличие от первого типа явлений, Surface

Collective Modes, Ferrell Modes не являются бегущими вдоль границы волнами.

В конце 1950-х годов теория Ритчи была подтверждена рядом экспериментов. К этому времени было известно, что при отражении или прохождении электронов через металлические плёнки часть электронов теряет строго определённые «порции» энергии. Особенно хорошо были известны два пика для алюминиевой фольги: один около 15 эВ и второй, низкоэнергетический, с максимумом ниже 10 эВ. Однако природа происхождения этих пиков оставалась предметом научных дискуссий. Среди многочисленных работ на эту тему выделяется статья физиков из австралийского университета University of Western Australia К. Дж. Пауэлла (С.Дж. Powell) и Дж. Б. Свана (J.B. Swan), опубликованная в журнале Physical Review, 1959 г. [3]. Статья начинается с подробного обзора опубликованных на тот момент времени результатов измерений характеристических потерь энергии при облучении алюминиевых плёнок быстрыми электронами. Сравнительный анализ этих данных показал, что различные исследователи находили низкоэнергетические максимумы в достаточно широком диапазоне от 6 эВ до 9 эВ, чаще всего около 7 эВ. При этом основной высокоэнергетический максимум оставался практически стабильным в районе 15 эВ. Большой разброс низко-



энергетического пика объяснялся как толщиной самой плёнки, так и окисным покрытием алюминия.

Авторы провели серию своих измерений. В отличие от других работ, эксперименты Пауэлла и Свона были выполнены в отражательной геометрии с использованием схемы Reflection EELS, специально предназначенной для более надёжного исследования поверхностных явлений.

Результаты их экспериментов показали наличие трёх ярко выраженных пиков потерь энергии 15,3 эВ; 10,3 эВ и 25,6 эВ, показанных на рис. 2 (рис. 2 является реконструкцией автора этой статьи, сделанной по экспериментальным данным [3]).

Пик 15,3 эВ Пауэлл и Свон связали с возбуждением объёмных плазменных колебаний алюминия. Пик 10,3 эВ был отнесён к плазменным потерям, возникающим в поверхностных слоях металла. Соотношение этих величин составляет 1,49. Эти величины были близки к теоретическим данным, полученным с помощью теории Ритчи (соотношение 1,41). Пик 25,6 эВ авторы не интерпретируют как самостоятельное возбуждение. Они показали, что спектр характеристических потерь энергии полностью состоит из комбинаций двух фундаментальных потерь: 10,3 эВ и 15,3 эВ. Поэтому пик 25,6 эВ интерпретировался ими как последовательное возбуждение поверхностной и объёмной плазменных потерь (10,3 эВ + 15,3 эВ).

Характерно, что в этой статье авторы ещё не используют современные термины Surface Plasmon или Surface Plasmon Oscillation. Вместо них встречаются выражения Low-Lying Losses, Plasma Losses, Surface Layers и Surface Phenomena, отражающие тот этап развития физики, когда поверхностная природа наблюдаемого эффекта уже была экспериментально установлена, но его современная интерпретация ещё только формировалась. Уже через несколько месяцев эти экспериментальные результаты получили теоретическое объяснение.

Весной 1959 года, а именно 30 апреля, на конференции APS (Американское Физическое Общество) профессор Университета Мэрилэнда (University of Maryland) Эдвард Стерн (Edward Stern) сообщил о своей новой теоретической модели, которая представляла собой развитие теории Ритчи [4]. В частности, на примере пиков потерь энергии

при облучении алюминиевой плёнки быстрыми электронами он объяснил один пик в районе 15 эВ возбуждением объёмной плазмы, а образование второго пика в районе 7 эВ – возбуждением колебаний поверхностной плазмы, предсказанной Ритчи (Excitation of Ritchie's Surface Plasma Oscillations). В докладе Стерн также показал основные математические детали своей теории. Полный текст доклада был направлен в редакцию «Physical Review» и получен журналом 7 марта 1960 года. Статья вышла в свет 1 октября 1960 года.

Благодаря обсуждениям между Пауэллом и Своном со Стерном, состоявшимся после его доклада на конференции APS, учёные договорились об экспериментальной проверке теории в Университете Западной Австралии. Австралийские физики оперативно провели эти эксперименты и уже в конце октября 1959 года направили статью с результатами в редакцию Physical Review. Эта статья была опубликована 1 мая 1960 года [5], то есть до выхода работы Стерна [6]. В своей публикации [5] Пауэлл и Свон в специальной сноске ссылаются на доклад Эдварда Стерна на конференции APS-1959 и выражают ему благодарность за предоставленные данные, позволившие провести экспериментальную проверку этой новой теории.

Поскольку теория утверждала, что если поверхностный плазмон действительно существует, то даже очень тонкий слой оксида должен изменить его энергию. Именно это и было целью эксперимента Пауэлла и Свана. Они измеряли характеристические потери электронов в зависимости от толщины оксида, образующегося на поверхности изначально чистых плёнок алюминия и магния. Их результаты показали, что поверхностное окисление быстро приводит к исчезновению низкоэнергетического пика потерь для обоих металлов, в то время как объёмный пик сохранялся. Этот вывод стал прямым доказательством того, что пик с низким уровнем энергии обусловлен именно поверхностными процессами, и он крайне чувствителен к чистоте металлической плёнки. Основные детали этой работы мы подробно рассмотрели в журнале «Современная электроника» № 5, 2026.

Описанные эксперименты были продублированы во многих лабораториях, и их результаты были призна-

ны в качестве «установленного научного факта».

Обращаясь вновь к ставшей теперь классической работе Э. Стерна и Р. Феррелла [6], нужно подчеркнуть, что именно здесь впервые одновременно появляются два новых понятия: Surface Plasma Oscillations – SPO, определяющее само поверхностное коллективное возбуждение вырожденного электронного газа (плазмы), и Surface Plasmons как определение квантов этого возбуждения. Причём авторы совершенно сознательно вводят второе понятие по аналогии с уже существовавшим термином Plasmon, относящимся к объёмным плазменным колебаниям. Кроме того, в этой работе впервые дано теоретическое обоснование возможности управления поверхностными плазмонами в многослойных структурах [6].

Основная идея физиков того времени, занимающихся проблемами поверхностных плазменных колебаний (в понимании модели Ритчи), заключалась в том, чтобы отказаться от сложного, дорогостоящего и небезопасного метода возбуждения с помощью быстрых электронов. Наиболее привлекательным было бы использование для возбуждения электромагнитного излучения (ЭМИ). Первые подобные эксперименты проводились по аналогии с известной схемой, в которой поток быстрых электронов был заменён сфокусированным световым лучом. Тонкие фольги из различных металлов облучались светом различных длин волн, различной интенсивности и поляризации. Измерялись по всем направлениям как отражённые, так и «прошедшие» сквозь фольгу сигналы. Однако подобные многочисленные эксперименты долгие годы не давали желаемого результата. Исследования поверхностных неизлучающих мод, распространяющихся вдоль границы металл–диэлектрик, были продолжены как в ряде теоретических работ, так и в ставших классическими экспериментах Отто и Кречмана.

Эти события последовательно рассмотрены в следующих разделах.

### **Возбуждение светом поверхностных плазменных колебаний на реальных металлических фольгах**

В начале 1960-х годов исследования плазменных колебаний интен-

сивно проводились во многих развитых странах мира. Одним из лидеров в этих исследованиях была в то время Германия. Экспериментальное подтверждение теории Ферелла (правая ветвь на рис. 1) было впервые получено в Мюнхенском университете (Physikalisches Institut der Universität München – LMU). В 1960 г. Вульф Штайнманн (Wulf Steinmann), ассистент профессора (будущий ректор LMU), опубликовал в журнале *Physical Review Letters* статью об экспериментальной проверке излучения, обусловленного плазменными колебаниями в тонких серебряных плёнках [7]. В этом эксперименте самонесущие тонкие серебряные плёнки, размещённые в вакуумной камере, облучали электронами с энергией 25 кэВ. Самонесущая тонкая серебряная плёнка (Self-Supported Silver Film) представляла собой очень тонкий слой серебра, который удерживался в рамке и не лежал на сплошной подложке. Такая конструкция позволяла обеспечить условия, при которых электрон входил с одной стороны, проходил через металлический слой и выходил в вакуум с другой стороны. При этом в плёнке возбуждались коллективные электронные колебания. Свет регистрировали кварцевым спектрографом со стороны падения электронов, что дало возможность работать в ультрафиолетовом диапазоне. В спектре излучения от серебра Штайнманн обнаружил довольно узкую линию при  $\lambda = 330 \pm 10$  нм, соответствовавшую энергии  $\hbar\omega_p = 3,75 \pm 0,1$  эВ. Кроме этой линии был широкий фоновый континуум с длинноволновой стороны. Для золотых плёнок при сопоставимом облучении подобной узкой линии не было обнаружено. Поскольку теория Ферелла предсказывала не просто наличие излучения, а конкретную зависимость фотонного выхода от толщины плёнки, Штайнманн провёл дополнительные опыты с облучением быстрыми электронами трёх самонесущих Ag-плёнок толщинами 45 нм, 85 нм и 150 нм. У плёнки толщиной 45 нм наблюдалась выраженная узкая линия около 330 нм, соответствующая первому максимуму фотонного выхода. Для плёнки толщиной 85 нм эта линия исчезала, что отвечало минимуму, близкому к нулю. В плёнке толщиной 150 нм линия около 330 нм появлялась вновь, однако её интенсивность была существенно меньше, чем у

плёнки толщиной 45 нм; это соответствовало второму максимуму предсказанной зависимости. Такая картина объяснялась тем, что электрон возбуждал колебание в плёнке, а волны и поля, связанные с двумя её поверхностями, при разных толщинах либо усиливали выход излучения, либо взаимно компенсировались. Именно такую картину предсказывала теория Ферелла для фотонного выхода.

Кроме того, Штайнманн, проанализировав спектр электронных потерь, нашёл низкоэнергетический пик около 3,4–3,6 эВ. Его форма и ширина совпадали с формой и шириной оптической линии. Данный факт автор объяснил тем, что если электрон возбуждал плазменные колебания, то должен был потерять энергию  $\hbar\omega_p$ . Однако, если эти плазменные колебания гасятся с испусканием ультрафиолета, фотон должен иметь ту же энергию, что и электрон. Таким образом, эксперименты Штайнмана подтвердили три вывода, вытекающие из модели Ферелла: серебряная плёнка с возбуждёнными плазменными осцилляциями испускала узкую УФ-линию около ожидаемой плазменной частоты; интенсивность линии зависела от толщины; энергия фотона совпадала с энергией плазменного возбуждения, найденной по потерям электронов.

В 1963 году молодой американский учёный Дуайт В. Берреман (Dwight W. Berreman), занимавшийся в Bell Labs проблемами спектроскопии кристаллов, обнаружил, что тонкие плёнки кубических ионных кристаллов диэлектриков обладают сильной полосой поглощения в ИК-диапазоне на частотах полярных продольных оптических мод (Polar Longitudinal Optic Modes, LO-мод) длинноволнового предела объёмного кристалла. Причём эта мода появлялась только при наклонном падении луча р-поляризованного света. Экспериментально Берреман наблюдал такую полосу в плёнках LiF (фторида лития). Её положение качественно согласовывалось с расчётом, основанным на известной дисперсии диэлектрической функции LiF. Интересно то, что этот эффект наблюдался как при прохождении света через плёнку, так и в отражении, даже если плёнка была нанесена на толстую металлическую или диэлектрическую подложку.

Необходимо отметить, что фторид лития является «идеальным» пред-

ставителем класса кубических ионных кристаллов-диэлектриков. Это классический представитель данной группы материалов. Связь между атомами лития и фтора практически полностью ионная. Кристалл состоит из чередующихся положительных ионов лития и отрицательных ионов фтора. Этот кристалл имеет очень широкую запрещённую зону, одну из самых больших среди всех твёрдых тел – около 13,6 эВ. Эти качества позволили Берреману создать упрощённую математическую модель взаимодействия с инфракрасным светом.

Свои результаты Берреман опубликовал в журнале *Physical Review* [8]. Нужно сказать, что данная статья представляет собой классический пример научного открытия, опередившего своё время. Научное сообщество не осознало её истинного масштаба, восприняв как частный, узкоспециализированный эффект в спектроскопии.

Много позже Берреман вошёл в историю науки в паре с Фереллом, поскольку оба эти великих физика независимо выявили один и тот же общий электродинамический принцип тонкой плёнки: в слое конечной толщины коллективное продольное возбуждение может стать доступным для внешнего света, хотя в объёмном материале оно обычно не связано с поперечной электромагнитной волной. У Ферелла таким возбуждением было электронное плазменное колебание тонкой металлической плёнки, а у Берремана это продольная оптическая фононная мода полярной диэлектрической плёнки. Несмотря на различие носителей колебания – электроны проводимости в металле и ионы кристаллической решётки в диэлектрике, – в обоих случаях решающими оказываются конечная толщина плёнки, продольное электрическое поле, нормальное к её поверхности, и область частот, в которой действительная часть диэлектрической проницаемости материала становится близкой к нулю.

Поэтому современная литература объединяет эти родственные радиационные тонкоплёночные возбуждения под названием «моды Ферелла–Берремана» (Ferrell–Berreman Modes).

Продолжая наш обзор с учётом даты публикации, мы переходим к декабрю 1965 года, когда в другом немецком научном центре – Институте прикладной физики (IAP) Гамбургского



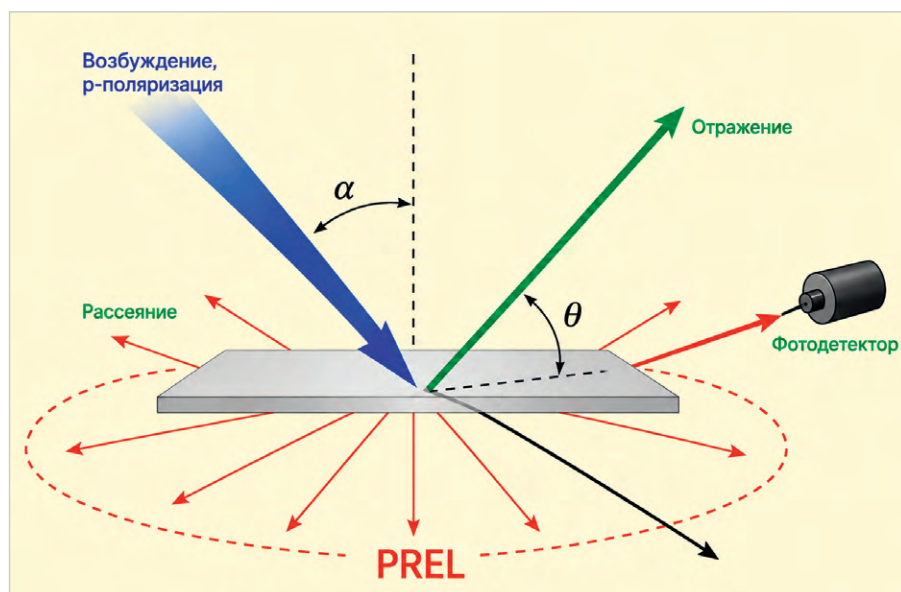


Рис. 3. Современная реконструкция схемы эксперимента Шрайбера и Раэтера (1966 г.) [11] по измерению углового распределения плазменно-резонансной эмиссии

университета (Institut für Angewandte Physik, Universität Hamburg – IAP) молодой докторант Йорг Брамбринг (Jörg Brambring) и его научный руководитель профессор Хайнц Раэтер (H. Raether) сообщили о первом успешном возбуждении светом излучающей плазменной моды (Radiative Plasma Mode) в тонкой серебряной плёнке [9].

В отличие от всех предыдущих экспериментов, где аналогичное излучение возбуждалось быстрыми электронами, авторы использовали в качестве источника возбуждения поляризованный «белый свет». При этом регистрировалось вторичное ультрафиолетовое излучение, которое сами авторы связывали с возбуждением радиационных плазменных колебаний серебряной плёнки.

Эксперименты показали, что отчётливый максимум излучения возникает при длине волны  $\lambda = 3275 \pm 15 \text{ \AA}$  ( $3,77 \pm 0,02 \text{ эВ}$ ), практически совпадающей с частотой объёмного плазмона серебра. Это излучение наблюдалось только при р-поляризации падающего света, когда электрическое поле имело составляющую, перпендикулярную поверхности плёнки. При s-поляризации указанный максимум полностью исчезал.

Авторы не ограничились регистрацией самого спектрального максимума. Были исследованы его угловое распределение, поляризация, зависимость интенсивности от толщины серебряной плёнки и температуры. Во всех случаях экспериментальные

результаты качественно совпали с расчётами Стерна – Феррелла [6] для радиационной плазменной моды. Обращает на себя внимание то, что Брамбринг и Раэтер предпочитали оперировать такими энергетическими понятиями, как Radiative Plasma Mode, Radiative Plasma Oscillation и Plasma Radiation. Это хорошо отражает переходный этап развития плазмоники, когда современная терминология ещё окончательно не сформировалась.

Работа Брамбринга и Раэтера стала первым экспериментальным подтверждением того, что радиационная плазменная мода Феррелла может возбуждаться не только быстрыми электронами, но и электромагнитным излучением. Вместе с тем она сразу поставила перед исследователями целый ряд новых вопросов. Действительно ли наблюдаемое излучение связано именно с коллективными плазменными колебаниями? Почему оно возникает только при определённой поляризации света? Какова роль толщины металлической плёнки? Почему максимум наблюдается только при определённых углах регистрации? Именно поиск ответов на эти вопросы определил дальнейшее направление исследований гамбургской школы Раэтера в последующие годы.

В середине октября 1966 года в журнале «Physics Letters» вышла статья сотрудников физического факультета Университета Мюнхена имени Максимилиана (Sektion Physik der Ludwig-

Maximilians-Universität München, LMU) В. Штайнманна (W. Steinmann), Й. Хофмана (J. Hofmann) и К. Штетмайера (K. Stettmaier), в которой были представлены результаты исследований плазменного излучения, возбуждаемого светом на поверхности серебряной фольги [10]. Журнал «Physics Letters», издаваемый «Elsevier» (Нидерланды), предназначен так же, как и «PRL», для печати коротких сообщений.

Опираясь на ранее опубликованные результаты группы IAP [9], Штайнманн с соавторами поставили перед собой задачу выяснить, не является ли зарегистрированное вторичное излучение разновидностью флуоресценции серебра. Для этого вместо широкополосного («белого») света они использовали монохроматическое излучение переменной длины волны. Проведённые эксперименты не выявили какого-либо энергетического сдвига между возбуждающим и испускаемым светом, что позволило авторам отвергнуть гипотезу о «плазменной флуоресценции». В качестве наиболее вероятного механизма возникновения наблюдаемого излучения было предложено рассеяние поверхностных плазмонов на тепловых колебаниях кристаллической решётки (Plasmon-Phonon Scattering).

Следует особо отметить, что и в названии, и в тексте статьи авторы уже используют термин Surface Plasmons, рассматривая поверхностный плазмон как самостоятельный физический объект, который может возбуждаться, рассеиваться и излучать.

В конце ноября 1966 года Шрайбер и Раэтер (IAP) направили в журнал «Zeitschrift für Naturforschung» короткую статью, в которой они показали, что при облучении светом тонкой серебряной пластинки наблюдалась световая эмиссия (Lichtemission) с плазменной частотой во всех направлениях [11]. Авторы специально вводят для этого эффекта собственный термин *Plasmaresonanzemission, angeregt durch Licht* – PREL (плазменно-резонансная эмиссия, возбуждаемая светом). Причём подчёркивается, что PREL – это самостоятельное явление эмиссии, а не просто переизлучение падающего света, и коренным образом отличается от плазменно-резонансной эмиссии, возбуждаемой электронами «*Plasmaresonanzemission, angeregt durch Elektronen* – PREE». То есть здесь

Раэтер воспринимает наблюдаемый свет как эмиссию, возникающую вследствие возбуждения плазменного резонанса, а не как простое вторичное рассеяние падающего фотона.

На рис. 3 показана схема усовершенствованной по сравнению с предыдущими экспериментами IAP установки, которая позволяла изменять направление наблюдения и измерять интенсивность вторичного излучения, распространявшегося в разные стороны от серебряной плёнки.

На рис. 3 обозначено: синяя стрелка – падающий свет; зелёная стрелка – отражённый свет; чёрная стрелка – свет, прошедший через пластинку; красные стрелки – «эмиссионное излучение», регистрируемое в разных направлениях.

Для уменьшения влияния фонового рассеяния авторы регистрировали отражённый, прошедший и эмиссионный сигналы вне плоскости падения, используя аппаратуру с высоким спектральным разрешением. В результате авторы впервые получили точный спектральный профиль линии PREL и измерили её основные параметры: максимум на длине волны  $\lambda_p = 3270 \pm 4 \text{ \AA}$  ( $3,792 \pm 0,005 \text{ эВ}$ ) и полуширина  $\Delta\lambda = 62 \pm 3 \text{ \AA}$ .

Нужно подчеркнуть, что эти данные хорошо согласуются с проведёнными примерно в это же время независимыми измерениями потерь энергии на серебряных плёнках с использованием монохроматических быстрых электронов, показавших для поверхностных потерь пик с максимумом  $3,63 \pm 0,02 \text{ эВ}$  и для объёмных потерь пик с максимумом  $3,78 \pm 0,02 \text{ эВ}$  [12]. Этот факт служит подтверждением того, что переизлучаемый свет связан с тем же самым плазменным резонансом, что наблюдался в другом типе экспериментов.

Другой важный результат, полученный в этой работе, показал, что при облучении плёнки узкополосным пучком с центральной несущей  $3261 \text{ \AA}$  (кадмиевая линия) возбуждалась только соответствующая узкая часть линии PREL без какого-либо спектрального сдвига или дополнительного уширения. Тем самым было подтверждено, что наблюдаемая широкая линия представляет собой совокупность множества независимых резонансных процессов, а не результат вторичного преобразования частоты падающего света. Следу-

ет подчеркнуть, что Раэтер и Шрайбер по-прежнему интерпретировали наблюдаемый эффект именно как процесс эмиссии. Поэтому главным нерешённым вопросом для них оставалось происхождение излучения, распространяющегося практически во всех направлениях. Если поверхность считать идеально гладкой, то излучение, возникающее вне направлений зеркального отражения и прохождения через плёнку, должно было взаимно гаситься благодаря интерференции. Именно эта проблема, а не сам факт существования PREL, являлась на тот момент центральным вопросом статьи.

С точки зрения истории развития дальнейших исследований несомненный интерес представляет сноска в конце этой статьи, которую стоит привести целиком: «Nach einer persönlichen Mitteilung von Prof. R. A. Ferrell und Prof. E. A. Stern ist es notwendig, die Rauigkeit der Oberfläche in Betracht zu ziehen». Буквальный перевод: «Согласно личному сообщению профессора Р.А. Феррелла и профессора Эдварда Стерна необходимо учитывать микронеровности поверхности». Смысл этой короткой фразы заключается в том, что уже в конце 1966 года Феррелл и Стерн считали необходимым учитывать микронеровности реальной поверхности металла (Rauigkeit), которая имеет микроскопические впадины и бугорки с размерами как минимум порядка нескольких нанометров и не может быть абсолютно гладкой. Именно здесь впервые появляется идея, которая через год легла в основу работы Эдварда Стерна о роли микронеровности поверхности «Oberflächen Rauhen». К этому вопросу мы вернёмся несколько позже, следуя хронологическому порядку обзора.

Следующей по времени стала публикация от 10 января 1967 года в журнале «Physical Review» статьи Кенета Клиевера (Kenneth L. Kliewer) и Рональда Фукса (Ronald Fuchs), в которой впервые была построена последовательная электродинамическая теория коллективных электронных возбуждений в тонкой металлической пластине конечной толщины [13]. В модели, учитывающей приближение свободного электронного газа, эти возбуждения связываются с излучательными полями вне пластины, образуя смесь «коллективно-

го движения электронов и фотонов (Mixture of Collective Electron Motion and Photons)». В результате решения системы стандартных уравнений Максвелла для тонкой металлической пластины конечной толщины с границами металл–диэлектрик был получен спектр собственных мод, содержащих как кванты коллективных колебаний свободных электронов внутри объёма проводника, так и моды поверхностных колебаний заряда, сопряжённых с электромагнитным полем.

Таким образом, Клиевер и Фукс впервые показали, что в металлической пластине наряду с обычными объёмными плазменными колебаниями существуют собственные поверхностные электромагнитные моды, связанные с внешним излучением. Эти коллективные электронные поверхностные моды (Collective Electronic Surface Modes, CESM) возникают вследствие взаимодействия коллективного движения электронов с фотонным полем.

Одним из ценных моментов в этой статье было то, что авторы получили дисперсионные соотношения (зависимость частоты от волнового числа) для всех коллективных мод металлической плёнки, включая поверхностные моды (Surface Modes) на каждой из границ. В отличие от более ранних, чисто электростатических моделей, в этой работе Клиевер и Фукс описывают CESM как полноценные электромагнитные волны с определённой дисперсией, связанные с внешним фотонным полем.

Это позволило проследить, как частоты и поля поверхностных мод зависят от толщины плёнки и диэлектрической проницаемости окружающей среды. Хотя статья Клиевера и Фукса носила исключительно теоретический характер и не содержала экспериментальных результатов, она сразу поставила перед исследователями практический вопрос: каким образом можно возбудить предсказанные поверхностные моды обычным светом?

Появление подобной электродинамической теории коллективных мод фактически подготовило почву для первых экспериментов по возбуждению поверхностных плазменных мод светом. К этому времени, в общем, было понятно, что для того, чтобы возбудить поверхностные плазменные колебания, необходим был про-



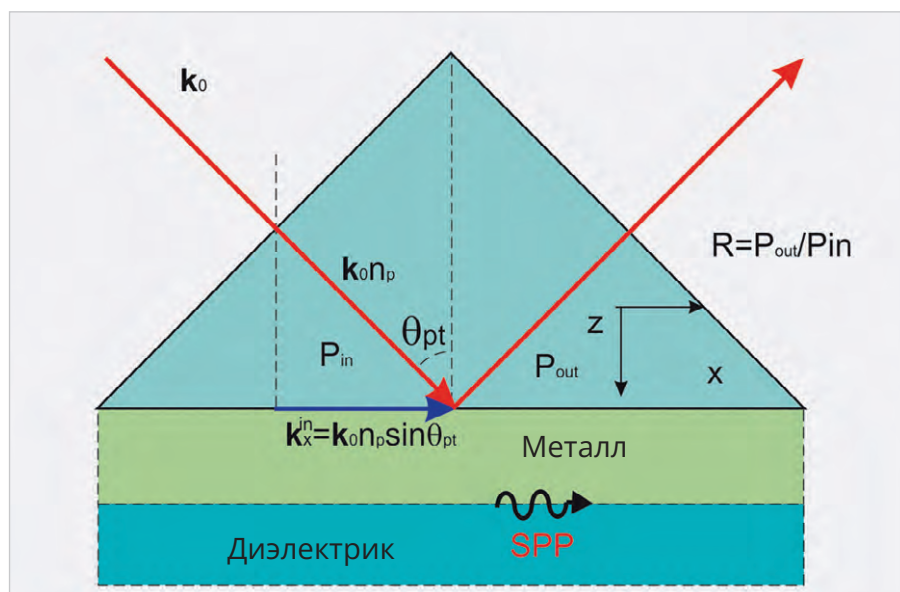


Рис. 4. Физический запрет на прямое возбуждение светом поверхностных плазменных колебаний «Импульсное несоответствие – Momentum Mismatch»

дольный импульс, превышающий тот, который может обеспечить фотон в воздухе. При фиксированной частоте волновое число (а значит, и импульс) поверхностных плазменных колебаний больше волнового числа фотона в воздухе. Поэтому прямое возбуждение поверхностного плазмона обычным светом невозможно ни в одном из спектральных диапазонов. Говоря простыми словами, фотону, который летит по идеальной прямой траектории и несёт слишком маленький продольный импульс вдоль поверхности, не хватало «сил», чтобы «разогнать» сильно прижатую к границе раздела сред волну поверхностных плазменных колебаний. Это и являлось основной причиной так называемого «импульсного несоответствия (Momentum Mismatch/Phase Matching)».

Основная техническая трудность заключалась в том, что частоту  $\omega$  можно было варьировать в широком диапазоне, используя весь спектральный диапазон падающего луча. Однако при этом нужно было как-то увеличить продольный импульс (рис. 4).

В марте 1967 года Безенберг и Раэтер (IAP) опубликовали в PRL результаты своих экспериментов, общая схема которых совпадала со схемами аналогичных установок, рассмотренных выше. Однако здесь авторы использовали в качестве мишени тонкую калиевую плёнку [14].

Авторы специально объясняют, почему после серебра они выбрали именно калий. В серебре положение плазменного резонанса существенно изменяет-

ся из-за межзонных переходов с участием 4d-электронов. В результате энергия наблюдаемого резонанса оказывается значительно ниже характерной энергии плазменных колебаний свободных электронов – около 3,7 эВ вместо примерно 9,2 эВ.

Поэтому серебро представляет собой довольно сложный объект для подобного рода экспериментов. Калий же ведёт себя как металл с квазисвободными электронами, причём его объёмная плазменная энергия достаточно мала – около 3,7 эВ, чтобы эксперимент можно было выполнить обычным оптическим способом. Для большинства других металлов энергия объёмного плазмона составляет 10–15 эВ, и для такого опыта уже потребовалось бы коротковолновое синхротронное излучение. Поэтому калий был выбран не просто как «другой металл», а как почти модельный металл свободных электронов.

В этой статье Безенберг и Раэтер прямо говорят о возбуждении объёмной плазменной моды на собственной частоте  $\omega_p$ , причём называют её Radiative Plasma Mode.

Тонкие плёнки калия толщиной 300–1000 Å наносили на подложку SiO<sub>2</sub> и облучали светом, спектр которого содержал плазменную частоту калия. При поляризации света в плоскости падения наблюдался выраженный максимум излучения 3,76 эВ в районе длины волны около 3300 Å. Это значение хорошо согласуется с экспериментально известной энергией объёмных потерь электронов в калии.

При перпендикулярной поляризации этот максимум исчезал, поскольку электрическое поле падающего света не имело составляющей, направленной по нормали к поверхности плёнки. В результате авторы пришли к выводу, что плазма свободных электронов, возбуждаемая светом, также проявляет эффект плазменно-резонансного излучения.

Таким образом, в результате многолетних исследований группа Раэтера пришла к фундаментальному выводу о том, что наблюдаемое плазменное излучение не является специфической особенностью серебра, а представляет собой более общее явление, характерное, по крайней мере, для различных металлов с выраженными плазменными свойствами.

Чтобы понять логику развития дальнейших исследований поверхностных плазменных колебаний, нужно вернуться к статье Шрайбера и Раэтера и вспомнить сноску в конце их статьи [11], в которой Стерн отметил, что для объяснения возникновения вторичного всенаправленного излучения нужно учитывать микронеровности, остающиеся на поверхности даже очень тщательно отполированной фольги.

Этот комментарий представляет собой документальное доказательство того, что идея Стерна о роли неидеально гладкой поверхности уже циркулировала как личная переписка за год до публикации его собственной статьи.

Вполне возможно, что эти идеи натолкнули Стерна на мысль попробовать сначала провести эксперименты с искусственной регулярной дифракционной решёткой. В августе 1967 года он вместе со своим аспирантом Йе-Юн Тэнг (Ye-Yung Teng) опубликовал в журнале «PRL» статью, в этой работе авторы сообщили о результатах своих экспериментов, в которых было обнаружено излучение на оптических частотах, исходящее от рифлёной металлической плёнки, первоисточником которых служили поверхностные плазменные колебания (Surface Plasma Oscillations – SPO) [15].

Прежде всего, авторы подчёркивают, что в их эксперименте речь идёт именно об SPO, описанных в статье Ритчи [1] (Non-Radiative), которые коренным образом отличаются от предсказанных Ферреллом [2] плазменных колебаний радиационного типа (Radiative-Type Plasma Oscillations RTPO) в тонких металли-

ческих плёнках, способных излучать электромагнитные волны на собственных УФ-частотах объёмного плазмона. Таким образом, основным предметом работы Тэнга и Стерна стали SPO, которые распространяются вдоль поверхности металла и в обычных условиях не связаны с излучающим электромагнитным полем. Эти типы SPO, теоретически предсказанные Ритчи, имеют длины волн порядка 10 Å. При коротких длинах волн частоты SPO практически не зависят от длины волны. Однако при больших длинах волн частота начинает уменьшаться таким образом, что фазовая скорость SPO вдоль поверхности остаётся немного меньше скорости света. Такие SPO не могут быть обнаружены аналогично излучательным модам (RTPO) в тонких плёнках, поскольку не вызывают каких-либо дискретных потерь.

На плоской поверхности SPO не излучают, поскольку их фазовая скорость меньше скорости света. Однако известно, что неоднородности поверхности могут сообщить поверхностному колебанию дополнительную тангенциальную компоненту волнового вектора и тем самым обеспечить его связь с распространяющимся электромагнитным полем. Стерн отметил такую возможность ещё в комментариях к монографии «Optical Properties and Electronic Structure of Metals and Alloys». Поэтому в работе [15] авторы использовали оптическую решётку из нержавеющей стали с 1200 канавками на миллиметр, на которую напыляли слой алюминия или серебра толщиной около 0,35–1,5 мкм. Решётку облучали потоком электронов с энергией 10 кэВ, направленных по нормали к поверхности, и регистрировали возникающее оптическое излучение.

Регулярная решётка с известным периодом давала известный дополнительный волновой вектор и тем самым позволяла связать направление наблюдаемого излучения с волновым вектором поверхностного колебания. При длине волны регистрируемого света 5400 Å в угловом распределении излучения наблюдались два выраженных максимума определённой поляризации. Появление двух максимумов было связано не с двумя различными типами плазменных колебаний, а с геометрией эксперимента. При небольшом угле между направлением штрихов решётки и плоскостью наблюдения условие

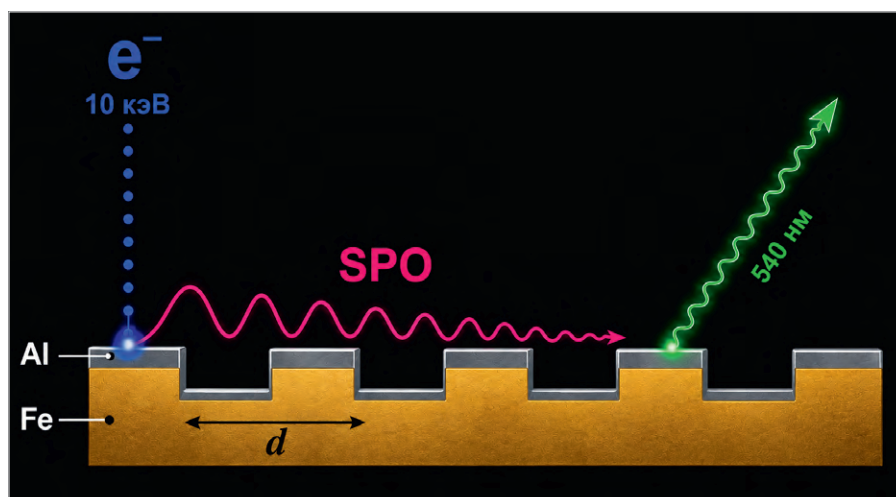


Рис. 5. Упрощённая схема возбуждения поверхностных плазменных колебаний электронным пучком и их преобразования в оптическое излучение на регулярной решётке

связи одного и того же SPO с излучающим электромагнитным полем выполнялось для двух различных направлений выхода света. Поэтому в угловом распределении возникали два максимума. При увеличении угла между штрихами решётки и плоскостью наблюдения расстояние между ними увеличивалось: один максимум смещался к нормали, а другой – от неё. Важно то, что их положение изменялось при изменении длины волны и ориентации решётки, но практически не зависело от энергии электронов в исследованном диапазоне 7–12 кэВ.

Авторы специально отметили, что наблюдаемое излучение не следует путать с известным эффектом Смита–Пёрселла, современная трактовка которого приведена в работе [16]. В классическом эксперименте Смита–Пёрселла электронный пучок проходит вдоль поверхности металлической дифракционной решётки, не сталкиваясь с ней. Движущееся вместе с электронами электромагнитное поле взаимодействует с периодической структурой решётки, в результате чего возникает излучение, параметры которого зависят от скорости электронов.

Процесс образования излучения 5400 Å, исходящего из алюминиевой плёнки с решёткой, схематически показан на рис. 5.

В эксперименте Тэнга и Стерна геометрия была принципиально иной: электроны падали по нормали непосредственно на массивную металлическую решётку. Проникая в металл, они теряли энергию в различных процессах, одним из которых могло быть

возбуждение распространяющихся поверхностных плазменных колебаний. После этого дальнейшая судьба такого колебания определялась уже свойствами металла и периодической структурой поверхности. Решётка сообщала SPO дополнительную тангенциальную компоненту волнового вектора, благодаря чему часть энергии поверхностного колебания могла преобразовываться в распространяющееся электромагнитное излучение.

При регистрации света с длиной волны 5400 Å (около 2,3 эВ) положение наблюдаемых максимумов не изменялось при варьировании энергии падающих электронов от 7 кэВ до 12 кэВ. При этом авторы специально отмечают, что зависимость интенсивности излучения от энергии электронов ими не исследовалась. Такое поведение служило дополнительным аргументом против объяснения наблюдаемого эффекта излучением Смита–Пёрселла и согласовывалось с предположением Тэнга и Стерна, что электроны возбуждали собственные поверхностные колебания металла, которые затем, благодаря периодической решётке, преобразовывались в оптическое излучение.

У регулярной решётки с периодом (d) имеется свой «пространственный спектр», которому соответствует набор дискретных «пространственных частот» вида  $G_m = 2\pi m/d$ , где гармоника принимает значения  $m = 1, 2, 3$  и т.д. Именно эти величины  $G_m$  рассматриваемые как векторы, направленные вдоль периодичности структуры, и называются векторами обратной решётки RL.V. Так называемая «обрат-



ная решётка» определяет воображаемое пространство, где расстояния измеряются в обратных величинах ( $1/\text{длина}$ ), а не в реальных метрах. Когда свет падает на периодическую структуру, она может добавить (или отнять) к тангенциальному импульсу света только одну кратную периоду решётки дискретную «порцию»  $Gm$ .

За счёт добавочного импульса, обусловленного вектором обратной решётки (Reciprocal Lattice Vector – RLV), поверхностная колебательная структура начинала излучать свет (Radiation) в оптическом диапазоне. Именно это излучение и регистрировалось экспериментально.

Используя известный период решётки и измеренные углы выхода излучения, авторы определили волновой вектор предполагаемых поверхностных плазменных колебаний и построили их дисперсионную зависимость  $\omega(k)$ . Полученные точки оказались близки к рассчитанной дисперсионной кривой поверхностных плазменных колебаний на плоской поверхности алюминия. На основании этого Тэнг и Стерн связали наблюдаемое излучение с возбуждением электронным пучком распространяющихся поверхностных плазменных колебаний, которые благодаря решётке получали возможность взаимодействовать с излучающим электромагнитным полем.

В этой же работе авторы провели дополнительный оптический эксперимент, который они рассматривали как проверку предложенной интерпретации. Решётку освещали светом той же длины волны и измеряли интенсивность зеркально отражённого излучения в зависимости от угла падения. В угловой зависимости отражения были обнаружены два провала, положения которых практически совпадали с положениями максимумов излучения, наблюдавшихся при электронной бомбардировке. Совпадали также поляризационные условия. Тэнг и Стерн интерпретировали эти результаты как проявление «обратного процесса» – возбуждения тех же поверхностных плазменных колебаний падающим светом через дифракционную решётку.

Следует, однако, осторожно относиться к такой интерпретации второго эксперимента. Непосредственно распространение поверхностной волны при оптическом возбуждении авторы не регистрировали. Наблюда-

лось лишь уменьшение интенсивности зеркально отражённого света при определённых углах падения. Поэтому результаты этого опыта можно рассматривать как дополнительное свидетельство в пользу предложенной авторами интерпретации, но не как прямое наблюдение оптического возбуждения и распространения поверхностной плазменной волны. Более однозначные эксперименты по оптическому возбуждению нерадиационных поверхностных плазменных волн появились несколько позднее.

Аналогичные результаты получили в своих экспериментах Джасперсон (S.N. Jaspersen) и Шнаттерли (S.E. Schnatterly). В докладе, сделанном весной 1967 года на Весенней сессии Американского Физического Общества 1967 г., они показали, что именно микронеровности на поверхности тонких серебряных пластин обеспечивают связь фотона с поверхностными плазменными колебаниями. Доработанный доклад авторы опубликовали значительно позже, в 1969 году [17].

В 1967 году почти одновременно появилось две статьи, посвящённые роли микронеровностей металлической плёнки в возбуждении поверхностных плазменных колебаний.

В начале декабря 1967 года в том же томе журнала «PRL», в котором была опубликована статья [15], появилась публикация Эдварда Стерна, но уже без соавторов [18]. «Plasma Radiation by Rough Surfaces (Излучение плазмы, обусловленное поверхностными неровностями)» – эту статью журнал получил 30 октября 1967 и разместил в журнале 4 декабря.

В это же время, а именно 18 августа 1967 года, редакция немецкого журнала «Zeitschrift für Naturforschung» получила статью физиков из (IAP) Кречмана (E. Kretschmann) и Раэтера (H. Raether) под названием «Zur Theorie der Plasmaresonanzstrahlung an rauhen Oberflächen» («К теории плазморезонансного излучения от микронеровностей поверхностей») [19]. При этом авторы ссылаются на работу Стерна как на «E.A. Stern, University of Washington, Plasma Radiation by Rough Surfaces, unveröffentlicht» – то есть «неопубликовано». Как было отмечено выше, эти двое учёных обменивались личными письмами, в одном из которых Стерн поделился своими мыслями о роли микронеровностей (см. примечание в статье [11]).

Учитывая это, мы приведём сначала краткое изложение работы [18].

Прежде всего, нужно подчеркнуть, что эта статья относится совсем к другой физической линии, чем рассмотренная выше статья Тэнга и Стерна [15]. На примере работ Брамбринга–Раэтера, Штайнмана и Безенберга Стерн анализирует экспериментально подтверждённые свойства излучательных мод в тонких плёнках (Plasma Mode on the Bulk Frequency – PMBF), теоретически предсказанных Ферреллом в 1958 году [2]. Таким образом, он ссылается на эксперименты, в которых на тонкую металлическую плёнку направляли свет и наблюдали рассеянное излучение на объёмной плазменной частоте. Во всех этих опытах освещали поверхность металлической фольги и регистрировали рассеянное излучение, направленное в стороны от траектории зеркального отражения. Интенсивность такого рассеянного излучения резко возрастала именно вблизи частоты объёмного плазмона данного металла. Например, для серебра это соответствует длине волны около 326 нм, то есть области ближнего ультрафиолетового (УФ) излучения, которое человеческий глаз не способен воспринимать.

Особенно важно, что Стерн предельно ясно подчёркивает: теоретически нет запрета на сам факт возбуждения плазменной моды даже в тонкой и идеально гладкой плоскопараллельной плёнке. Проблема здесь заключается не в самом возбуждении плазменной моды, а в том, что для тонкой плёнки, ограниченной абсолютно идеальными поверхностями, излучение может выйти только в направлениях отражения и прохождения, демонстрируя провал пропускания и максимум отражения. Чтобы объяснить реально наблюдавшееся излучение в других направлениях, необходимо было отказаться от идеально плоской поверхности.

Для того чтобы понять рассуждения авторов дальнейших работ, имеет смысл сделать небольшое замечание относительно терминологии. В оригинальных работах, о которых идёт речь, появились два новых термина: «Rauheit/Rauigkeit» на немецком в работе Раэтера и «Rough/Roughness» в работах Стерна на английском. Согласно одним из наиболее авторитетных словарей, немецкому Вильгельму Гримму «DWB» и английско-

му оксфордскому «OED», это древние слова, уходящие своими корнями в глубины веков и берущие своё начало от древнегерманского корня «Rauh». Как немецкий, так и английский термины имеют множество различных смысловых значений, которых в разы больше, чем у аналогичных слов в русском языке. Поэтому перевод зависит исключительно от контекста. Например, старинное «Rauhigkeit der Haut» означает «старая потрескавшаяся кожа на куртке ратника». Здесь вполне уместен русский перевод «шероховатость». Выражение «Rauhigkeit des Weges» или «Rauhigkeit des Landes» точно нельзя перевести как «шероховатость дороги» или «шероховатость рельефа».

Большой академический словарь русского языка определяет слово «шероховатость» как «небольшие неровности» (поверхности). В этом смысле оба термина – это синонимичные, взаимозаменяемые лексикографические единицы, перевод которых зависит от контекста. То есть использование терминов «шероховатость» или «неровность» поверхности вполне правомерно для каждого конкретного случая.

В статье Стерн предлагает свою модель, объясняющую рассеянное излучение от тонких плёнок, облучаемых светом. В этой модели неровности поверхности плёнки не являются механизмом возбуждения плазменной моды. Напротив, они обеспечивают возможность уже возбуждённой моде давать наблюдаемое рассеянное излучение. То есть Стерн развивает в этой работе ранее высказанную в статье [15] мысль относительно роли решётки в случае другого типа плазменных колебаний – SPO, где регулярные искусственные поверхностные выступы помогают «засветиться» нерадиационным поверхностным плазменным осцилляциям, добавляя импульс с помощью вектора обратной решётки (RLV).

Базовая предпосылка модели Стерна заключалась в том, что реальная фольга идеально гладкой не бывает. На её поверхности имеются небольшие бугорки и впадины, высота которых значительно меньше как длины волны излучения, так и толщины плёнки. Поэтому поля и токи в такой фольге можно в первом приближении считать такими же, как в идеально гладкой плёнке той же средней толщины.

Различие возникает главным образом непосредственно около неровностей поверхности. Именно связанные с ними локальные токи, направленные нормально к поверхности, Стерн рассматривает как небольшие излучающие диполи, способные направлять часть энергии в направлениях, отличных от обычного отражения и прохождения.

Поскольку точная форма и расположение всех микронеровностей реальной поверхности неизвестны, Стерн описал их статистически. Он ввёл корреляционную функцию поверхностных токов, характерная длина которой служила мерой среднего размера бугорков и впадин. В результате интенсивность рассеянного света определялась двумя факторами: диаграммой излучения отдельного элементарного диполя и пространственным распределением неровностей поверхности.

Используя обычные уравнения электродинамики и рассматривая Roughness как малое отклонение от идеально гладкой поверхности, Стерн получил выражение для мощности рассеянного излучения. Расчёт показал, что интенсивность такого излучения должна иметь выраженный максимум на объёмной плазменной частоте, определяемой условием  $\text{Re}\epsilon(\omega) = 0$ . Таким образом, микронеровности поверхности позволяли количественно объяснить наблюдавшийся в экспериментах пик рассеянного излучения. Более того, Стерн отметил, что такие измерения могут дать количественную информацию о микронеровностях поверхности металлических плёнок.

Таким образом, две рассмотренные работы 1967 года показывают две различные роли нарушения идеальной плоской поверхности. В работе Тэнга-Стерна [15] регулярная решётка обеспечивала связь распространяющихся нерадиационных SPO с излучающим электромагнитным полем. В работе Стерна [18] случайные микронеровности поверхности (Rough Surfaces) позволяли уже возбуждённой плазменной моде излучать в направлениях, отличных от обычного отражения и прохождения. В обоих случаях принципиальным оказалось одно обстоятельство: реальная или искусственно созданная неоднородность поверхности снимала ограничения, существующие для идеально плоской поверхности.

Предложенную Стерном идею о роли микронеровностей поверхности металлической плёнки в возникновении рассеянного плазморезонансного излучения развили в своей статье Кречман и Раэтер [19]. Авторы исходили из того, что при освещении тонкой металлической плёнки *p*-поляризованным светом возбуждаются поверхностные токи, колеблющиеся нормально к поверхности. На идеально гладкой плёнке их излучение взаимно компенсируется во всех направлениях, кроме отражения и прохождения. Реальная поверхность с естественными микронеровностями нарушает эту компенсацию, благодаря чему появляется излучение также и в других направлениях.

Кречман и Раэтер уточнили математическую модель Стерна и записали выражение для интенсивности рассеянного света через коэффициенты Френеля тонкой металлической плёнки. В отличие от формулы Стерна, их выражения учитывали дополнительный множитель, связанный с микронеровностями поверхности, и различали оптические условия на стороне отражения и на стороне прохождения. Полученная формула позволяла рассчитывать зависимость рассеянного излучения от длины волны, углов падения и наблюдения, толщины плёнки и статистических параметров случайных микронеровностей поверхности. Для проверки модели авторы использовали неопубликованные на тот момент экспериментальные данные П. Шрайбера для серебряных плёнок, напылённых на кварцевое стекло. Сопоставление расчёта с экспериментом показало хорошее совпадение. Характерная для этих измерений спектральная зависимость рассеянного излучения, отражения и прохождения света схематически показана на рис. 6.

Для описания случайных микронеровностей поверхности использовались два параметра: среднеквадратичная высота неровностей и корреляционная длина, характеризующая средний масштаб, на котором профиль поверхности сохраняет пространственную связь. Наилучшее согласие расчёта с экспериментом было получено при корреляционной длине около 1200 Å (120 нм). При этом соответствующая среднеквадратичная высота неровностей составляла около 50 Å (5 нм). Чтобы положение рас-



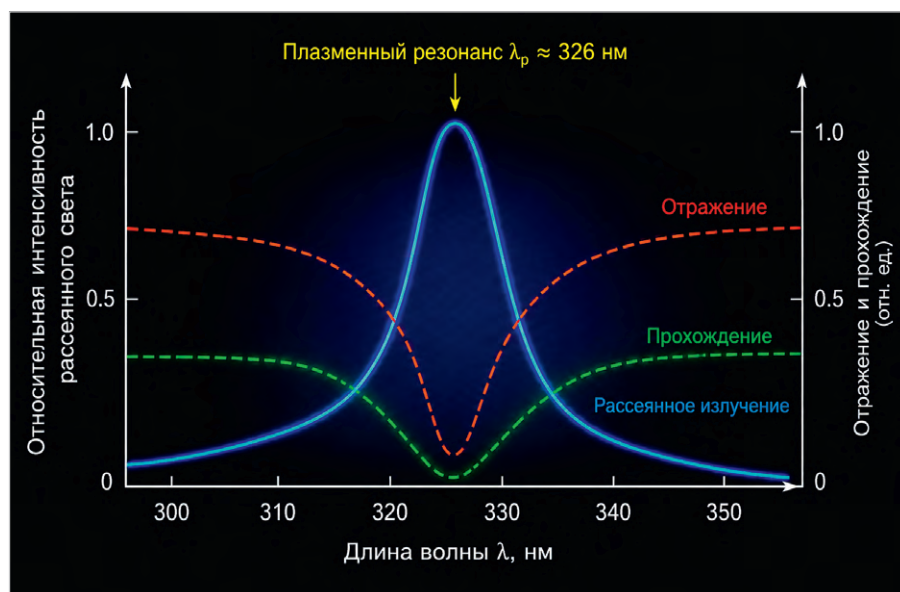


Рис. 6. Схематическое представление спектральных зависимостей рассеянного излучения, отражения и прохождения света вблизи плазменного резонанса серебряной пленки по данным Кречмана и Раэтера [19]

чётного и экспериментального максимумов совпало, авторы приняли для серебра плазменную длину волны  $\lambda_p = 3260 \text{ \AA}$  (326 нм).

Но самое интересное в этой заметке – объяснение происхождения острого резонансного пика. Кречман и Раэтер прямо показали, что сильный резонансный характер рассеянного излучения на плазменной частоте определяется множителем  $|1 - \epsilon^{-2}|^2$ , то есть непосредственно частотной зависимостью диэлектрической проницаемости металла. При этом множители, содержащие коэффициенты отражения и прохождения Френеля, вблизи плазменной частоты имеют не максимум, а минимум. Таким образом, наблюдаемый максимум нельзя объяснить обычным оптическим отражением или прохождением света через тонкую плёнку: его появление непосредственно связано с плазменными свойствами электронного газа металла.

Проведённые расчёты позволили авторам сделать ещё один важный вывод: интенсивность плазморезонансного излучения зависит не только от высоты неровностей, но и от их корреляционной длины. При одинаковой среднеквадратичной высоте сильнее излучает поверхность с большей корреляционной длиной. Более того, из полученной формулы следовало, что такое излучение возможно не только для тонкой фольги, но его может также обеспечить практически бесконечно толстый металл с неидеально гладкой поверхностью.

К аналогичным выводам, но с помощью совершенно другого математического аппарата, независимо пришли Р. Уилемс (R.E. Wilems) и Р. Ритчи (R.H. Ritchie) в статье «Quantum Theory of the Plasma Resonance Emission Process» [20]. Если Стерн рассматривал процесс в рамках классической электродинамики, то Уилемс и Ритчи предложили его квантово-механическое описание, рассматривая плазморезонансное излучение как результат взаимодействия фотонов с коллективными электронными возбуждениями металла. Несмотря на принципиально различный математический аппарат, оба подхода привели к согласующимся физическим выводам и тем самым дополнили друг друга.

Этой работой можно завершить первый этап истории исследований плазморезонансного излучения металлических поверхностей. К концу 1967 года стало понятно, что коллективные электронные колебания у поверхности металла могут взаимодействовать со светом, однако для эффективного возбуждения распространяющихся поверхностных плазменных колебаний светом оставалась нерешённой главная проблема – несоответствие их волновых векторов. Следующий принципиальный шаг состоял уже не в использовании регулярных дифракционных решеток и микронеровностей неидеальной поверхности пленки, а в создании специальных оптических схем.

## Возбуждение поверхностных неизлучательных плазменных волн с помощью света

Первым, кому удалось возбудить светом неизлучательные поверхностные плазменные волны (Nonradiative Surface Plasma Waves – SPW) на гладкой поверхности металла, был Андреас Отто (Andreas Otto) из Мюнхенского университета. В августе 1968 года в журнале «Zeitschrift für Physik» была опубликована его фундаментальная работа с весьма точным названием «Excitation of Nonradiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection» [21].

Сегодня идея эксперимента Отто кажется чрезвычайно простой. Однако в то время она была принципиально новой. Как отмечал сам Отто, фазовая скорость неизлучательной поверхностной плазмонной волны на границе металл–вакуум меньше скорости света в вакууме. Поэтому свет, падающий непосредственно на идеально гладкую поверхность металла, не может возбудить такую волну. Говоря современным языком, не выполняется условие согласования волновых векторов – возникает так называемое «несоответствие импульсов» (Momentum Mismatch).

Для возбуждения SPW необходимо согласовать продольную, параллельную поверхности металла, компоненту волнового вектора возбуждающего электромагнитного поля с волновым вектором поверхностной плазмонной волны. Отто предложил решить эту задачу с помощью призмы с высоким показателем преломления и возникающей при полном внутреннем отражении эванесцентной волны.

Принцип предложенного Отто метода и схема его экспериментальной установки показаны на рис. 7.

В конфигурации Отто призма с высоким показателем преломления не соприкасается непосредственно с металлом. Между призмой и поверхностью серебра оставлен тонкий воздушный зазор толщиной  $d$ . Именно наличие этого промежуточного слоя принципиально для метода: эванесцентное поле, возникающее при полном внутреннем отражении в призме, проникает через воздушный зазор и достигает поверхности металла.

Свет направлялся в кварцевую призму под углом, соответствующим обла-

сти полного внутреннего отражения. В эксперименте изменяли угол падения и толщину воздушного зазора между призмой и серебром. Измерения проводились для пяти длин волн видимого диапазона: 406 нм, 436 нм, 495 нм, 546 нм и 578 нм, а также для нескольких значений толщины воздушного зазора. При этом авторы сравнивали отражение света с двумя взаимно перпендикулярными поляризациями.

Главный результат эксперимента проявлялся чрезвычайно наглядно. При определённом угле падения интенсивность отражённого света с ТМ-поляризацией резко уменьшалась. Для ТЕ-поляризации такого резонансного провала не наблюдалось. Отто связал уменьшение отражения с передачей энергии падающей электромагнитной волны поверхностной плазмонной волне. Таким образом, полное внутреннее отражение как бы «нарушалось»: часть энергии уходила на возбуждение SPW. Именно поэтому Отто назвал предложенный способ методом «Frustrated Total Reflection».

Физический смысл метода особенно хорошо виден, если рассмотреть компоненту волнового вектора, параллельную поверхности металла. Изменяя угол падения света в призме, можно изменять эту компоненту до тех пор, пока фазовая скорость эванесцентной волны не совпадёт с фазовой скоростью SPW. При выполнении этого резонансного условия энергия электромагнитного поля эффективно передаётся поверхностной плазмонной волне.

Эванесцентное поле экспоненциально уменьшается по мере удаления от поверхности призмы. Поэтому величина воздушного зазора  $d$  становится одним из важнейших параметров эксперимента: если поверхность серебра расположена достаточно близко к призме, эванесцентное поле достигает металла и может возбуждать SPW. Отто специально исследовал зависимость глубины и ширины резонанса от толщины воздушного зазора.

Таким образом, Отто впервые реализовал оптическое возбуждение неизлучательной поверхностной плазмонной волны на гладкой поверхности металла без использования шероховатости или дифракционной решётки. Энергия света передавалась SPW посредством эванесцентного поля

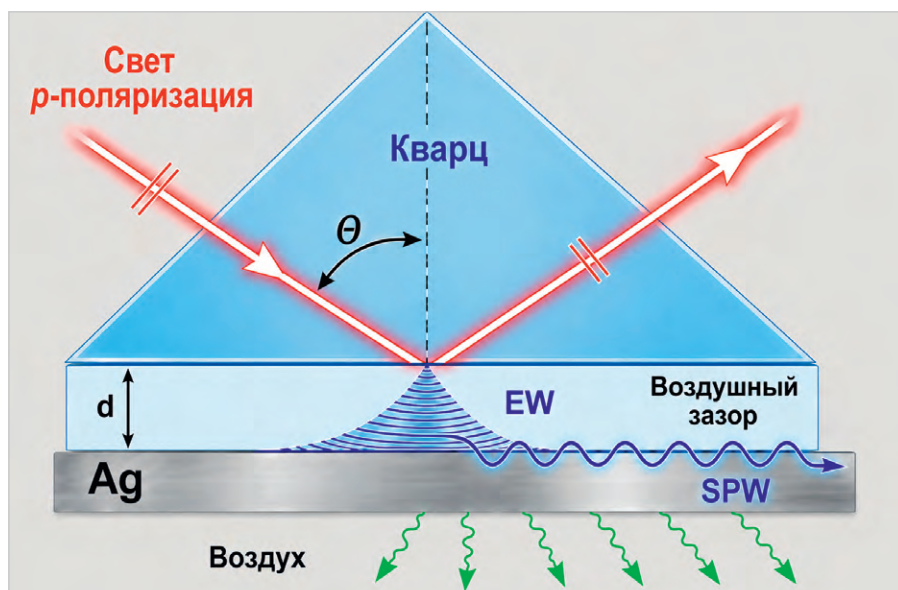


Рис. 7. Упрощённая схема возбуждения неизлучательной поверхностной плазмонной волны (SPW) в конфигурации Отто. Эванесцентная волна (EW), возникающая при полном внутреннем отражении света в призме, проникает через воздушный зазор и возбуждает SPW на поверхности серебра

через воздушный зазор, а экспериментальным признаком резонанса служил резкий провал интенсивности отражённого ТМ-поляризованного света.

Однако значение работы Отто этим не ограничивалось. Измеряя угол, при котором наблюдался минимум отражения для различных длин волн, Отто определял волновой вектор SPW и экспериментально построил её дисперсионную зависимость. Тем самым предложенная им схема стала не только способом оптического возбуждения поверхностных плазмонных волн, но и новым методом их спектроскопического исследования.

Следующий принципиальный шаг был сделан Э. Кречманом (E. Kretschmann) и Х. Раэтером (H. Raether) в работе «Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light», поступившей в редакцию 15 ноября 1968 года [22]. В самом начале короткой двухстраничной статьи авторы чётко разделили поверхностные плазменные волны на два типа. К первому они отнесли неизлучающие моды, фазовая скорость которых  $\omega/k$  меньше скорости света  $c$  и которые поэтому в обычных условиях не могут непосредственно переходить в фотоны. Ко второму типу были причислены излучающие моды с  $\omega/k > c$ , способные непосредственно взаимодействовать со светом. Цель нового эксперимента была сформулирована предельно кон-

кретно: показать, что неизлучающая поверхностная мода, возбуждённая не электронным пучком, а светом, также может излучать.

Схема опыта Кречмана показана на рис. 8.

Для возбуждения такой моды Кречман и Раэтер использовали неоднородную световую волну, возникающую при полном внутреннем отражении света в кварцевой призме. На одну из граней призмы непосредственно напылялась серебряная плёнка толщиной около 800 Å (80 нм). Падающий свет ксеноновой лампы был поляризован параллельно плоскости падения. При полном внутреннем отражении р-поляризованного света на границе кварц–Ag возникает эванесцентное поле (Evanescant Field – EW), проникающее через тонкую плёнку серебра. Оно не переносит энергию от границы вглубь второй среды, а его амплитуда экспоненциально уменьшается при удалении от этой границы на расстояние порядка длины волны. При выполнении условия согласования волновых векторов это поле возбуждало неизлучающие поверхностные плазменные колебания на противоположной границе раздела серебро – воздух. Физический смысл использования призмы состоял именно в решении проблемы, которая до этого препятствовала непосредственному возбуждению распространяющихся поверхностных плазмонов светом. Продольная составляющая волнового



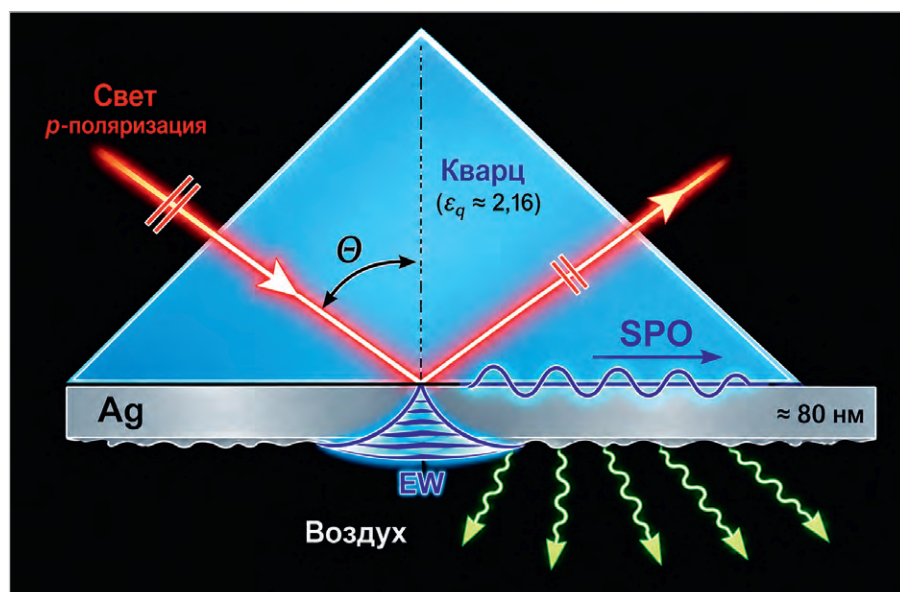


Рис. 8. Упрощённая схема возбуждения поверхностных плазменных колебаний в геометрии Кречмана-Раэтера

вектора света в кварце больше, чем у света той же частоты в воздухе. Изменяя угол падения света внутри призмы, можно было изменять эту составляющую и добиться её совпадения с волновым вектором поверхностной плазменной моды. Кречман и Раэтер показали, что при использованном ими кварце такое возбуждение становится возможным при углах полного внутреннего отражения больших, чем примерно  $43^\circ$ . Дисперсионная диаграмма, приведённая авторами, наглядно показывает, что таким способом можно возбудить неизлучающую моду на границе Ag/воздух, тогда как мода на границе Ag/кварц светом в данной геометрии не возбуждается.

Однако эксперимент на этом не заканчивался. Возбуждённая на границе Ag/воздух неизлучающая поверхностная мода сама по себе не могла свободно превратиться в фотон. Здесь снова стали играть роль реальные микронеровности металлической поверхности. Её пространственные компоненты изменяли волновой вектор плазмона, переводя часть возбуждения в область, где становилось возможным излучение света. Таким образом, в одном эксперименте оказались объединены два механизма, которые до этого рассматривались в значительной степени отдельно: призма обеспечивала возбуждение светом неизлучающего поверхностного плазмона, а микронеровности поверхности обеспечивали его последующее превращение в регистрируемое излучение.

Эксперимент подтвердил именно такую картину. Снаружи призмы, со стороны воздуха, располагались монохроматор и фотоумножитель, которые можно было поворачивать относительно нормали к поверхности серебряной плёнки. Это позволяло одновременно исследовать спектральную и угловую зависимости возникающего излучения. При р-поляризации авторы обнаружили два спектральных максимума. Первый, около  $3200 \text{ \AA}$  ( $320 \text{ нм}$ ), практически не зависел от угла падения и наблюдался также при перпендикулярной поляризации. Его авторы объяснили обычным рассеянием света на границе серебро-кварц в области максимальной прозрачности серебряной плёнки.

На рис. 9 показана спектральная зависимость интенсивности излучения, регистрируемого со стороны воздуха, для различных углов падения света. Сплошные кривые соответствуют р-поляризации, пунктирная – s-поляризации. Первый максимум около  $320 \text{ нм}$  ( $\approx 3200 \text{ \AA}$ ) практически не изменяет своего положения при изменении угла и наблюдается при обеих поляризациях; он связан с рассеянием света на границе Ag/кварц в области максимальной прозрачности серебряной плёнки. Второго максимума (SPO) наблюдается только при р-поляризации. При изменении угла падения его положение смещается по спектру в соответствии с дисперсионным соотношением неизлучающей поверхностной моды на границе Ag/воздух.

Особенно интересно, что Кречман и Раэтер прямо сопоставили свой эксперимент с опубликованной в том же году работой Андреаса Отто. Они отметили, что измерения Отто аналогичны регистрации плазморезонансного поглощения, тогда как их собственный эксперимент соответствует регистрации плазморезонансного излучения. Тем самым к концу 1968 года появились два взаимодополняющих экспериментальных подхода, использующих полное внутреннее отражение в призме для оптического возбуждения неизлучающих поверхностных плазменных мод.

Эта работа особенно важна для дальнейшей истории SPR. В предыдущих экспериментах решётка или случайные микронеровности поверхности обеспечивали недостающий волновой вектор. Теперь было экспериментально показано, что эту задачу можно решить чисто оптическим способом: с помощью призмы и полного внутреннего отражения. Именно этот принцип вскоре стал основой широко используемой призмной схемы возбуждения поверхностных плазмонов.

В 1969 году Э. Экономоу (E.N. Economou) опубликовал работу «Surface Plasmons in Thin Films», в которой последовательно рассмотрел поверхностные плазменные колебания (SPO) на границе металл-диэлектрик и в системах из нескольких металлических и диэлектрических слоёв. В отличие от ранних работ Ритчи и Феррелла, основанных на электростатическом приближении, Экономоу использовал полную систему уравнений Максвелла и тем самым непосредственно учёл эффекты запаздывания (ретардации). Именно влияние ретардации на дисперсию поверхностных мод было одной из центральных задач этой работы [23].

Особенно важным для дальнейшего развития плазмоники оказался анализ тонкой металлической плёнки, ограниченной диэлектриками с двух сторон. Поверхностные колебания на двух границах такой плёнки уже нельзя рассматривать независимо; они взаимодействуют и образуют две ветви: симметричную и антисимметричную. Чем тоньше плёнка, тем сильнее взаимодействие между её поверхностями и тем заметнее различаются эти ветви. Для достаточно толстой плёнки поверхности практически перестают

взаимодействовать, и обе моды приближаются к поверхностному плазмону отдельной границы металл–диэлектрик.

При этом Экономоу получил принципиально важный результат, непосредственно связанный с обсуждаемыми нами работами Феррелла. Он показал, что учёт ретардации существенно изменяет поведение обеих мод тонкой металлической плёнки при малых волновых векторах. В частности, верхняя ветвь, вопреки сделанной ранее Ферреллом оценке, не начинается при ( $k = 0$ ) на частоте объёмного плазмона ( $\omega_p$ ), а выходит из начала координат и остаётся ниже световой линии  $\omega = ck$ . Экономоу специально подчеркнул, что рассуждение Феррелла при  $k = 0$  фактически относится к объёмной моде, которая действительно не изменяется при учёте ретардации, но не к поверхностному плазменному колебанию.

Это различие оказалось существенным и для интерпретации экспериментов по излучению. Экономоу подчеркнул, что обычные неизлучающие SPO, фазовая скорость которых меньше скорости света, сами по себе не могут давать вклад в наблюдаемое электромагнитное излучение. Для их превращения в распространяющуюся световую волну необходим дополнительный механизм, например, рассеяние на неровностях поверхности. В более сложных многослойных структурах, однако, Экономоу обнаружил также излучательные ветви SPO, способные непосредственно проявляться в спектрах излучения.

В 1971 году Эрвин Кречман (Erwin Kretschmann) вернулся к предложенной им совместно с Х. Разтером в 1968 году призмной схеме возбуждения поверхностных плазменных колебаний. Однако теперь цель работы была иной. Если в 1968 году принципиально важно было показать возможность оптического возбуждения неизлучающей поверхностной моды, то в статье 1971 года Кречман использовал этот эффект уже как основу измерительного метода. Это прямо отражено в названии работы – «Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächenplasmaschwingungen» – «Определение оптических констант металлов путём возбуждения поверхностных плазменных колебаний» [24].

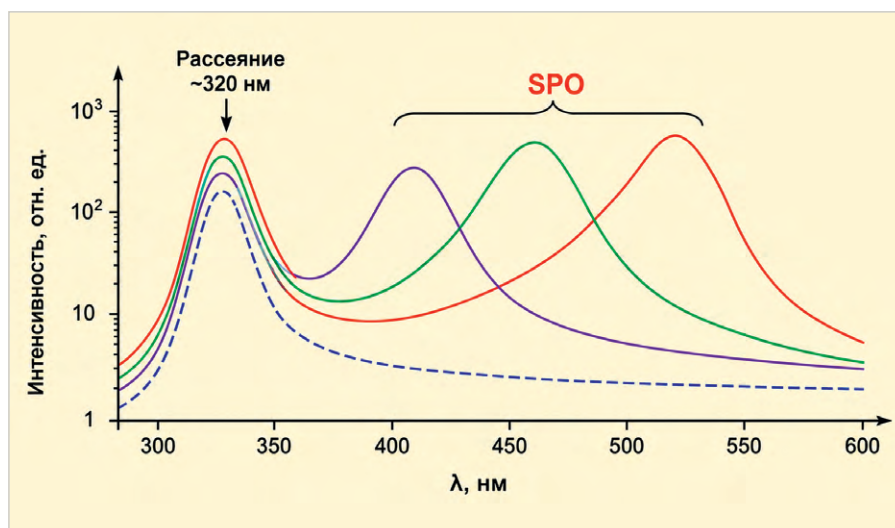


Рис. 9. Спектральная зависимость излучения в эксперименте Кречмана–Разтера. Максимум около 320 нм связан с рассеянием света, положение максимума SPO зависит от угла падения. Упрощено по [22]

В работе 1971 года основным измеряемым параметром становится уже не само появление излучения, как в эксперименте 1968 года, а зависимость интенсивности отражённого  $p$ -поляризованного света от угла падения. При резонансном возбуждении поверхностного колебания на этой зависимости возникает характерный глубокий минимум. Его положение и форма определяются оптическими свойствами металлической плёнки и поэтому могут использоваться для определения её оптических констант (рис. 10).

В этой статье Кречман показал, что положение и форма резонансного минимума определяются комплексной диэлектрической функцией металла  $\epsilon(\omega)$ . Это позволило использовать резонансное возбуждение поверхностных плазменных колебаний для экспериментального определения оптических констант металлических плёнок.

Падающий свет направляется на плёнку со стороны призмы под углом  $\theta$ , превышающим критический угол полного внутреннего отражения. По сравнению с методом Отто, схема Кречмана существенно упростила возбуждение поверхностных плазменных колебаний светом: в ней отсутствовал воздушный зазор, изменение толщины которого на доли длины волны заметно изменяло ширину и глубину резонанса (рис. 11).

Фиксированная толщина плёнки в конструкции Кречмана позволила использовать этот метод для прецизионного определения оптических

констант металлов. По положению и ширине резонансного минимума в отражённом свете можно было вычислить комплексную диэлектрическую проницаемость материала с гораздо большей точностью, чем позволяли это сделать в то время другие методы. При определённом угле падения  $\theta$  выполняется условие согласования импульсов  $k_{||} = k_{sp}$ , то есть компонента волнового вектора падающего света, параллельная границе раздела, совпадает с волновым вектором поверхностного плазмонного колебания. Энергия света при этом передаётся поверхностному плазмонному колебанию, что проявляется как резкий минимум отражения.

Резонансное возбуждение происходит на внешней границе металлической плёнки, где поле поверхностного колебания проникает в прилегающую диэлектрическую среду. Поэтому положение резонансного минимума оказывается чувствительным к изменению показателя преломления этой среды – свойству, которое позднее стало основой сенсорных применений SPR.

Кроме того, схема Кречмана оказалась технологически простой и удобной для практической реализации, что впоследствии способствовало её широкому использованию в оптических измерениях и SPR-сенсорах.

Сам Кречман использовал выражение «Anregung von Oberflächenplasmaschwingungen» – «возбуждение поверхностных плазменных колебаний», а процесс описывал как резонансное возбуждение (Resonanzanregung). Термин Surface Plasmon Resonance (SPR) в



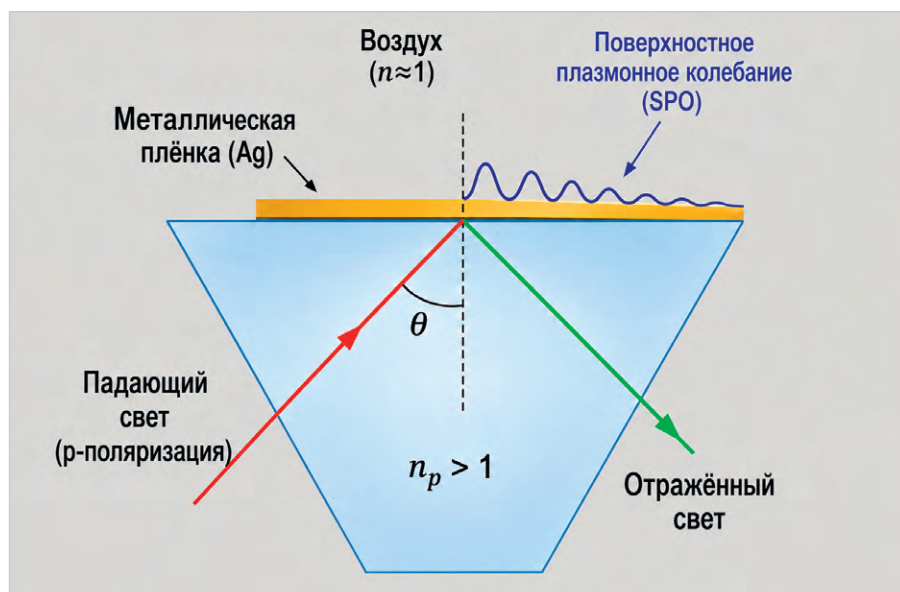


Рис. 10. Структурная схема установки, поясняющая принцип эксперимента Кречмана (1971 г.)

статье 1971 года ещё не использовался; он закрепился в научной литературе позднее как название метода, основанного на регистрации этого резонанса.

В современной плазмонике SPR (ППР) – высокочувствительный оптический метод исследования приповерхностного слоя, основанный на регистрации резонансного минимума отражения при возбуждении поверхностных плазмон-поляритонов *p*-поляризованным светом. Изменение показателя преломления среды у поверхности металла приводит к смещению положения этого минимума.

В заключение этого раздела нужно отметить, что результаты рассмотренных выше теоретических и экспериментальных работ постепенно привели физиков к пониманию того, что распространяющееся вдоль границы металл–диэлектрик поверхностное плазменное возбуждение нельзя рассматривать только как колебание свободного электронного газа. В нём коллективное движение электронов, связанное с электромагнитным полем, локализованным у поверхности, свидетельствует о возникновении нового гибридного состояния света и вещества.

Таким образом, складывалась картина, указывающая на возникновение в системе гибридного состояния, в котором электромагнитная волна локализована у поверхности, электронный газ участвует в коллективных колебаниях, а энергия и импульс распределены между светом и веществом. Аналогичные свойства наблюдались при

образовании экситон-поляритонов и фонон-поляритонов, о которых мы рассказывали в «Современной электронике» № 4, 2026.

Позже, в середине 1970-х, подобные гибридные возмущения света и коллективных колебаний свободных электронов получили название поверхностных плазмон-поляритонов (Surface Plasmon Polaritons – SPP).

Практическим итогом рассмотренных выше работ стало создание нового класса высокочувствительных оптических приборов – сенсоров поверхностного плазмонного резонанса (SPR-сенсоров). В основе большинства таких устройств лежит идея Отто – Кречмана: возбуждение поверхностного плазмона *p*-поляризованным светом и регистрация возникающего резонансного минимума отражения.

Электромагнитное поле поверхностного плазмона сосредоточено вблизи границы металл–диэлектрик и поэтому чрезвычайно чувствительно к изменению показателя преломления прилегающей среды. Даже небольшое изменение её состава приводит к смещению резонансного угла или длины волны, которое и становится измеряемым сигналом.

Особенно широкое распространение получили SPR-биосенсоры. На чувствительную поверхность наносят специальные реагенты, избирательно связывающие определяемые молекулы. Их захват изменяет показатель преломления приповерхностного слоя и соответственно положение SPR-минимума. Это позволяет в реальном времени

исследовать молекулярные взаимодействия без использования специальных флуоресцентных или радиоактивных меток. Сегодня SPR-сенсоры применяются в медицинской диагностике, контроле пищевых продуктов и воды, разработке лекарственных препаратов, а также в различных химических и технологических измерениях.

Таким образом, поверхностный плазмонный резонанс прошёл путь от фундаментального физического эффекта до основы практически используемых высокочувствительных приборов. Обзор современных SPR-датчиков мы планируем сделать в одном из следующих номеров журнала. Подробный разбор этой темы от теории до практики можно посмотреть в одной из последних работ [25].

Но этим история не заканчивается. Мы вплотную подошли к завершающему этапу нашего рассказа о том, как высказанные в 1932 году идеи привели к плазмон-поляритонам Тамма.

## Литература

1. Ritchie R. Plasma Losses by Fast Electrons in Thin Films. *Physical Review*. Vol. 106, p. 874, 1957. URL: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/process-engineering/omel-dam/documents/handouts/rh-ritchie.pdf>.
2. Ferrell R.A. Predicted Radiation of Plasma Oscillations in Metal Films. *Physical Review* 111, 1214–1222 (1958). URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.111.1214>.
3. Powell C.J., Swan J.B. Origin of the Characteristic Electron Energy Losses in Aluminum. *Physical Review*, Vol. 115, No. 4, p. 869. Published 15, August 1959. URL: <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/process-engineering/omel-dam/documents/handouts/cj-powell.pdf>.
4. Stern E.A. Surface Plasma Oscillations and the 7 ev Loss in Aluminum. Report number FA8 Spring Meeting APS April 30 – May 2, 1959, Washington, Columbia. *Bulletin of the American Physical Society*, Ser. II, Vol. 4, No. 4, p. 235, April 30, 1959. URL: [https://archive.org/details/sim\\_bulletin-of-the-american-physical-society\\_1959-04-30\\_4\\_4](https://archive.org/details/sim_bulletin-of-the-american-physical-society_1959-04-30_4_4).
5. Powell C.J., Swan J.B. Effect of Oxidation on the Characteristic Loss Spectra of Aluminum and Magnesium. PDF. *Physical Review*, Vol. 118,

- p. 640, (Received October 26, 1959). Published May 1, 1960. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.118.640>.
6. Stern E.A., Ferrell R.A. Surface Plasma Oscillations of a Degenerate Electron Gas. *Physical Review*, Vol. 120, No. 1, pp. 130–136. (Received March 7, 1960), Published 1 October, 1960. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.120.130>.
  7. Steinmann W. Experimental Verification of Radiation of Plasma Oscillations in Thin Silver Films. *Physical Review Letters*. v.5, Number 10, p. 470 – Published 15 November, 1960. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.5.470>.
  8. Berreman D.W. Infrared Absorption at Longitudinal Optic Frequency in Cubic Crystal Films. 130, 2193–2198 (15 June 1963). URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.130.2193>.
  9. Brambring J., Raether H. Plasma Radiation from Thin Silver Foils Excited by Light. *Physical Review Letters*, Vol. 15, p. 882. Published 6 December 1965. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.15.882>.
  10. Steinmann W., Hofmann J., Stettmaier K. Radiation from surface plasmons. *Physics Letters*, Vol. 23, No. 3, pp. 234–235, 17 October, 1966. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/003191636690881X>.
  11. Schreiber P., Raether H. Plasmaresonanzemission, angeregt durch Licht in Silber. *Z. Naturforsch.* 21 a, 2116–2117, 1966; eingeg. am 1 Dezember 1966. URL: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/zna-1966-1227/html>.
  12. Daniels J. Energieverlustmessungen an Silber mit hoher Energieauflösung *Zeitschrift für Physik*. Volume 203, pages 235–249. Published: June 1967. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01325915>.
  13. Kliever K.L., Fuchs R. Collective Electronic Motion in a Metallic Slab. *Physical Review*, Vol. 153, Issue 2, pp. 498–512. Published 10 January, 1967. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.153.498>.
  14. Bösenberg J., Raether H. Plasma-Resonance Emission of Potassium, Excited by Light. *Physical Review Letters*, Vol. 18, p. 397. Published 13 March 1967. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.18.397>.

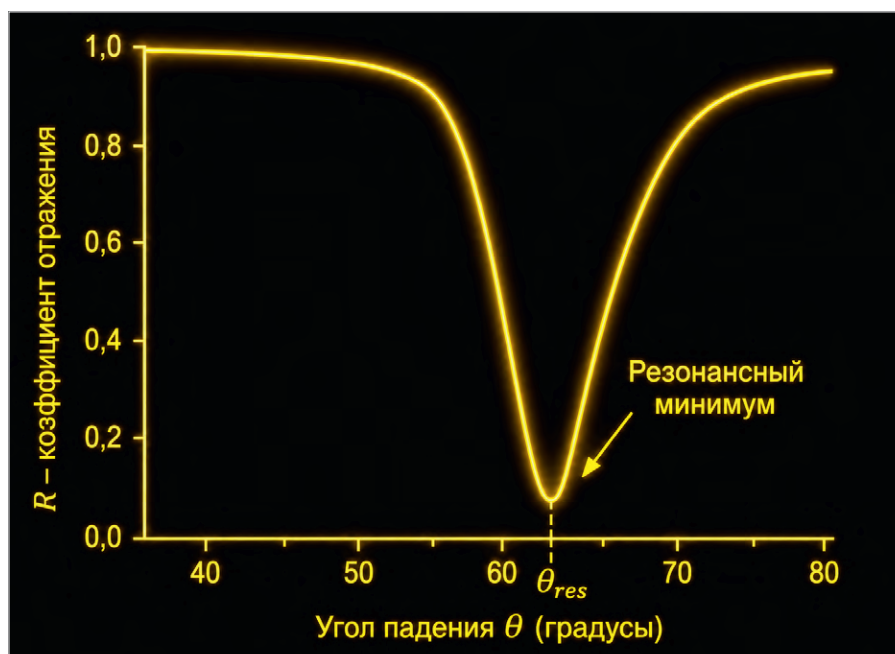


Рис. 11. Резонансная кривая в эксперименте Кречмана (1971 г.)

15. Teng Ye-Yung, Stern E. Plasma Radiation from Metal Grating Surfaces. *Physical Review Letters (PRL)*, Vol. 19, pp. 511–514. Published 28 August, 1967. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.19.511>.
16. Zhang P. Smith-Purcell radiation driven by plasma accelerated beam. arXiv:1807.10841v2 [physics.plasm-ph] 6 August 2018. URL: <https://arxiv.org/pdf/1807.10841>.
17. Jasperson S.N., Schnatterly S.E. Photon-Surface-Plasmon Coupling in Thick Ag Foils *Phys. Rev.* v.188, p. 759. – Published 10 December, 1969. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.188.759>.
18. Stern E.A. Plasma Radiation by Rough Surfaces. *Physical Review Letters*, v 19, p. 1321. Received 30 October 1967, Published 4 December, 1967. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.19.1321>.
19. Kretschmann E., Raether H. Zur Theorie der Plasmaresonanzstrahlung an rauhen Oberflächen. *Zeitschrift für Naturforschung A*, Vol. 22a, pp. 1623–1625. Eingeg. am 18 August 1967, (Received 18 August 1967). URL: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/zna-1967-1027/html>.
20. Wilems R.E., Ritchie R.H. Quantum Theory of the Plasma Resonance Emission Process *Physical Review Letters (PRL)*. Vol. 19, p. 1325. – Published 4 December, 1967. URL: <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.19.1325>.
21. Otto A. Excitation of Nonradiative Surface Plasma Waves in Silver by the Method of Frustrated Total Reflection. *Zeitschrift für Physik*, v. 216, pp. 398–410. Published: 01 August 1968. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01391532>.
22. Kretschmann E., Raether H. Notizen: Radiative Decay of Non Radiative Surface Plasmons Excited by Light, *Zeitschrift für Naturforschung A*, 23, 2135–2136. Received: November, 15, 1968, Published in Print: December 1, 1968. URL: <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/zna-1968-1247/html>.
23. Economou E.N. Surface Plasmons in Thin Films. *Phys. Rev.* 182, 539–554 (1969). DOI: 10.1103/PhysRev.182.539. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.182.539>.
24. Kretschmann E. Die Bestimmung optischer Konstanten von Metallen durch Anregung von Oberflächenplasmaschwingungen. *Z. Physik*, Volume 241, pages 313–324, 1971, Published: 01 August 1971. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01395428>.
25. Muhammad A. Butt. Surface Plasmon Resonance-Based Biodetection Systems: Principles, Progress and Applications. *A Comprehensive Review. Biosensors* 2025, 15(1), 35. URL: <https://www.mdpi.com/2079-6374/15/1/35>.



# Н.Г. Басов – отец квантовой электроники и лазерных технологий

Андрей Кашкаров

Знания и умение их применять – главные наши богатства. Мы совершенствуем и перестраиваем свою жизнь, наполняем её новым содержанием на основе этих знаний. Но приобретение знаний – сложный многогранный процесс, требующий упорного труда и смелой творческой мысли. Наука, как и искусство, не терпит серости, фальши, безразличия.

Н.Г. Басов



Рис. 1. Советский и российский учёный Н.Г. Басов

Работы изобретателя, одного из разработчиков квантового электронного лазера в СССР, преподавателя университета, руководителя НИИ и академика Николая Григорьевича Басова посвящены квантовой электронике и её практическому применению. Вместе с научным руководителем А.М. Прохоровым выдающийся российский физик и организатор науки Н.Г. Басов в 1952 году раскрыл принцип усиления и генерации электромагнитного излучения квантовыми системами, что позволило в 1954 году создать первый квантовый генератор (мазер) на пучке молекул аммиака. В дальнейшем с участием Басова была разработана трёхуровневая схема инверсной населённости уровней, нашедшая широкое применение в лазерах и мазерах. Эти работы, а также исследования американского физика Ч. Таунса легли в основу нового направления – квантовой электро-

ники. В статье приводятся необычные и малоизвестные факты из жизни академика Басова, рассказывается о становлении, развитии и достижениях его инженерной и научной деятельности.

В 1927 году известный писатель А.Н. Толстой закончил работу над фантастическим приключенческим романом «Гиперболоид инженера Гарина». Тогда «электронными пушками», способными на расстоянии разрезать камни, бредили многие мальчишки. Но ещё никто не знал, что пятилетний Коля Басов из небольшого городка молодой советской республики не только воплотит фантастические идеи в научных разработках, но и внесёт огромный вклад в развитие лазерной техники и современной электроники.

## Развитие личности и сведения из биографии

Советский и российский учёный, обладатель многих государственных наград и Нобелевской премии по физике (1964 г.) Николай Геннадиевич Басов родился в Усмани 14 декабря 1922 года – типичном провинциальном городке того времени (рис. 1).

Отец талантливого учёного – Геннадий Фёдорович Басов (1891–1962 гг.) – выпускник Петербургского политехнического института, инженер-гидротехник, впоследствии профессор Воронежского лесного института. Мать – Зинаида Андреевна Молчанова (1899–1970 гг.) окончила Усманскую женскую гимназию с золотой медалью. Дед Николая по материнской линии Андрей Кириллович Молчанов был священником Усманской Покровской церкви. В 1927 году, когда будущему светиле российской науки было 5 лет, семья переехала из Усмани в Воронеж.

С 1926 года Геннадий Фёдорович Басов преподавал гидротехнику, гидравлику, гидрогеологию и буровое дело в Воронежском государственном университете, а в 1931 году перешёл на работу по этой же специальности в Воронежский лесотехнический институт на кафедру гидротехнической мелиорации, где работал в звании доцента, а потом профессора.

От отца, Геннадия Фёдоровича, сыновьям передалась увлечённость техникой. Отец занимался даже химическими растворами, паял кастрюли и ремонтировал радиоприёмники, мастерил самодельный бур. В доме было много самоделок. Неудивительно, что Коля Басов вскоре сам отремонтировал электрический утюг. Затем он пришёл на техническую станцию и стал юным техником. Впоследствии передвижная ветроэлектростанция конструкции Н. Басова экспонировалась на Всесоюзной сельскохозяйственной выставке. За неё юный Коля получил первую в жизни награду – грамоту и путёвку на отдых на Кавказе.

## Необычный лейтенант медицинской службы

В 1941 году Николай Басов окончил школу № 13 в Воронеже, затем прошёл подготовку на ассистента врача в Куй-



Рис. 2. Н.Г. Басов в выпускном классе воронежской школы



Рис. 3. Н.Г. Басов в 1943 году

бышевской военной медицинской академии. На рис. 2 – Коля Басов в выпускном классе воронежской школы.

О военной карьере достоверных сведений крайне мало, но известно, что в 1943 году Басов был призван на фронт и прикомандирован к войсковой части 1-го Украинского фронта (рис. 3). На рис. 4 показана иллюстрация – выписка из трудовой книжки.

В 1944–1945 годах лейтенант медицинской службы Н.Г. Басов служил командиром отделения в 35-м батальоне химической защиты, а затем фельдшером (рис. 5).

По окончании войны Н.Г. Басов некоторое время находился в Германии, где принимал участие в демонтаже оборудования немецких химических заводов. После демобилизации в 1946 году он поступил в Московский механический институт (впоследствии – МИФИ), который окончил в 1950 году по специальности «инженер-физик». Дипломную работу Басов выполнил под руководством М.А. Леонтовича. По воспоминаниям самого Басова, решение о поступлении в институт оказалось во многом случайным: во время поездки в трамвае он увидел объявление о внеочередном наборе в Московский механический институт для демобилизованных военнослужащих. Это объявление определило дальнейший выбор Басова и в итоге привело его в физику и к исследованиям, связанным с созданием лазеров.

## Путь в науку

Лекции студентам читали уже знаменитые в то время учёные: акаде-

19. Выполняемая работа с начала трудовой деятельности (включая учебу в высших и средних специальных учебных заведениях, военную службу, участие в партизанских отрядах и работу по совместительству).  
При заполнении данного пункта учреждения, организации и предприятия необходимо именовать так, как они назывались в свое время, военную службу записывать с указанием должности.

| Месяц и год поступления | Месяц и год ухода | Должность с указанием учреждения, организации предприятия, а также министерства (ведомства) | Местонахождение учреждения, организации, предприятия |
|-------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| УШ.41                   | ХІ.42             | Слушатель Куйбышевской военно-медиц. академии.                                              | г.Куйбышев                                           |
| ХІ.42                   | УП.43             | Курсант Киевского военно-медицинского училища.                                              | г.Свердловск                                         |
| УП.48                   | УШ.45             | Командир сан.дегаз.отд. 3 ОБХЗ                                                              | МВО, I Украинск. фронт                               |
| УШ.45                   | ХП.45             | Фельдшер 70 СКП                                                                             | ЦГВ                                                  |
| П.46                    | УП.50             | Студент Инженерно-физического факуль-                                                       | Москва                                               |

Рис. 4. Выписка из трудовой книги Н.Г. Басова



Рис. 5. Военское удостоверение лейтенанта Н.Г. Басова

мики Игорь Евгеньевич Тамм, Лев Андреевич Арцимович, Исаак Константинович Кикоин, Михаил Александрович Леонтович и другие [10].

Будучи студентом, с 1948 года по приглашению своего научного руководителя, физика Михаила Александровича Леонтовича, Басов начал работать лаборантом в Физическом институте имени П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАН). После получения диплома он стал инженером в Лаборатории колебаний, где работал под руководством заведующего лабораторией Александра Михайловича Прохорова.

В 1953 году Басов защитил кандидатскую диссертацию на тему «Определение ядерных моментов радиоспектроскопическим методом», а в 1956 году, в возрасте 34 лет, – докторскую диссертацию на тему «Молекулярный генератор», посвященную теоретическим и экспериментальным исследованиям молекулярного генератора, в котором

в качестве активной среды использовался аммиак. Так Басов стал доктором технических наук. Карьера молодых перспективных учёных в те годы могла развиваться стремительно – время было такое.

Под руководством А.М. Прохорова велась работа по изучению синхротронного излучения в маленьком синхротроне. На рис. 6 – А.М. Прохоров и Н.Г. Басов.

По согласованию с научным руководителем Басов запустил синхротрон в режиме кратного резонанса, когда частота возбуждающего поля в целое число (4–6) раз превышает частоту обращения частиц. Чтобы регистрировать излучение, предварительно создали электронное устройство для приёма сантиметровых волн. На рис. 7 показана схема модуля синхротрона из дипломной работы Н.Г. Басова.

Одновременно с этой работой академик С.И. Вавилов, в то время дирек-





Рис. 6. Совместное фото А.М. Прохорова и Н.Г. Басова

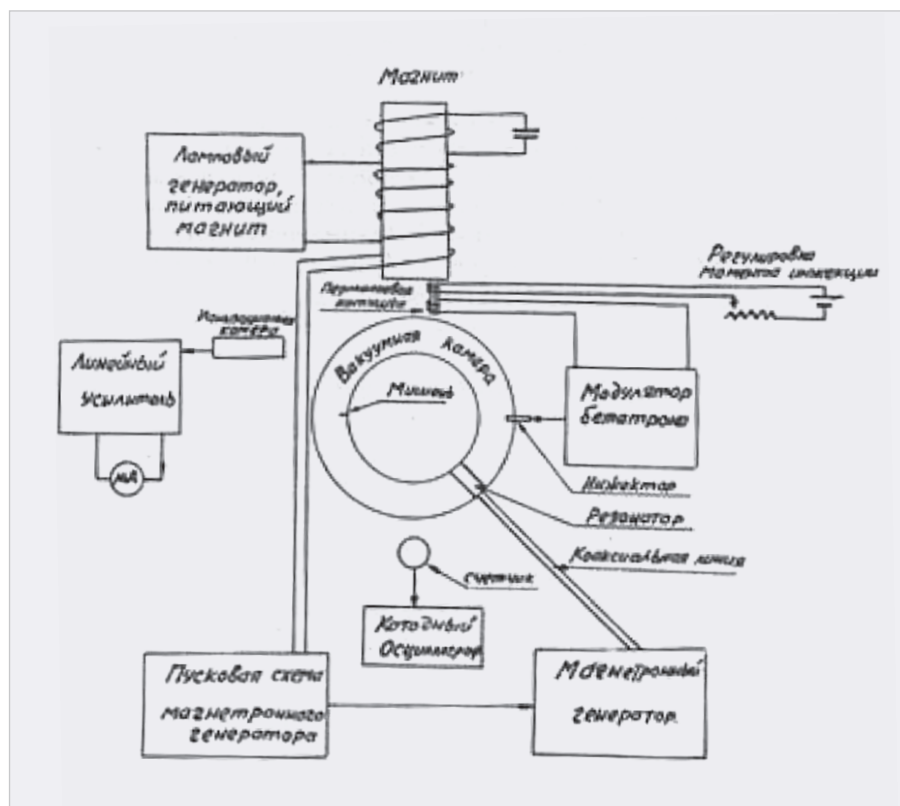


Рис. 7. Схема модуля синхротрона из дипломной работы Н.Г. Басова

тор ФИАН, поручил А.М. Прохорову заниматься радиоспектроскопией. Так Басов подключился к работе по конструированию и созданию измерительного электронного оборудования – радиоспектроскопов, параллельно изучая теорию и методы экспериментальной радиоспектроскопии. На рис. 8 Н.Г. Басов запечатлён рядом с молекулярным генератором в лаборатории (1950-е гг.).

Как вспоминал Н.Г. Басов: «Мы не были исследователями радаров, и в этом смысле у нас и у американских учёных были несколько разные подходы к развитию квантовой электроники». Действительно, работы над когерентными и молекулярными генераторами велись в наиболее передовых научных центрах мира.

Первый в истории физики твердотельный лазер был создан в 1960 году

американским физиком Т. Мейманом, который использовал в качестве активной среды кристалл рубина [1]. Основными элементами твердотельного ОКГ на кристаллах рубина являются: резонатор с помещённой в него активной средой, источник накачки с оптической системой накачки, источник питания и схема запуска. Блок-схема лазера приведена на рис. 9.

Для реализации оптической накачки необходимы достаточно интенсивные источники излучения. Важно, чтобы основная масса излучаемой этими источниками энергии попадала в полосы поглощения активного вещества и тем самым эффективно использовалась для создания инверсной населённости между рабочими лазерными уровнями. Так, для кристалла рубина одна из полос поглощения лежит в области 0,41 мкм. Для того чтобы максимум излучения источника лежал в области 0,41 мкм, нужно иметь источник, соответствующий абсолютно чёрному телу с температурой 10 000К. Эффективные температуры 5000–10 000К реализуются в излучении газоразрядных ламп, в частности ксеноновых, обладающих наиболее высоким КПД (до 50%) [6].

Для повышения доли энергии, излучаемой лампой, которая может быть поглощена активным веществом, используются различные отражающие и фокусирующие устройства (система накачки). Для оптической накачки твердотельных ОКГ целесообразно использовать прямые трубчатые импульсные лампы и отражатели, имеющие форму круговых и эллиптических цилиндров с зеркальной отрагательной поверхностью. При использовании отражателей в форме эллиптического цилиндра лампы и стержень активного вещества располагаются в фокальных осях [4].

Почти одновременно с этим, в конце 1960 года, первый газовый лазер на смеси гелия и неона был создан Джаваном, Беннетом и Эрристом (США). Основными элементами газового ОКГ являются оптическая излучающая головка (ОИГ) и источник питания (ИП) (рис. 10). ОИГ состоит из газоразрядной трубки и резонатора, образованного двумя зеркалами. Газоразрядная трубка изготавливается из кварца или высококачественного стекла, подвергается термообработке, откачивается и заполняется рабочей смесью при давлении около 1 мм рт. ст. Выходные окна газоразрядной трубки уста-

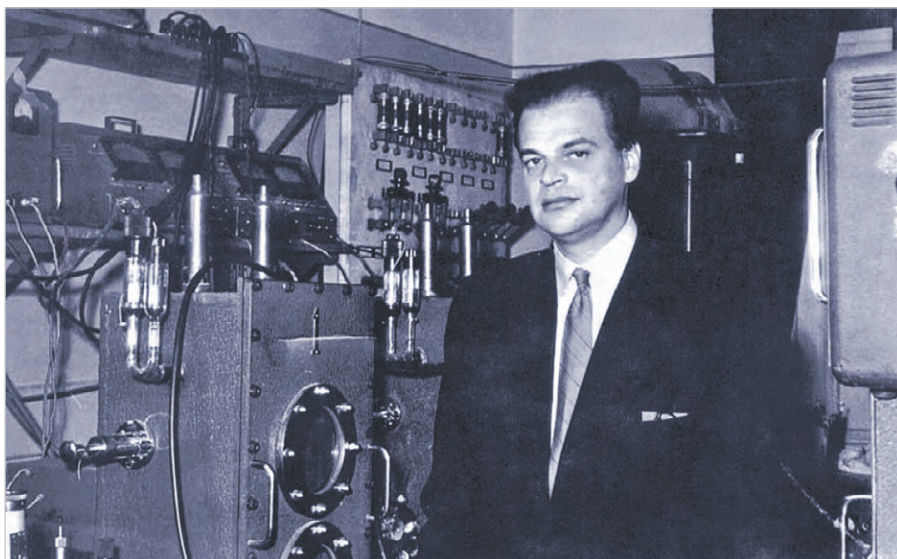


Рис. 8. Н.Г. Басов на фоне молекулярного генератора в лаборатории

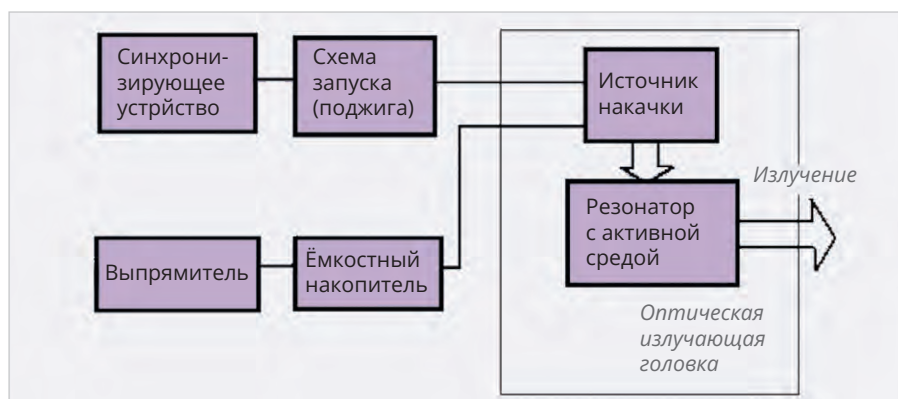


Рис. 9. Блок-схема лазерного генератора на рубине разработки Меймана

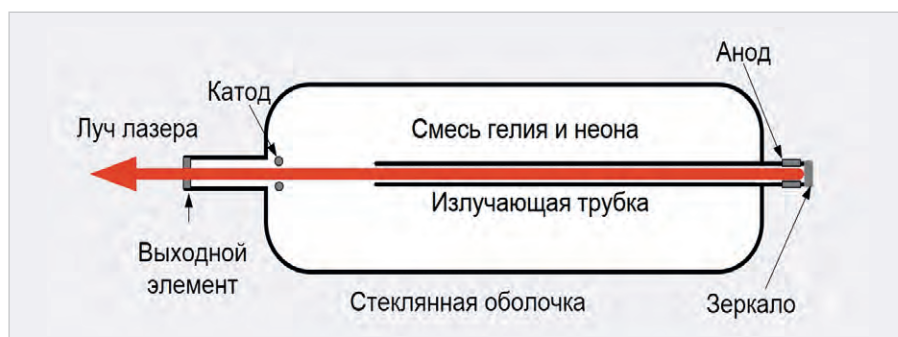


Рис. 10. Устройство гелий-неонового лазера

навливаются под углом Брюстера к оптической оси резонатора. Наличие брьюстеровских окон определяет поляризацию генерируемого излучения.

Индуктированное излучение в резонаторе ОКГ возникает из слабого спонтанного излучения, распространяющегося в малом телесном угле вдоль оси резонатора. Наибольшее усиление реализуется для волны, поляризованной в плоскости, проходящей через ось резонатора и нормаль к плоскости выходного окна, где поляризовано выходное излучение газового ОКГ.

Оптическая накачка заключается в том, что вещество подвергается воздействию мощного излучения, которое, поглощаясь веществом, выводит его из состояния равновесия [15].

По признанию учёных мирового сообщества, Прохоров и Басов первыми создали молекулярный лазерный генератор.

В СССР потребовалось некоторое время, чтобы усовершенствовать установку для исследования дисперсии молекулярных пучков с учётом эффекта насыщения и на её основе вывести

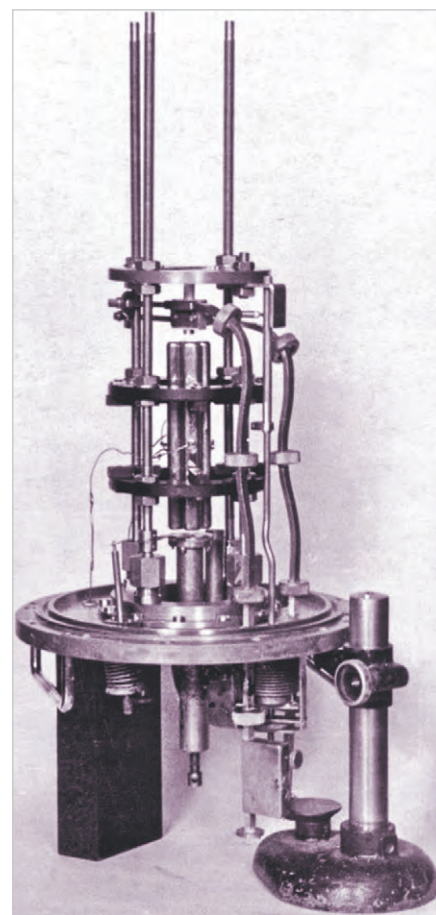


Рис. 11. Опытная установка молекулярного генератора Басова

уравнения для молекулярного генератора. Так появилась совместная работа Прохорова и Басова «Теория молекулярного генератора и молекулярного усилителя мощности». Она стала второй работой советских учёных в области квантовой электроники. Основные результаты и выводы были представлены на конференции Фарадеевского общества в Великобритании, что послужило основанием для дальнейшего развития исследований в области квантовой электроники. А квантовый генератор на пучке молекул аммиака появился так.

На конференции по радиоспектроскопии обсуждались возможности самовозбуждения применительно к молекуле CsF. В ходе дискуссии возник вопрос: почему бы не использовать аммиак – подходящее классическое вещество для радиоспектроскопии? Так возникла идея создания квантового генератора. Вскоре эта идея воплотилась в докторской диссертации Басова «Молекулярный генератор» (мазер). Докторскую диссертацию учёный защитил всего через шесть лет после окончания института. На рис. 11 показана опытная установка молекулярного генератора Басова.



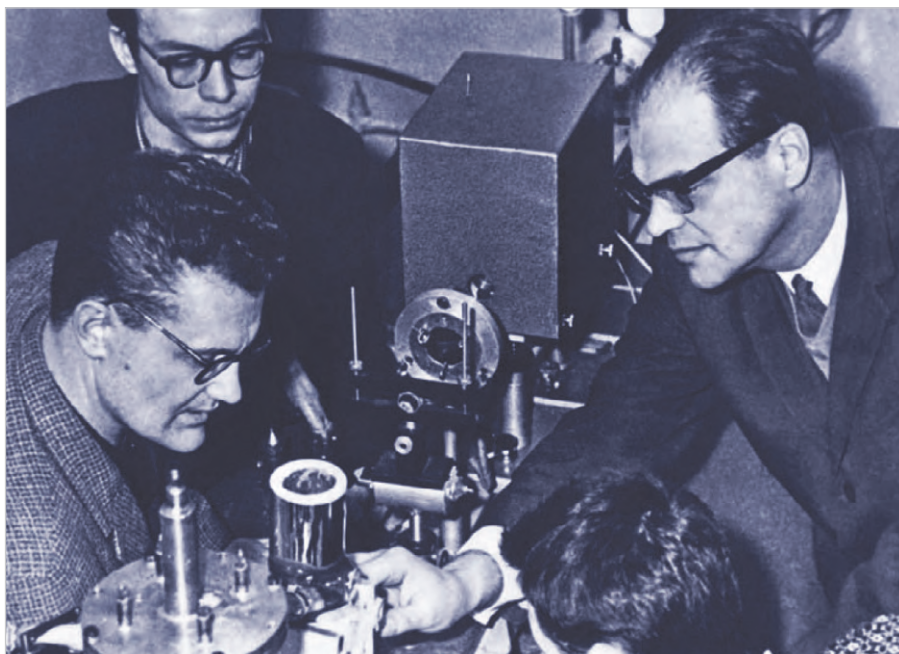


Рис. 12. Иллюстрация обсуждения научного эксперимента с квантовым генератором в МИФИ. Слева направо: А.З. Грасюк, В.М. Ефимков, Н.Г. Басов

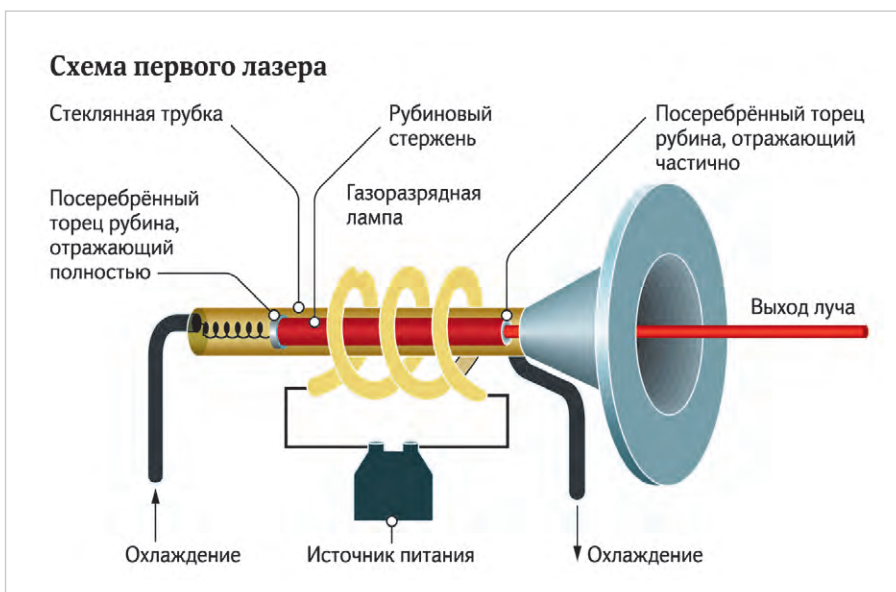


Рис. 13. Схема элементов квантового генератора Басова

С 1958 года, в возрасте 36 лет, Басов занимал должность заместителя директора ФИАН по научной части, не прерывая научных исследований. Здесь же, в ФИАН, в 1963 году он организовал и возглавил Лабораторию квантовой радиофизики. С 1973 по 1989 год Басов был директором института.

Ещё в 1962 году Басов был избран членом-корреспондентом АН СССР, а в 1966 году – академиком АН СССР. Впоследствии он вошёл в состав президиума Академии наук: был членом президиума АН СССР с 1967 по 1990 год, а с 1991 года – членом президиума РАН. В 1978 году Басов организовал и возглавил в МИФИ кафедру квантовой

электроники, впоследствии переименованную в кафедру лазерной физики.

После защиты докторской диссертации авторитет Николая Геннадьевича Басова значительно вырос, появились ученики и последователи. Продолжились уже «командные» лабораторные разработки молекулярных генераторов и экспериментальные исследования. Началось формирование научной школы.

В 1959 году под руководством Басова в ФИАНе был организован сектор молекулярных генераторов. На рис. 12 показана иллюстрация обсуждения научного эксперимента с квантовым генератором в МИФИ.

## Развитие направления квантовой электроники – научное наследие Н.Г. Басова

Работы Н.Г. Басова посвящены не только квантовой электронике, но и её практическому применению в различных областях. Вместе с научным руководителем А.М. Прохоровым Басов исследовал принципы усиления и генерации электромагнитного излучения квантовыми системами, что способствовало созданию в 1954 году первого квантового генератора (мазера) на пучке молекул аммиака. А.М. Прохоров был научным руководителем Басова и оказал значительное влияние на становление его как учёного. В 1955 году была предложена трёхуровневая схема создания инверсии населённости, получившая широкое применение в мазерах и лазерах. Этот принцип достижения инверсии с помощью СВЧ-накачки трёхуровневой системы впоследствии получил широкое применение в различных типах лазеров и в разных диапазонах электромагнитного излучения. На рис. 13 показана схема элементов квантового генератора Басова.

Успехи учёного в области квантовой электроники сделали возможным создание мазера и лазера. Н.Г. Басов и А.М. Прохоров были награждены Ленинской премией в 1959 году, а в 1964 году совместно с Чарльзом Х. Таунсом стали лауреатами Нобелевской премии по физике – за «фундаментальные работы в области квантовой электроники, которые привели к созданию генераторов и усилителей на мазерно-лазерном принципе».

Основной вклад Н.Г. Басова в развитие отечественной электроники и физики связан с разработкой нового принципа генерации и усиления радиоволн, созданием молекулярных генераторов и усилителей. С 1957 года Н.Г. Басов занимался разработкой и конструированием лазеров и впоследствии стал автором нескольких сотен научных работ по мазерам и лазерам [9].

Научные работы Басова посвящены вопросам распространения и взаимодействия мощных лазерных импульсов с веществом. Учёный исследовал процессы стимулирования химических реакций лазерным излучением. В 1961 году Н.Г. Басов совместно с О.Н. Крохиным выдвинул идею использования лазеров для управляемого термоядерного синтеза, предложив метод лазерного нагрева плазмы и облучения малых мишеней.

## Современные лазерные технологии в микроэлектронике – результаты открытий Басова

В то время энергия лазерного излучения была настолько мала, что идея лазерного термоядерного синтеза казалась нереалистичной. Однако Басов и его коллеги добились важного экспериментального результата: в 1968 году в Физическом институте имени П.Н. Лебедева были впервые зарегистрированы нейтроны при лазерном облучении мишени из дейтерида лития. Эти результаты стали мощным стимулом для дальнейшего развития исследований по лазерному термоядерному синтезу. Сегодня лазерный термоядерный синтез рассматривается как один из перспективных подходов к управляемому термоядерному синтезу и использованию ядерной энергии.

Под руководством Н.Г. Басова были разработаны несколько типов лазеров, основанных на кристаллах, полупроводниках, газах и различных комбинациях химических элементов, а также многоканальные и мощные короткоимпульсные лазеры. Басов первым продемонстрировал действие лазера в ультрафиолетовой области электромагнитного спектра. Наряду с фундаментальными исследованиями инверсной заселённости в полупроводниках и переходных процессов в различных молекулярных системах он уделял значительное внимание практическим применениям лазеров, особенно возможности их использования для термоядерного синтеза.

Заслуживают внимания работы по разработке фотодиссоционных лазеров (на атомах йода), лазеров с накачкой сильной ударной волной, электроионизационных, эксимерных и других типов лазеров. Н.Г. Басов совместно с О.Н. Крохиным и Ю.М. Поповым одними из первых в мире предложили использовать полупроводники в качестве активной среды для лазеров, возбуждаемых различными способами, включая инжекцию носителей заряда через р-п-переход. Эти исследования способствовали появлению инжекционных диодных лазеров, которые получили широкое применение как в науке, так и в технике.

Когда появились первые лазеры, Николай Геннадиевич предсказал новую научно-техническую революцию, связанную с этим открытием. В 60-х годах XX века это казалось преувеличением. Однако Басов оказался прав.

Как мы знаем, в конце XX – начале XXI века лазеры получили широкое применение в различных областях техники и науки: от использования в эндоскопии и офтальмологии до оптических линий связи, от сверхточных измерений до считывания информации с компакт-дисков и работы лазерных принтеров.

Помимо Нобелевской премии, Басов в 1962 году был избран членом-корреспондентом АН СССР, в 1966 году – действительным членом АН СССР, а в 1967 году – членом Президиума АН СССР.

Н.Г. Басов являлся иностранным членом ряда национальных академий наук: Польши, Чехословакии, Болгарии и Франции, а также членом Германской академии естествоиспытателей «Леопольдина» и Шведской королевской академии инженерных наук. Состоял членом Американского оптического общества. В 1974 году был избран иностранным членом Болгарской академии наук, в 1986 году – Индийской национальной академии наук (INSA), а в 1995 году – Национальной академии наук Беларуси.

Совместно с коллегами Ю.М. Поповым и Б.М. Вулом Н.Г. Басов предложил идеи создания различных типов полупроводниковых лазеров. В 1962 году была выдвинута идея инжекционного лазера, затем были созданы лазеры, возбуждаемые электронным пучком, а в 1964 году – полупроводниковые лазеры с оптической накачкой. Н.Г. Басов также проводил исследования мощных газовых и химических лазеров. Под его руководством были созданы фторводородный и йодный лазеры, а затем эксимерный лазер [14]. Учёный также разработал физические основы создания квантовых стандартов частоты, выдвинул идеи новых применений лазеров в оптоэлектронике и нелинейной оптике, в частности, создание оптических логических элементов.

Научная деятельность Н.Г. Басова была связана прежде всего с ФИАН, а также с МИФИ. После защиты докторской диссертации у него появились ученики и последователи, продолжившие исследования в области квантовой электроники, лазерной физики и смежных направлений. Среди них – П.Г. Крюков, О.Н. Крохин, П.И. Арсеев, И.Г. Зубарев, А.В. Колобов, Н.Я. Гончарова, П.Д. Березин, А.А. Шестухина, Л.Ю. Строганова, А.Х. Богатова и С.Ф. Сабирова. Этот список далеко не полный: научная школа Н.Г. Басова объединила значи-

тельно большее число исследователей. В 1956 году Басов защитил докторскую диссертацию «Молекулярный генератор» в Физическом институте имени П.Н. Лебедева АН СССР. Диссертация была посвящена теории и экспериментальному исследованию молекулярного генератора.

## Награды, отзывы и память

Научно-редакторская и общественная деятельность учёного также впечатляет. Н.Г. Басов в разные годы был главным редактором журналов «Наука», «Квант», «Квантовая электроника» (с 1971 года), «Природа» (1967–1990), Journal of Soviet Laser Research, «Краткие сообщения по физике», а также сборника «Труды Физического института имени П.Н. Лебедева». В 1978–1990 годах он являлся председателем правления Всесоюзного общества «Знание».

Академик В.Л. Гинзбург так отзывался о Н.Г. Басове: «Ему было характерно стремление осмысливать физическую картину явлений по возможности до эксперимента, что позволяло ему идти, как правило, кратчайшим путём к цели».

Одним из тех, кто в Президиуме АН СССР с постоянным интересом относился к работе и докладам Николая Геннадьевича, был академик Пётр Леонидович Капица [8]. Ученик Н.Г. Басова, академик РАН О.Н. Крохин вспоминает об интересной особенности своего учителя – особой логике мышления, которая развивалась не по самому простому пути: от основ физики, изложенных в учебниках, к более сложным комплексным построениям. «Иногда думается, что Николай Геннадьевич шёл по противоположному пути – от конечного результата».

История связана с вопросом о ширине линии лазера. Николай Геннадьевич считал, что ширина линии при индуцированном усилении за счёт регенерации в резонаторе может быть существенно меньше естественной ширины линии перехода. Логика его рассуждений была простой, ведь мазер является автоколебательной системой. Л.Д. Ландау, с которым Николай Геннадьевич консультировался, первоначально отвергал такую возможность, поскольку она противоречила бы соотношению неопределённостей. Однако впоследствии новое явление получило закономерное объяснение с привлечением принципа неразличимости молекул, влетающих в резонатор [7]. «По-видимому, Н.Г. Басов считал необходимым построить модель яв-



ния по-своему, отличающуюся (и, вероятно, более сложную) от моделей его коллег» [12].

«Это уникальное мышление было источником лучших идей, которые были характерны для его творчества. Считается, что если одна идея из 10 порождает практическую реализацию – это большой успех. Но для Н.Г. Басова процент реализованных идей был намного выше» [3].

Николая Басова считают «своим» и в Липецке, и в Воронеже. В Усмани установлен памятник Н.Г. Басову. За заслуги перед государством, большой личный вклад в развитие науки и подготовку высококвалифицированных кадров Басов был награжден орденом «За заслуги перед Отечеством» II степени Указом Президента Российской Федерации от 13 декабря 1997 г. № 1280. В его честь также учреждены научные структуры и образовательные учреждения.

Среди наград, премий и почетных званий академика Басова пять орденов Ленина, Ленинская премия (1959), Государственная премия СССР (1989), а также звание Дважды Героя Социалистического Труда (1969, 1982). Басов был удостоен многочисленных зарубежных наград: Золотой медали Чехословацкой академии наук (1975), Золотой медали имени А. Вольты Университета в Павии (Италия, 1977), медали Университета Сорбонны (1983), Большой золотой медали Парижа (1983), медали Министерства культуры Франции (1983), Командорского креста ордена «Заслуги» (Польша, 1986), Золотой медали имени Э. Генкеля общества «Уrania» (1986), премии Калинги ЮНЕСКО (1986) и медали Эдварда Теллера (1991). Среди наиболее престижных наград российских ученых – Большая золотая медаль имени М.В. Ломоносова, которой Басов был удостоен в 1989 году.

Орден «За заслуги перед Отечеством» II степени (13 декабря 1997 года) был вручен Н.Г. Басову, как сказано в указе Президента Российской Федерации, «за заслуги перед государством, большой личный вклад в развитие науки и подготовку высококвалифицированных кадров». Одной из выдающихся работ ученого стала статья «Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул» [13].

Академик АН СССР Н.Г. Басов умер 1 июля 2001 года в возрасте 78 лет и был похоронен на Новодевичьем кладбище в Москве.

## Выводы

Сегодня Нобелевского лауреата Николая Григорьевича Басова знают как ученого, внёсшего значительный вклад в развитие квантовой электроники и создание лазерных установок различного назначения. В 1950-е годы, в период профессионального становления и расцвета научной деятельности Басова, квантовая электроника была одним из востребованных направлений науки и техники. В условиях «гонки вооружений» исследования в этой области имели в том числе важное военно-техническое значение, а конкуренция за создание новых технологий была особенно высокой.

Диапазон научных идей и результатов выдающегося советского и российского ученого был чрезвычайно широк: от физики лазеров до лазерной локации Луны, от фундаментальных проблем когерентности до лазерных электронно-лучевых трубок, автономных мобильных лазерных установок и мощных лазеров для систем противоракетной обороны.

У Н.Г. Басова была удивительная судьба, изобиловавшая необычными поворотами, в непростое, но интересное время становления советской науки. Его жизненный путь показывает, насколько неожиданно может сложиться судьба талантливого человека: лейтенант медицинской службы, прошедший войну, стал одним из основоположников квантовой электроники и внёс значительный вклад в развитие лазерных технологий.

По мнению академика РАН О.Н. Крохина, в научном познании можно выделить три уровня: на первом обнаруживается новое явление, на втором оно получает объяснение, а на третьем полученные знания используются как инструмент для дальнейших исследований и практического применения. Многие экспериментаторы ограничиваются первым этапом, теоретики – вторым, и лишь немногие выдающиеся ученые достигают третьего. Н.Г. Басов принадлежал к последней группе [3].

Сегодня Н.Г. Басова помнят как выдающегося ученого, внёсшего значительный вклад в развитие отечественной науки и квантовой электроники.

## Литература

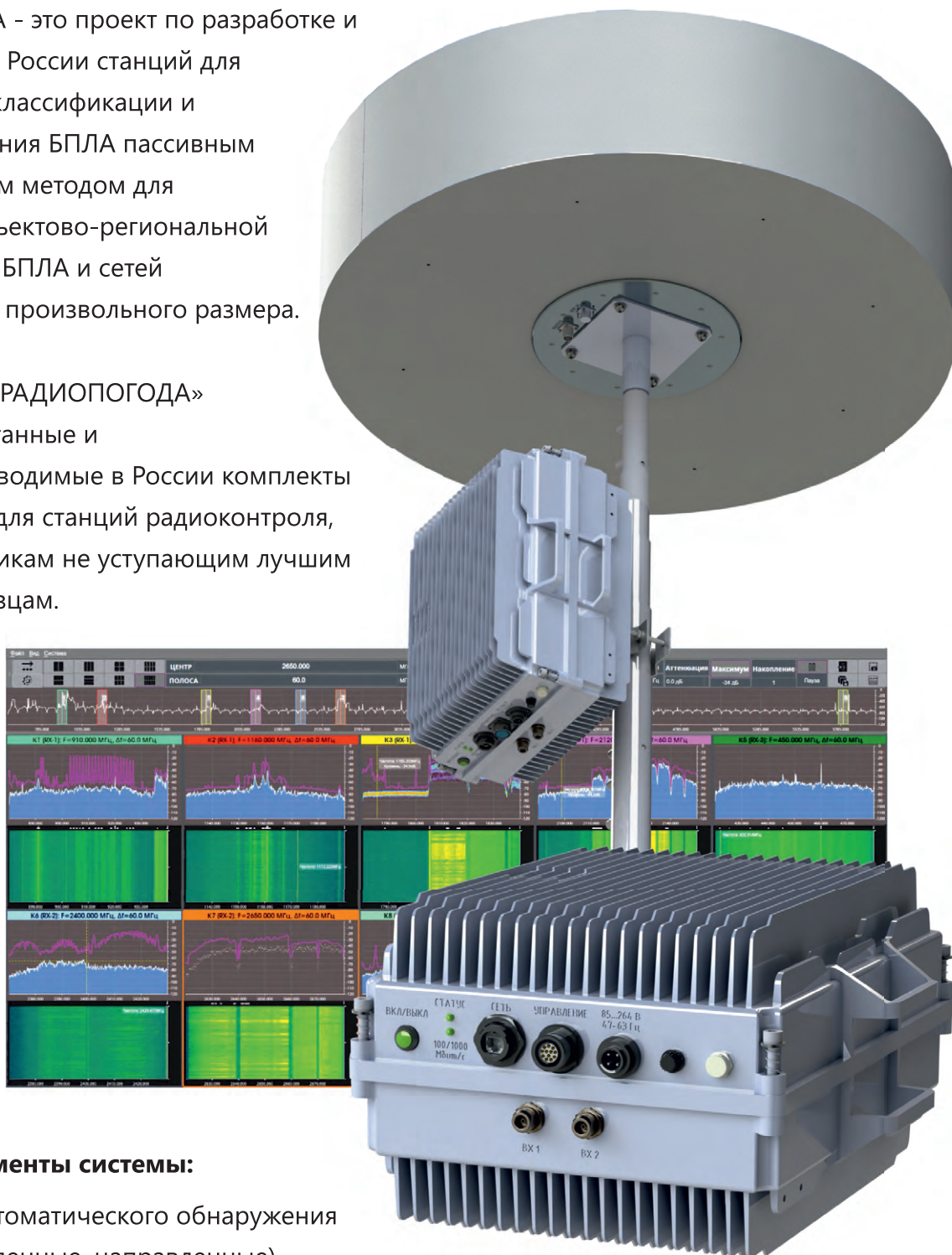
1. Nikolai Gennadijewitsch Bassow // Brockhaus Enzyklopädie. URL: <https://brockhaus.de/ecs/enzy/article/bassow-nikolai-gennadijewitsch>.

2. Stefan, Basov N.G. Semiconductor Science and Technology, Volume 1. Semiconductor Lasers // Stefan University Press Series on Frontiers in Science and Technology. 1999.
3. Николай Геннадиевич Басов. К 95-летию со дня рождения / под ред. А.А. Ионина. Авторы-составители: В.М. Березанская, М.А. Лукич, Н.М. Шаульская. М.: ФИАН, 2017.
4. Аникиев В.В. Кванты в руках держащий: Невыдуманная микроповесть о человеке, посрамившем инженера Гарина: [Об акад. Н. Г. Басове]. М.: Молодая гвардия, 1968. 95 с.
5. Басов Н.Г., Елисеев П.Г., Попов Ю.М. Полупроводниковые лазеры // УФН. 1986. Т. 148, № 1.
6. Басов Н.Г., Данилычев В.А. Лазеры на конденсированных и сжатых газах // УФН. 1986. Т. 148, № 1.
7. Басов Н.Г., Прохоров А.М. Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул // ЖЭТФ. 1954. Т. 27, вып. 4. С. 431–438.
8. Басов Николай Геннадиевич // Большая советская энциклопедия / под ред. А.М. Прохорова. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1969.
9. Басов Николай Геннадиевич // Русская цивилизация. Информационно-аналитический и энциклопедический портал. URL: <http://www.rustrana.ru/print.php?id=5262>.
10. К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Часть 1. Пионер квантовой физики: И.Е. Тамм и его вклад в развитие электроники. URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2025/se-2025-7/182227/>.
11. Николай Геннадиевич Басов / РАН; сост. И.Г. Бебих и др.; авт. вступ. ст. Ю.М. Попов и др. 2-е изд. М.: Наука, 1993. 264 с.
12. Ораевский А.Н., Исаков В.А., Романенко В.И. и др. Новые методы разделения изотопов // УФН. 1977. Т. 121, № 3.
13. Прохоров А.М., Басов Н.Г. Молекулярный генератор и усилитель // УФН. 1955. Т. 57, № 3. С. 485–501.
14. Семёнов А.С., Никитин В.В., Басов Н.Г. Динамика излучения инжекционных полупроводниковых лазеров // УФН. 1969. Т. 97, № 4.
15. Сучков А.Ф., Данилычев В.А., Басов Н.Г. и др. Электроионизационные лазеры на сжатом углекислом газе // УФН. 1974. Т. 114, № 1.



РАДИОПОГОДА - это проект по разработке и производству в России станций для обнаружения, классификации и местоопределения БПЛА пассивным радиочастотным методом для комплексов объектово-региональной защиты от атак БПЛА и сетей радиоконтроля произвольного размера.

В основе ПАК «РАДИОПОГОДА» лежат разработанные и серийно производимые в России комплекты оборудования для станций радиоконтроля, по характеристикам не уступающим лучшим мировым образцам.



## Основные элементы системы:

- Станции автоматического обнаружения (всенаправленные, направленные)
- Специализированная аппаратура синхронизации и связи (беспроводная и/или ВОЛС)
- Центры управления и обработки данных

Реклама



# Конструкции на быстродействующих КМОП-микросхемах

Александр Одинец

Чтобы использовать преимущества быстродействующих КМОП ИМС, следует учитывать их взаимодействие с окружающей средой и ограничения компонентов. Особенно важны: развязка шума в системе, а также управление уровнями переходных процессов и устойчивых состояний.

Конструкции, использующие быстродействующую КМОП-логику, такую как в сериях MM54HC/74HC, могут достигать характеристик, которые превосходят LS-TTL конструкции. Однако, чтобы оптимизировать эти характеристики, следует использовать соответствующие методики проектирования. Эта статья рассматривает вопросы помехоустойчивости, а также входные-выходные характеристики ИМС.

Быстродействующая КМОП-логика является в основном семейством цифровых ИС, которое сочетает в себе характеристики TTL (биполярных) и CD4000 (КМОП) серий. По причине высокого быстродействия семейства следует лучше осознавать требования быстродействующих систем, чем

в случае логики семейства CD4000B. Хотя конструирование семейства MM54HC/74HC сравнимо в помехоустойчивости с семейством CD4000B, его высокое быстродействие требует использования методик заземления системы и фильтрации помех источника питания, обычно используемых при конструировании LS-TTL систем.

Следующие разделы рассматривают руководство по общему применению, чувствительность к шуму и помехоустойчивость, а также характеристики шума источника питания логики семейства 54HC/74HC. Следует заметить, что, если это не оговорено, рассуждения применимы также к TTL-совместимому подсемейству HC-логики 54HC/74HC.

## Следуйте основным руководящим принципам

Основные правила конструирования с использованием семейства 54HC/74HC подобны тем, которые применимы к семействам 74LS, CD4000B, 54C/74C. Во-первых, при нормальных статических рабочих условиях входной сигнал не должен превышать VCC или опускаться ниже «земли». В типичных быстродействующих системах переходные процессы и звон линии могут вызвать моментальное нарушение этого правила на входах, заставляя ИМС войти в режим защёлкивания.

Защёлкивание происходит, если один из диодов входной или выходной защиты смещается в прямом направлении из-за превышения напряжения выше VCC или снижения ниже «земли». В результате внутренний паразитный диод ИМС закорачивает VCC на «землю». Рисунок 1 показывает диоды в КМОП ИС схематически (а) и в упрощённом разрезе кристалла (б).

Благодаря некоторым тонкостям производства защёлкивание диода не является проблемой для семейства MM54HC/74HC. Однако существуют ограничения для токов, которые могут выдержать защитные диоды и внутренняя металлизация, поэтому для переходных процессов высокого уровня (длительность импульса меньше 20 мс и входы выше VCC или ниже «земли») следует ограничивать ток внутреннего диода ИС на уровне 20 мА или 100 мА в импульсе. Обычно бывает достаточно включения простого резистора последовательно со входом.

Электропитание прибора является другой важной целью проектирования. Не следует подавать сигнал на входы до тех пор, пока не подключены VCC и «земля». Также не следует включать или выключать силовые линии, пока не сняты или ограничены входные сигналы, как описано выше. Оба условия могут сместить входные паразитные диоды в прямом направлении, приводя к чрезмерным диодным токам.

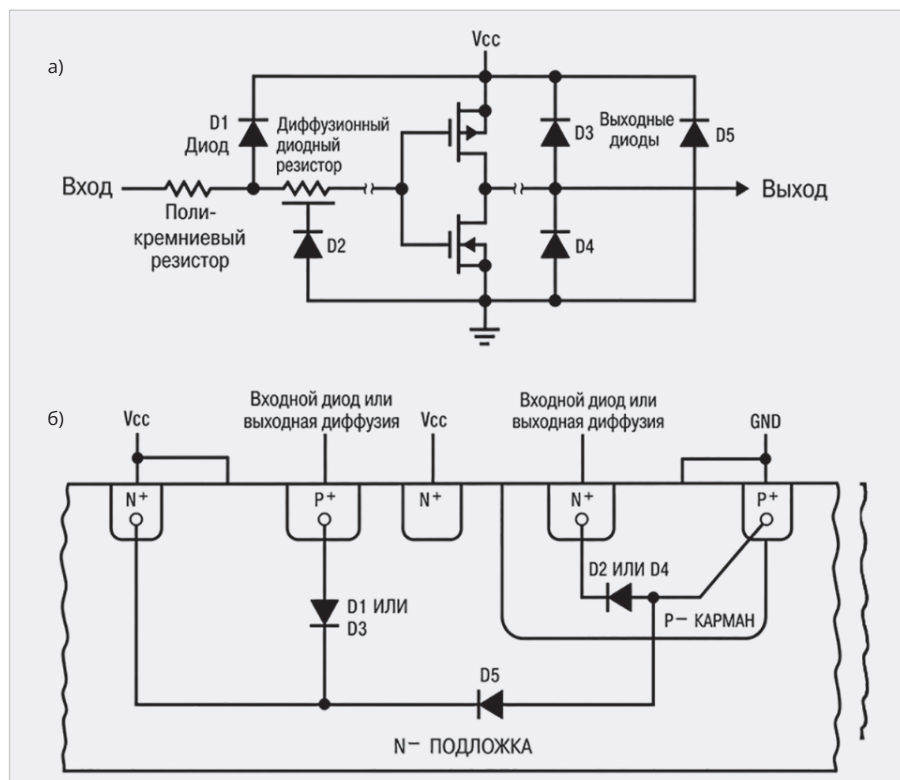


Рис. 1. Диоды в ИС КМОП-логики могут быть легко повреждены чрезмерными токами. Перемена полюсов источника питания или большие входные/выходные токи могут вызвать выгорание диода

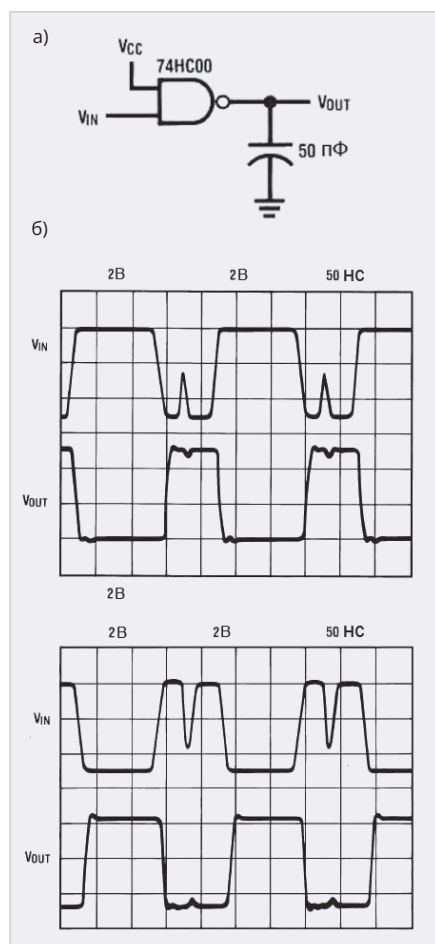


Рис. 2. Рисунок чётко показывает реакцию элементов 74HC00 на воздействие «пиков» шума (а). Элемент показывает помехоустойчивость на уровне 2 В или больше (б). Кроме того, помехоустойчивость одинаково хороша как для отрицательных, так и для положительных пиков шума

Кроме того, рис. 1 показывает эти диоды и возможные токовые пути. Если эти условия неизбежны, следует ограничивать внешние токи, чтобы предотвратить повреждение схем 54НС/74НС, или использовать специальные соединители, которые подают питание раньше входных сигналов. Некоторые приборы семейства (особенно HC4049/50) имеют модифицированные входные структуры и могут выдержать подачу сигналов на входы перед подачей напряжения питания.

Незаземлённые входы являются проблемой, которой часто не придают значения. КМОП-входы имеют чрезвычайно большой импеданс и, если они оставлены неподключёнными, могут дрейфовать к любому напряжению. Эта ситуация может привести к логическому сбою и бесполезному энергопотреблению. Кроме того, открытые входы чувствительны к электроста-

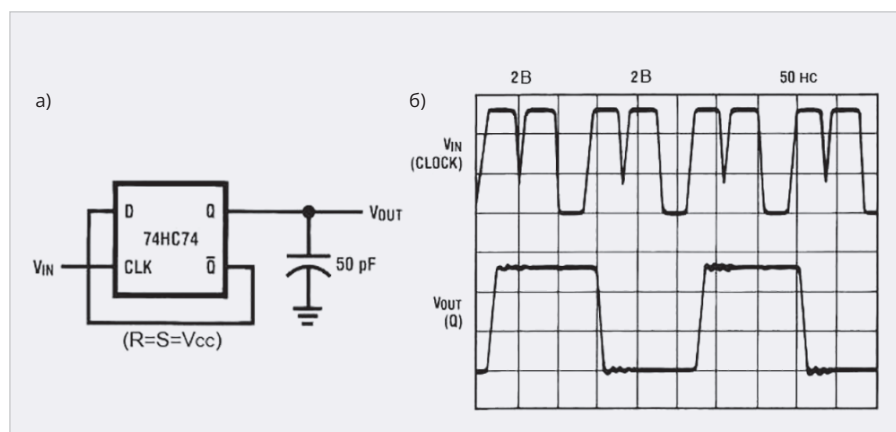


Рис. 3. Показывает высокую помехоустойчивость входа синхронизации. Выход триггера типа 74HC74 (а) не изменяется при воздействии на вход синхронизации импульсной помехи амплитудой более 2 В (б)

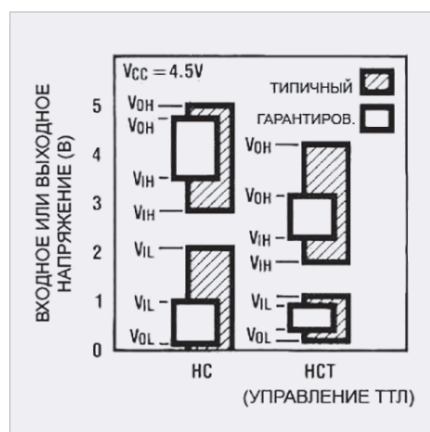


Рис. 4. Показывает запас помехоустойчивости для HC-КМОП и комбинации HCT-КМОП-ТТЛ. Видно, что полностью КМОП-система демонстрирует наибольшую помехоустойчивость

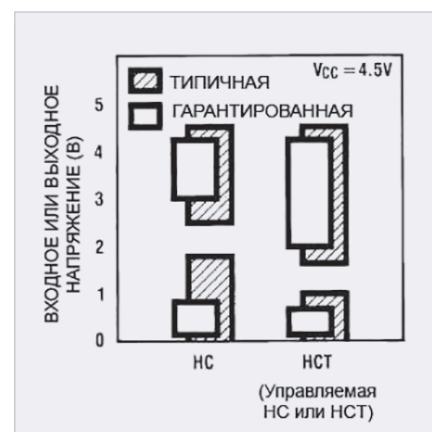


Рис. 5. Рисунок показывает помехоустойчивость семейств, основанных на HC- и HCT-логике. HC более устойчива к «земляному» шуму, HCT более устойчива к шуму по цепи питания

тическому повреждению. Таким образом, следует подключать неиспользуемые входы к VCC или «земле» либо через резистор, либо непосредственно.

И наконец, для правильного логического функционирования следует использовать входы со временами спада и нарастания быстрее, чем 500 нс. Более медленные времена нарастания могут привести к логическим ошибкам и генерации.

### Соблюдайте правила выходов

Следует соблюдать определённые правила использования выходов 54НС/74НС, так же, как и для входов. Выходные напряжения не должны превышать напряжение питания, и токи выходных диодов не должны превышать 20 мА. Кроме того, среднеквадратичное значение выходного тока нагрузки не должно пре-

вышать 25 мА для 4 мА приборов со стандартными выходами или 35 мА для 6 мА приборов. Металлические проводники кристалла диктуют это ограничение. Нарушения могут привести к долговременному повреждению. Намного большие токи (пиковое значение больше, чем 100 мА), возникающие от зарядки ёмкостных нагрузок и управления линиями, являются нормальным явлением и не создают существенных проблем. На практике эффективное значение выходного тока не должно превышать требование по выходному номинальному току. В отличие от входов, неиспользуемые выходы должны быть оставлены неподключёнными, чтобы позволить выходу переключаться без потребления постоянного тока. При тестировании устройства часто бывает необходимо закоротить выход одного КМОП-прибора, чтобы пере-



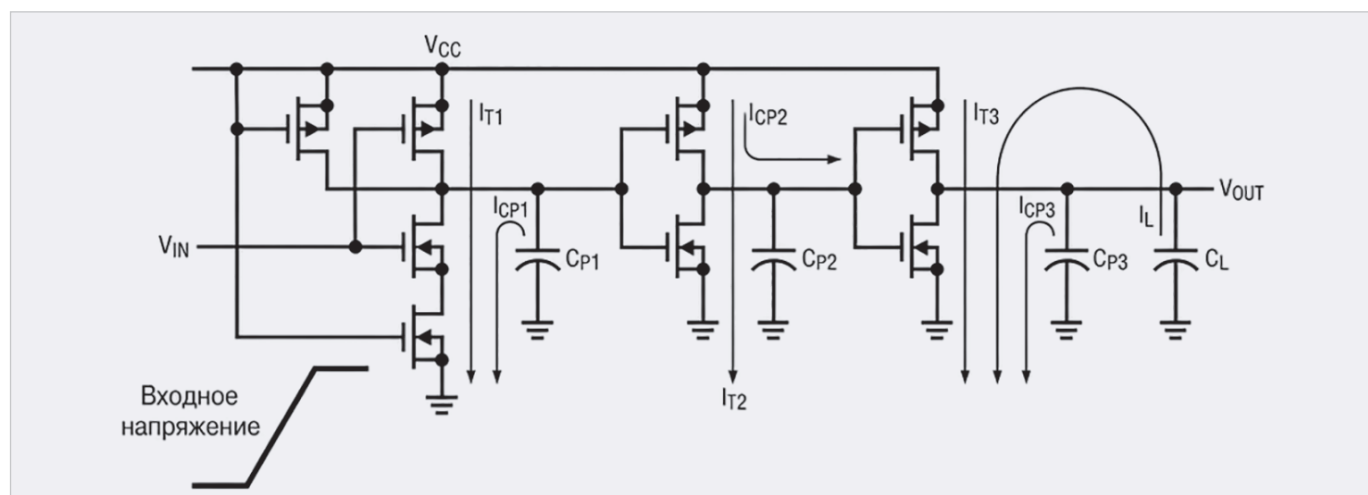


Рис. 6. Схема показывает токи в элементе 74НС00, которые возникают при подаче положительной входной ступеньки. Также показаны внутренние паразитные и внешние нагрузочные ёмкости

грузить его и вынудить появление определённого логического уровня на входе ИС, управляемой этим выходом. В других случаях может потребоваться закоротить выходы только один раз. Так можно сделать без деградации параметров ИС, если следовать нескольким правилам. При стендовых испытаниях приборов 54НС/74НС, к примеру, можно закорачивать один выход на несколько минут без повреждения. При автоматическом тестировании можно закорачивать до восьми выходов продолжительностью до одной секунды. Опять же, здесь ограничение накладывается металлизацией.

### Пояснения по электропитанию

Теперь, когда мы разобрались со входными и выходными сигналами, уделим внимание электропитанию. Например, уровни питания влияют на логическую работу устройства. Однако для НС-приборов напряжение питания следует поддерживать в диапазоне от 2 В до 6 В и в диапазоне от 4,5 В до 5,5 В для НСТ-приборов. Напряжения величиной 7 В и 0 В не причинят вреда ИС, но производительность при этих уровнях не гарантируется. Однако НС и НСТ (за исключением одновибраторов и триггеров Шмитта) могут работать при напряжении питания вплоть до 1,4 В.

Для любой ИС опасно менять местами полюсы источника питания. При этом диод подложки сместится в прямом направлении между  $V_{CC}$  и «землёй» (рис. 1), приводя к чрезмерным токам и повреждению ИС. Для входов и выходов нельзя позволять эффек-

тивным значениям токов  $V_{CC}$  или «земли» превышать 50 мА для 4 МА приборов или 70 мА для 6 МА приборов. Опять же, переходные процессы

не создают существенных проблем, пока их эффективные величины остаются в пределах допустимых значений.

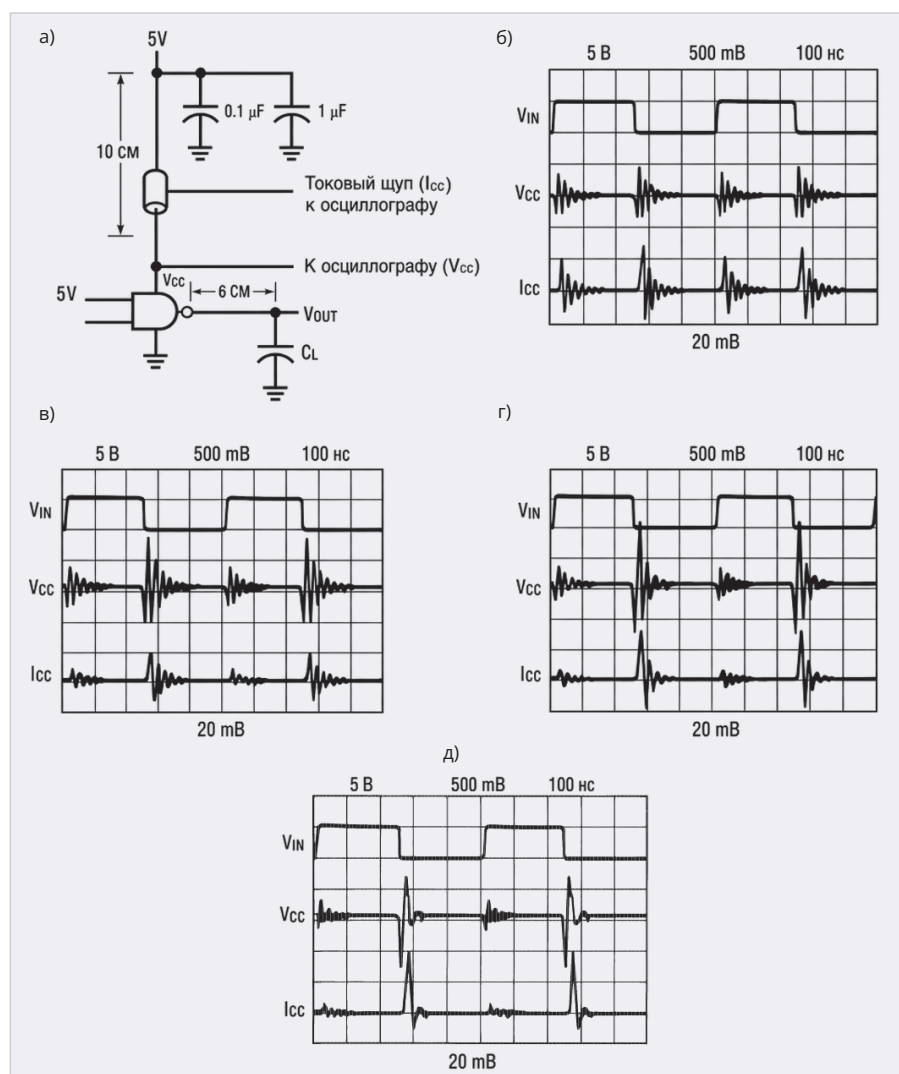


Рис. 7. Показывает эффекты ёмкостных нагрузок. Рисунок (б) до (д) показывают «пики», возникающие без нагрузки и с ёмкостными нагрузками 15, 50 и 100 пФ, соответственно «звон» возникает из-за эффектов линий передач в тестовой схеме

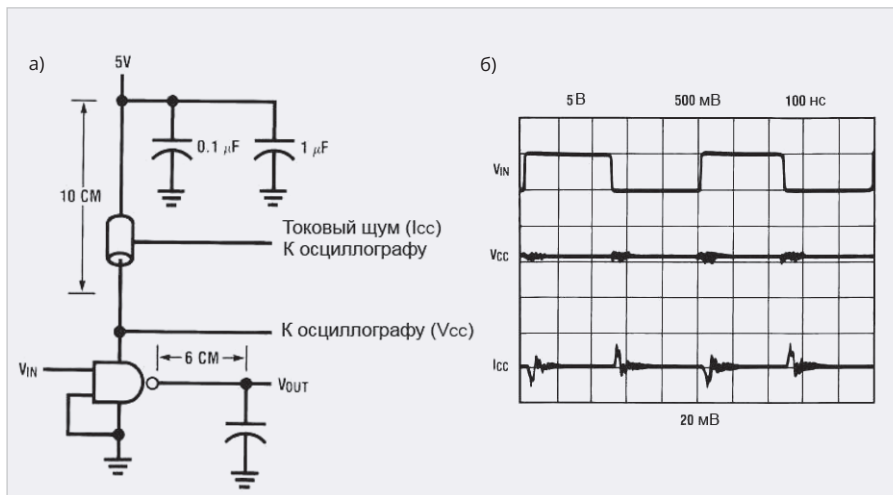


Рис. 8. Схема на кристалле элемента 74НС00 перед выходным каскадом (а) генерирует слабые токовые пики, как показано на рисунке (б). В тестовой схеме переключается только один вход (но не выход). Следует отметить очень малые помехи, возникающие в цепи питания

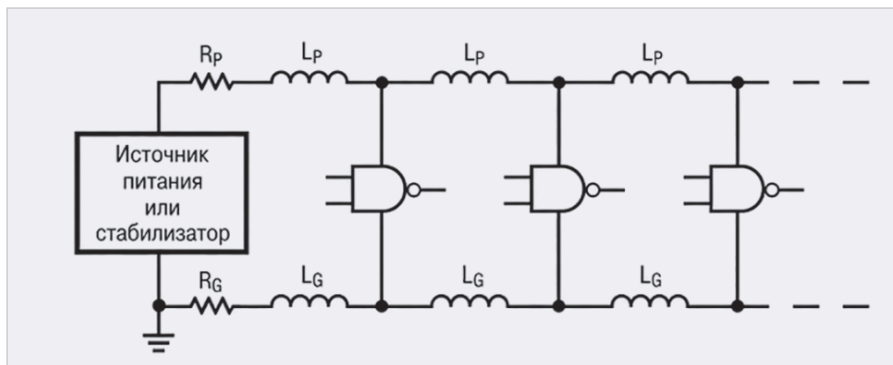


Рис. 9. Эквивалентная схема для шин источника питания показывает последовательные индуктивности «земли» и «питания». Старайтесь минимизировать эти индуктивности посредством аккуратного проектирования топологии печатной платы

## Понятие шума

Что случится, если только что рассмотренные сигналы не являются «чистыми»? В системах цифровой логики «шум» определяется как внешнее напряжение в сигнальных или питающих цепях. Для КМОП-, ЭСЛ- или ТТЛ-приборов системный шум, который достаточно велик, может повлиять на целостность логических сигналов. Семейства КМОП-логики, такие как CD4000 и 74С, высокоустойчивы к определённым типам системного шума. Эта устойчивость получается в основном благодаря природе КМОП, но также и в связи с тем, что медлительность приборов сокращает помехи из-за самоиндукции цепей питания и перекрёстных помех и предотвращает реакцию логики на короткие наведённые извне или излучённые переходные процессы.

Однако в быстродействующих КМОП (которые примерно в 10 раз

быстрее, чем логика семейства CD4000) перекрёстные помехи, шум, наведённый по цепям питания, и шумовые переходные процессы становятся существенными. Более высокие скорости позволяют прибору реагировать быстрее на внешние наведённые шумовые переходные процессы и делать акцент на индуктивных и ёмкостных паразитных межсоединениях, которые увеличивают помехи из-за самоиндукции и перекрёстных помех.

Поскольку семейство НС-КМОП точно определяет входные уровни, подобно уровням логики семейства CD4000, подавление его шумов по постоянно току также превосходит LS-ТТЛ. Так как быстродействующее КМОП-семейство имеет выходной импеданс в 10 раз меньше, чем у приборов семейства CD4000, оно менее чувствительно к шумовым токам, наводимым на его выходы. В результате меньшие пара-

зитные напряжения индуцируются для заданной величины тока.

Чтобы количественно определить эти шумовые параметры, сначала определим «помехоустойчивость» – способность прибора предотвратить распространение шума от входа к выходу. Точнее говоря, это величина напряжения, которое может быть приложено ко входу и не вызовет изменения состояния выхода. Для НС-КМОП эта помехоустойчивость составляет приблизительно 2 В; в наихудшем случае это максимальные входные Низкий и Высокий логические уровни, указанные в спецификации.

Помехоустойчивость является важным свойством, но запас помехоустойчивости более пригоден, потому что он определяет величину шума, который является допустимым для системы и при котором система сохраняет правильную логическую работу. Он определяется как разница между выходным Низким (или Высоким) логическим уровнем одного элемента и входным Низким (или Высоким) логическим уровнем элемента, которым управляет данный элемент.

К примеру, в НС-КМОП, использующем VCC 4,5 В, типичными выходными уровнями являются «земля» и VCC, и входные пороги составляют VIN = 3,15 В и VIL = 0,9 В. Эти величины дают запас помехоустойчивости приблизительно 1300 мВ (логическая единица) и 850 мВ (логический ноль). Запас помехоустойчивости для семейства LS составляет 700 мВ и 400 мВ соответственно. Следует заметить, что входные уровни 54НС/74НС слегка смещены в сторону «земли», поэтому ИС лучше устойчивы к шуму по VCC, чем к «земляному» шуму.

Чтобы проиллюстрировать запас помехоустойчивости и помехоустойчивость, рис. 2 показывает выходной сигнал, получающийся в случае подачи на вход 74НС00 нескольких типов искусственного шума. Типично, что даже 2 В или больший входной шум вызывает малое изменение на выходе.

На рис. 3 показано, как шум влияет на тактовый вход 74НС74. Опять же, никаких логических ошибок не происходит при 2 В или большем тактовом шуму.

Подсемейство ИС 54НСТ/74НСТ имеет входной буфер, специально сконструированный, чтобы соответствовать входным ТТЛ-уровням в 0,8 В и 2 В. Поэтому характеристики их помехо-



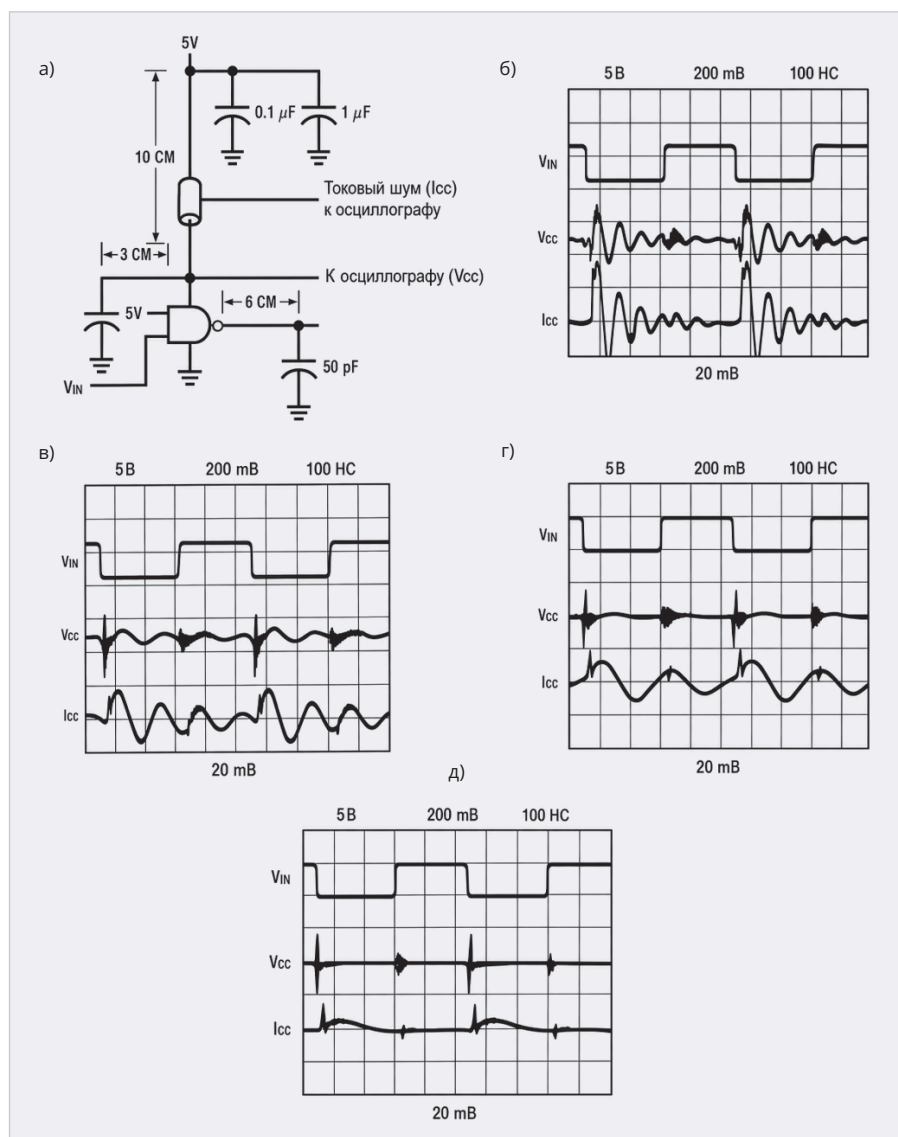


Рис. 10. Демонстрирует важность развязки. Рисунки от (б) до (д) показывают переходные процессы в источнике питания, возникающие, когда 74HC00 использует блокирующие конденсаторы 1, 4, 7, 10 и 100 нФ соответственно

устойчивости в основном отличаются от характеристик приборов 54НС/74НС. При оценке этих различий отметим два основных применения для НСТ-логики: в ТТЛ- или КМОП-системе, или в полностью КМОП-, НС- или НСТ-системе.

В первом случае НСТ-входы управляются выходами, которые являются в основном ТТЛ-выходами и специфицируют выходные напряжения на уровне 0,4 В и 2,4 В (или 0,5 В и 2,7 В). В этой ситуации заданный запас помехоустойчивости подобен ТТЛ: 400 мВ для логического нуля и 400 мВ или 700 мВ для логической единицы. Эти величины, показанные на рис. 4, значительно меньше величин, свойственных для полностью НС-системы.

Теперь рассмотрим второй случай. При использовании НСТ вместе с НС выходные логические уровни почти

эквивалентны уровням напряжения питания. Поэтому заданный для НСТ запас помехоустойчивости приблизительно равен 700 мВ для логического нуля и 2,4 В для логической единицы. На первый взгляд, высокий запас помехоустойчивости для логической единицы может показаться странным, однако это является компромиссом между помехоустойчивостью по уровням логического нуля и логической единицы. Сравните две передаточные функции элементов на рис. 5: прибор НСТ имеет точку логического перехода на уровне 1,4 В, в то время как НС-элемент имеет точку перехода 2,4 В. Таким образом, типичная производительность НС в два раза больше НСТ для «земляного» шума, в то время как для VCC шума НСТ примерно на 50% лучше.

Какой же вывод? В нормальной системе (включая полностью КМОП-

системы) НС обеспечивает лучшую помехоустойчивость, чем НСТ. Единственный случай, где НСТ могут быть более полезны, так это в системах, сконструированных с бесшумной «землей» и «грязным» VCC. Естественно, это приближение не самое лучшее. Второй факт, выдвигаемый этими передаточными функциями, заключается в том, что НС консервативно специфицировано для своих входных и выходных логических уровней, тогда как НСТ специфицируется более жестко. Поэтому, даже если пределы спецификации для НСТ кажутся лучше, действительная производительность системы показывает, что НС обеспечивает лучший полный запас помехоустойчивости.

## Рассмотрим системный шум

Теперь обратимся к детальному рассмотрению системного шума, который можно сгруппировать в несколько категорий в зависимости от источника. Тип шума диктует соответствующую методику его подавления.

- Шум источника питания ИСС, генерируемый в линии источника питания, образуется от переключения логики в КМОП-схемах.
- Отражения в линиях передачи, нежелательные явления «звона» и «просечек» возникают от сигналов, распространяющихся вдоль неправильно завершённых линий передачи и сигнальных линий.
- Перекрёстные помехи сигналов вызываются ёмкостной или индуктивной связью внешних напряжений от одной сигнальной линии к другой или к линии источника питания.
- Излучённый шум, радиочастотное явление, которое возникает внутри быстродействующей логической системы, излучается на другие системы. Оно возникает от излучённой высокочастотной энергии при переключении логики. Этот шум не является основной проблемой в отношении целостности сигналов, но может интерферировать с другими системами.

Пики напряжения по цепи источника питания являются, возможно, самыми важными составляющими системного шума. Когда любой элемент изменяет логическое состояние, он генерирует токовый «пик», который производит переходное напряжение. Если эти переходные процессы

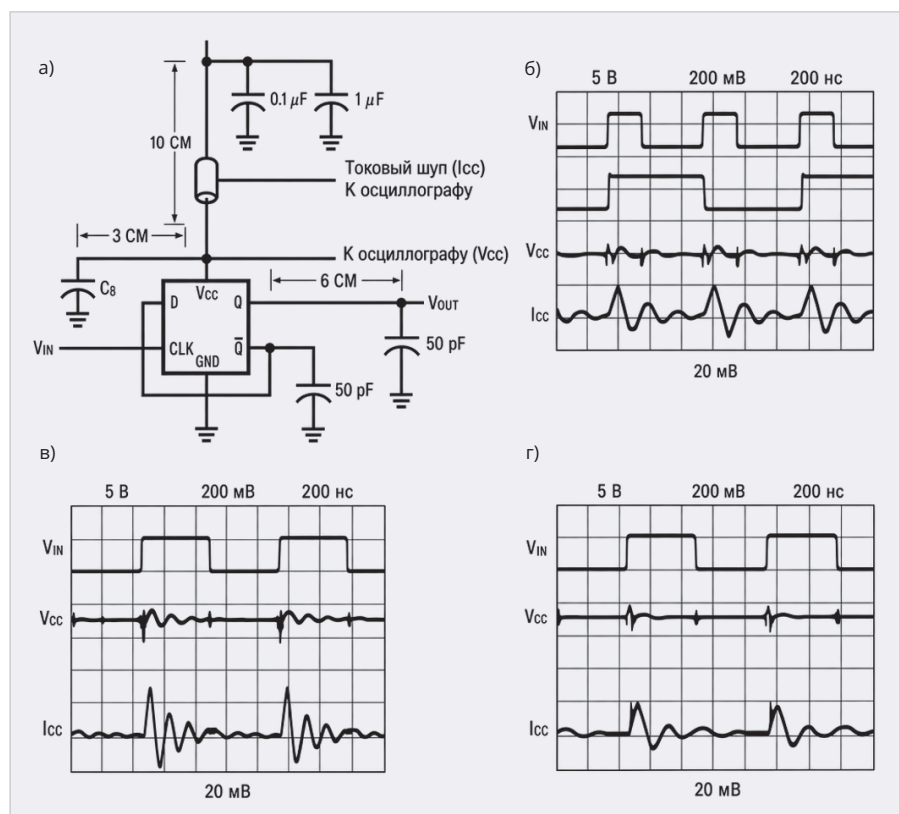


Рис. 11. Показывает результаты, подобные изображённым на рис. 10. Эти рисунки показывают эффекты развязки триггера 74НС74 конденсаторами от 1 (б) до 10 мкФ (г). Можно видеть, что 10 мкФ блокирующий конденсатор уменьшает пульсации в цепи питания приблизительно на 40% по сравнению с конденсатором ёмкостью 1 мкФ

становятся слишком большими, они могут вызвать логические ошибки, потому что падение напряжения питания вызывает сбой внутренней логики или по той причине, что «пик» по цепи питания на выходе одной схемы создаёт напряжение внешнего шума на входе следующего прибора.

Если КМОП-логика находится в состоянии покоя, то между VCC и «землёй» ток практически не течёт. Но когда внутренний элемент или выходной буфер изменяет состояние, мгновенный ток протекает от VCC на «землю». Этот ток имеет две составляющие: ток, необходимый для заряда или разряда любой паразитной или нагрузочной ёмкости, и ток, который течёт непосредственно от VCC к «земле», когда р- и n-канальные транзисторы включаются на мгновение в момент переключения входного сигнала.

Рис. 6 показывает пути для этих токовых составляющих внутри элемента 74НС00 при подаче положительной ступеньки сигнала на вход прибора. CP1, CP2 и CP3 представляют внутренние паразитные ёмкости; CL представляет внешнюю нагрузочную ёмкость. IT1, IT2 и IT3 соответствую-

ют токам, которые протекают через оба n- и р-канальные транзисторы в момент переключения. CP1, CP2 и CP3 – это заряжающие токи для ёмкостей. Переходный процесс при переключении, вызываемый изменением состояния ненагруженного выхода, типично потребляет 40 мА (пиковое значение).

Рисунок 7б показывает «пики» тока и напряжения, возникающие от переключения одиночного ненагруженного элемента И-НЕ. Рисунки от 7в до 7д показывают увеличение токовых «пиков» из-за добавления 15, 50 и 100 пФ нагрузок. Большая величина «звона» происходит от эффектов линии передач тестовой схемы.

«Звон» возникает частично из-за того, что КМОП-элемент переключается из очень высокого в очень низкий импеданс и обратно. Следует заметить, что даже для нагрузок средней величины нагрузочный ёмкостный ток становится главной токовой составляющей, контролируемой значительным увеличением тока из ненагруженного состояния к случаю со 100 пФ нагрузкой.

Хотя внутренняя логика генерирует токовые «пики» при переключении,

всё же большая часть «пикового» тока происходит от переключения выходных схем, поскольку выходы имеют самые большие р- и n-канальные токи и самые большие паразитные и нагрузочные ёмкости. Рисунок 8 показывает ток ICC для элемента 74НС00 при переключении одного входа, другие заземлены (таким образом, переключений выхода не происходит).

Наилучший способ уменьшить напряжение шума переходных процессов – это выполнить хорошую разводку шин питания. Следует поддерживать низкий импеданс по переменному току от каждого VCC входа схемы на «землю». В одной модели для шины питания (рис. 9) шины VCC и «земли» представляют индуктивности, сопротивления и ёмкости. Чтобы уменьшить переходное напряжение, паразитные индуктивности шин питания нужно делать как можно меньшими уменьшением длины трасс, увеличением их ширины, использованием «земляных» слоёв, методик полосковых и микрополосковых линий передач и развязыванием источника питания с помощью блокирующих конденсаторов.

Для эффективной развязки питания блокирующие конденсаторы должны обеспечивать заряд, требуемый токовым «пиком» на время его появления с минимальным изменением напряжения. Приблизительную величину блокирующего конденсатора можно вычислить из следующего выражения:

$$C_{\text{ВРЯЗ}} = \frac{I_{dt}}{dV} = \frac{(\text{ПИКОВЫЙ ТОК}) \cdot (\text{ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ПИКА})}{(\text{ДОПУСТИМОЕ ПАДЕНИЕ НАПЯЖЕНИЯ})}$$

Рассмотрим пример: типовая схема MM54HC/74HC имеет переходный ток переключения ICC около 20 мА, продолжающийся приблизительно 20 нс (исключая «звон»). Если допустить пиковый шум величиной 400 мВ, требуемая ёмкость блокировочного конденсатора составит:  $(20 \text{ мА})(20 \text{ нс})/0,4 \text{ В} = 1 \text{ нФ}$  на каждый выход.

Для того чтобы предотвратить дополнительные пики напряжения, этот блокирующий конденсатор должен иметь низкое индуктивное сопротивление. Поэтому следует использовать высокочастотные керамические конденсаторы и помещать их как можно ближе к ИС, чтобы минимизировать индуктивность проводников. Приблизительную величину допустимой индуктивности даёт следующее выражение:



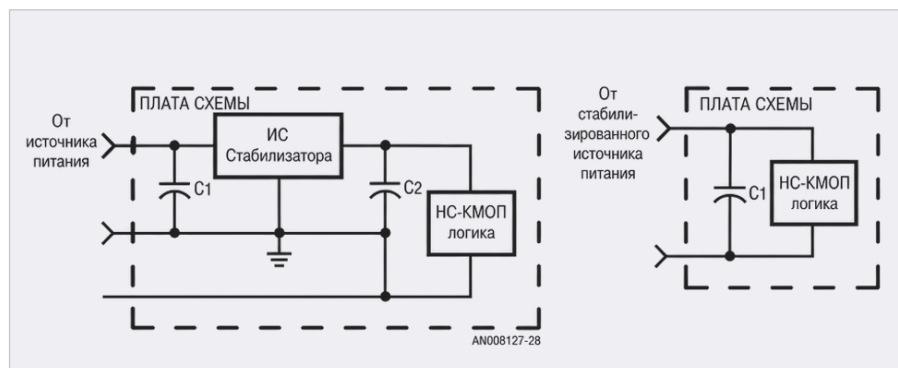


Рис. 12. Схема показывает способ шунтирования при использовании местных стабилизаторов (а); показывает способ шунтирования при использовании центрального стабилизированного источника (б), при этом желательно использовать танталовые или алюминиевые электролитические конденсаторы

$$L_{\text{SUPPLY}} = \frac{V_{dt}}{di} = \frac{(\text{ПИКОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ})}{(\text{ПИКОВЫЙ ТОК})} \cdot \frac{(\text{ВРЕМЯ НАРАСТАНИЯ ИЛИ СПАДА ПИКА})}{1}$$

К примеру, ограничивая индуктивный шумовой «пик» на уровне 100 мВ, при токе 20 мА и времени нарастания 4 нс, получим:  $(0,4 \text{ В}) / (4 \text{ нс}) / 20 \text{ мА} = 80 \text{ нГн}$ . Заметим, что в дополнение к локальной развязке очень быстрых переключений также необходима развязка «пиков», генерируемых ИМС на плате. Для развязки устанавливают конденсатор большой ёмкости для сглаживания длинных временных периодов.

Чтобы показать, как развязывание влияет на шум в цепях питания в реальных ситуациях, рис. 10 показывает переходные процессы источника питания, которые возникают при выборе различных величин развязывающих конденсаторов. В этом примере переключается один элемент ИС типа 74НС00, и 1, 4, 7, 10 и 100 нФ конденсаторы подключаются к источнику питания проводниками длиной приблизительно 10 см.

Рисунок 11 представляет подобные результаты, полученные для прибора типа 74НС74. Следует заметить, что в обоих случаях (хотя ситуация без блокировочного конденсатора не показана) даже 1 нФ конденсатор значительно уменьшает переходные напряжения.

Основываясь на эмпирических или теоретических рассуждениях, можно определить набор руководящих принципов. Эти практические принципы служат только как основание для системы, которая должна обеспечивать хорошие результаты. Следовательно, существует некоторая «свобода действий» в случае их применения в практических конструкциях. Как эмпирическое правило, обычно

хорошей практикой конструирования является ограничение шумов VCC и «земли» до уровня меньше, чем 250 мВ.

Прежде чем представить руководящие принципы, исследуем некоторые сравнительные свойства более ранних КМОП, НС, НСТ и LS-TTL приборов. Во-первых, из-за более высоких скоростей и больших выходных токов требования к развязке цепей источника питания для НС-приборов более строгие, чем для более ранних КМОП-приборов с металлическими затворами. По сравнению с теми же требованиями для LS-TTL требования для НС/НСТ подобны или немного строже, в зависимости от приложения.

Кроме того, для произвольной логики 54НС/74НС и 54LS/74LS подобны, но в приложениях управления шинами НС приборы могут производить большие пики. И наконец, НСТ-логика требует лучшего заземления, чем НС-логика. В действительности меры по конструированию на её основе близко соответствуют LS-TTL. Однако, как и НС, НСТ создаёт большие пики по шине питания VCC в приложениях управления шинами.

Теперь представим руководящие принципы.

- Делайте разводку шин питания как можно короче. При использовании двухсторонних или многослойных печатных плат применяйте полосковые линии, линии передачи или «земляные» слои.
- Делайте шины «заземления» как можно короче, и на печатных платах делайте их как можно шире, даже если ширина трассы изменяется. Используйте отдельные «земляные» дорожки, чтобы запитать сильноточные приборы, такие как реле и драйверы линий передач.

- В системах, совмещающих линейные и логические функции, и где шум источника питания критичен для производительности аналоговых компонентов, используйте отдельные шины питания или даже отдельные источники питания.

- При использовании местных стабилизаторов блокируйте их входы с помощью танталового конденсатора ёмкостью не менее 1 мкФ (рис. 12а) и шунтируйте их выходы танталовыми или электролитическими конденсаторами в диапазоне от 10 до 50 мкФ (рис. 12б).

- Если система использует централизованный стабилизированный источник питания, используйте танталовый электролитический конденсатор ёмкостью от 10 до 20 мкФ или алюминиевый электролитический конденсатор ёмкостью от 50 до 100 мкФ, чтобы развязать шины питания VCC, подключённые к печатной плате.

- Обеспечивайте локальную развязку. Для произвольной логики эмпирическое правило диктует приблизительно 10 нФ на каждые 2–5 корпусов и 100 нФ на каждые 10 корпусов. Эти конденсаторы можно сгруппировать, но более эффективно распределить их между приборами. Если конструкция имеет значительное количество синхронной логики с выходами, которые переключаются одновременно, рекомендуется использовать дополнительную развязку. Триггеры и восьмеричные буферы в шинно-ориентированных схемах также требуют дополнительную развязку. Заметим, что схемы с проводным монтажом могут требовать большей развязки, чем многослойные или печатные платы с «земляным» слоем.

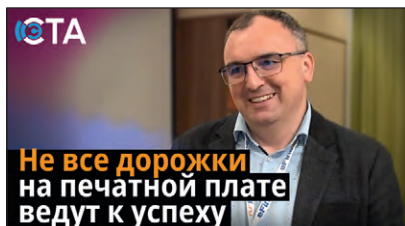
- Для схем, которые управляют линиями передач или большими ёмкостными нагрузками (например, микропроцессорными шинами), используйте 10 нФ керамический конденсатор вблизи с выводами питания прибора.

- И наконец, завершайте общие проводники линий передач вблизи драйверов.

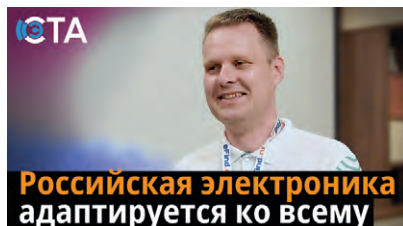
## Литература

1. AN-375.pdf. Fairchild Semiconductor Corporation. URL: [www.fairchildsemi.com](http://www.fairchildsemi.com).

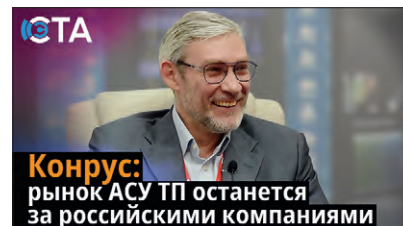




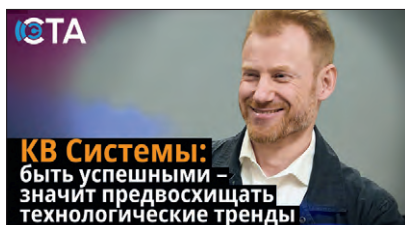
Интервью с Сергеем Шкуратовым – заместителем генерального директора по стратегическому развитию ГК «Диполь»



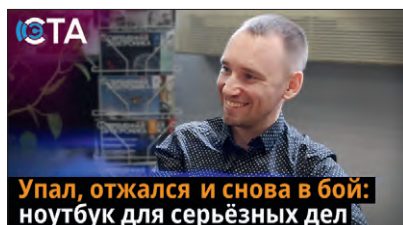
Интервью с Михаилом Русских – инженером по применению «Матрикс Электроника»



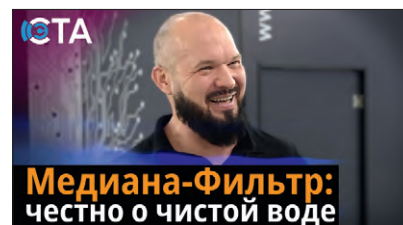
Интервью с Алексеем Турундаевым – генеральным директором АО НПП «Конрус»



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



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



Интервью с Владимиром Смирновым – генеральным директором и с Андреем Саловым – заместителем главного инженера АО «НПК Медиана-Фильтр»

## СМОТРИТЕ НА КАНАЛЕ СЭТА



## СЛУШАЙТЕ В ПОДКАСТЕ СЭТА







Специализированные конференции

# ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ 2026-2027

Промышленная автоматизация

Цифровизация производства

Интернет вещей и большие данные

Искусственный интеллект

Информационная безопасность

Автоматизация зданий и инженерных систем

2026

5-я специализированная конференция

**22.09 ПТА – УФА**

16-я специализированная конференция

**27.10 ПТА – НОВОСИБИРСК**

2027

22-я специализированная конференция

**10.02 ПТА – ЕКАТЕРИНБУРГ**

8-я специализированная конференция

**31.03 ПТА – КАЗАНЬ**

18-я специализированная конференция

**25–26.05 ПТА – САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

5-я специализированная конференция

**22.09 ПТА – ЧЕЛЯБИНСК**

17-я специализированная конференция

**26.10 ПТА – НОВОСИБИРСК**

[www.pta-expo.ru](http://www.pta-expo.ru)