

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

WWW.CTA.RU

7

2025



Электронная
версия этого
журнала

ИГОРЬ ЕВГЕНЬЕВИЧ ТАММ: личность и учёный

В НОМЕРЕ:

О ЗДОРОВОМ ПИТАНИИ:

энергоэффективные гибридно-плёночные
DC/DC-преобразователи

БЕЗ ПОМЕХ:

миниатюрные проходные
фильтры для микроэлектроники

rus-elektronika.ru



ЭЛЕКТРОНИКА РОССИИ

Международная ВЫСТАВКА-ФОРУМ

25|26|27
НОЯБРЯ
2025

МОСКВА
Крокус Экспо



12+

Организатор:



Международная
Выставочная
Компания

Официальная поддержка:



Минпромторг
России

Партнеры:



**ЗАБРОНИРУЙТЕ
СТЕНД:**

**+7 (812) 401 69 55,
electron@mvk.ru**

Реклама



ЧИТАЙТЕ В КОМФОРТЕ



ПЕЧАТНАЯ ВЕРСИЯ ЖУРНАЛА «СТА»

подписка с гарантированной доставкой



онлайн: www.cta.ru • +7 495 234-0635 • shop@cta.ru

на почте: по каталогу «Урал-Пресс» (на год – 81872, на полугодие – 72419)



Здравствуйтесь, уважаемые друзья!

Этим выпуском журнала мы начинаем рассказ о выдающемся советском учёном-физике, одном из основоположников современной теоретической физики в СССР, лауреате Нобелевской премии по физике Игоре Евгеньевиче Тамме (1895–1971). В обширном перечне его научных заслуг объяснение эффекта Вавилова-Черенкова, вклад в теорию рассеяния фотонов на свободных электронах (эффект Комптона), работы по теории ядерных сил и элементарным частицам, руководство работами по термоядерному синтезу (включая разработку первой советской водородной бомбы). Не менее важен и его вклад в воспитание поколений отечественных учёных. Читайте первую часть очерка, посвящённую биографии и научному наследию выдающегося физика-теоретика.

Начинаем глубокое погружение в мир СВЧ-электроники: в первой части цикла статей «Миниатюрные проходные, помехоподавляющие фильтры для микроэлектроники СВЧ» рассматриваются типы и основные параметры этих важнейших элементов высокочастотных систем.

Продолжая тему энергоэффективности, представляем гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи средней мощности, предназначенные для применения в аппаратуре специального назначения, где к надёжности и стабильности предъявляются повышенные требования.

Статьи о применении панели оператора в качестве терминального устройства, а также описание компактного приёмно-контрольного прибора охранно-пожарной сигнализации на базе программируемого реле открывают новые возможности для малой автоматизации.

Практический интерес вызовут разработки с подробным описанием для повторения: автомат лестничного освещения с акустическим датчиком и таймером, а также двухканальный усилитель для наушников с питанием от батареи – идеальное решение для мобильного аудио.

Здесь вы найдёте рассказы о регистрации импульсной компоненты электромагнитного поля в ОНЧ-диапазоне на фоне сейсмической активности, китайском подвижном электронном нейтрализаторе, а также о многом другом. Каждая статья этого выпуска – шаг вперёд в понимании технологий, формирующих наше будущее.

Следите за новостями на нашем информационном портале www.cta.ru – там вы найдёте свежие материалы, аналитику и архив публикаций. Подписывайтесь на наши каналы в Телеграм, ВКонтакте, RuTube, YouTube и Дзен, чтобы первыми узнавать о новых выпусках и технологических прорывах.

Благодарим вас за доверие и внимание. Читайте с удовольствием, вдохновляйтесь идеями и создавайте новое вместе с нами.

Юрий Широков, главный редактор

Журнал «Современная электроника»

Издаётся с 2004 года

Главный редактор Ю. В. Широков

Заместитель главного редактора А. В. Малыгин

Редакционная коллегия А. Е. Балакирев, В. К. Жданкин,

С. А. Сорокин, Р. Х. Хакимов

Вёрстка 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.

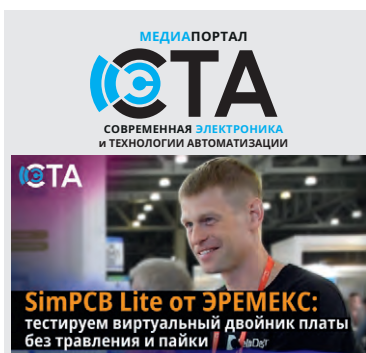
© СТА-ПРЕСС, 2025

Мы в соцсетях



РЕКЛАМОДАТЕЛИ

LITEMAX	19
ПТА	4-я стр. обл.
Элеконд	7
Электроника России	2-я стр. обл.
Эркон	9



Интервью с Виктором Ухиным, инженером по технической поддержке Эремекс.

Новый инструмент для моделирования печатных плат — SimPCB Lite
Компания Эремекс представляет SimPCB Lite — программу для анализа целостности сигналов и снижения потерь в высокоскоростных цифровых и высокочастотных аналоговых устройствах.

Что умеет SimPCB Lite?

Моделирование линий передач с высокой точностью (погрешность 2-5%).

Расчёт активного сопротивления, индуктивности, ёмкости, проводимости диэлектрика и импеданса.

Анализ S-параметров и перекрёстных помех.

Поддержка 64+ моделей линий передач с возможностью настройки геометрии.

Реалистичное моделирование переходных отверстий (в отличие от упрощённых моделей Polar).

Почему это важно?

Импортозамещение Polar CI9000 с более точными расчётами.

Интеграция с Delta Design (в будущем — полная связь).

Исследовательская лаборатория для инженеров: подбор параметров, проверка гипотез, анализ зависимостей.

Перспективы

Развитие в сторону 3D-моделирования и расширенного анализа ЭМС.

Улучшенная поддержка и оперативные обновления.



ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

- 4** Миниатюрные проходные, помехоподавляющие фильтры для микроэлектроники СВЧ. Часть 1. Виды помех, электрические схемы, основные параметры и конструкция фильтров

Кива Джуринский

- 10** Энергоэффективные гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи средней мощности для применения в аппаратуре специального назначения

Виктор Жданкин

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

- 17** Панель оператора в качестве терминального устройства

Олег Вальпа

- 20** Автоматы лестничного освещения с акустическим датчиком и функцией таймера

Александр Одинец

- 26** Приёмно-контрольный прибор охранно-пожарной сигнализации на базе программируемого реле

Сергей Шишкин

- 34** Двухканальный усилитель для наушников, подключаемых к телефону, с батарейным питанием

Алексей Кузьминов

ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

- 39** Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности

Алексей Галахов

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- 44** 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

Виктор Алексеев

- 60** Китайский подвижный электронный нейтрализатор

Вано Мизандари

Миниатюрные проходные, помехоподавляющие фильтры для микроэлектроники СВЧ.

Часть 1. Виды помех, электрические схемы, основные параметры и конструкция фильтров

Кива Джуринский

Рассмотрены основные виды помех в устройствах микроэлектроники СВЧ и их подавление при помощи фильтров нижних частот.

Приведены электрические схемы и проанализированы основные параметры фильтров: частота среза, вносимое затухание, потери, сопротивление изоляции, номинальное напряжение и ток.

Показана необходимость создания для современных СВЧ-устройств миниатюрных помехоподавляющих фильтров, герметизированных металlostеклянным спаем. Рассмотрены особенности измерения параметров фильтров с использованием анализаторов цепей.

Описаны конструкции помехоподавляющих фильтров разных типов.

1. Виды помех в устройствах микроэлектроники СВЧ

Источниками помех в устройствах микроэлектроники СВЧ являются блоки питания, микропроцессоры, видеодрайверы, радиочастотные генераторы и многие другие компоненты. Помехи могут распространяться двумя способами. Первый – излучением, когда электромагнитная энергия распространяется в пространстве и взаимодействует с другими системами. Второй – проводной путь, когда помеха проходит по проводникам системы, таким как дорожки печатной платы и выводы компонентов. Часто помехи возникают из-за ненадёжных соединений в электронных устройствах. Проводная помеха будет улавливаться другими устройствами, подключёнными к той же линии [1–11].

Нежелательные помехи подразделяются на радиочастотные помехи (Radio

Frequency Interference – RFI) и электромагнитные помехи (Electromagnetic Interference – EMI) [1–2]. RFI – помехи в диапазоне частот 3–30 ГГц и более, вызваны сигналами из различных источников. EMI включают в себя помехи более низких частот как от природных, так и от искусственных источников. К природным источникам относятся молнии и солнечная радиация, а к искусственным источникам – линии электропередач, электронное оборудование и многое другое. Подавление помех в этом случае происходит за счёт экранирования, создания барьеров, которые поглощают или перенаправляют электромагнитные помехи, предотвращая их воздействие на электронные компоненты.

В технической литературе помехи этих двух видов чаще всего объединяют и называют электромагнитными

помехами. Однако при поиске необходимой информации по помехоподавляющим фильтрам целесообразно их указывать как EMI/RFI Filters.

Эффективная фильтрация электромагнитных помех необходима практически для каждого современного электронного устройства. Помехи вызывают сбои в работе, ошибки в данных и системные сбои, серьёзно влияя на надёжность и функциональность электронных систем. В связи с миниатюризацией аппаратуры, ростом чувствительности схем и компонентов к помехам и повышением частоты передачи сигналов ужесточаются требования к обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС). Под ЭМС понимается «способность технических средств функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам» [3].

В настоящее время общепризнано, что основным средством подавления ЭМП и развязывания по высокой частоте цепей питания и управляющих сигналов являются фильтры нижних частот, которые пропускают низкочастотный сигнал и блокируют нежелательные высокочастотные помехи. Фильтры устанавливают в каждый незаземлённый провод в цепи питания между источником и нагрузкой по возможности как можно ближе к источнику помех. Поэтому помехоподавляющие фильтры стали неотъемлемой частью электронных модулей СВЧ и микроэлектронной аппаратуры [1–11].

Различают две большие группы миниатюрных помехоподавляющих фильтров: проходные, монтируемые в корпуса изделий, и для поверхностного монтажа на печатные платы. В данной статье рассмотрены миниатюрные фильтры первой группы.

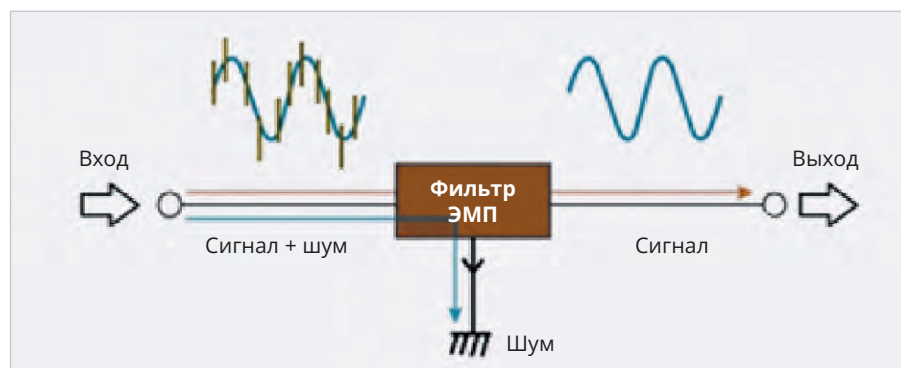


Рис. 1. Схематическое изображение работы помехоподавляющего фильтра

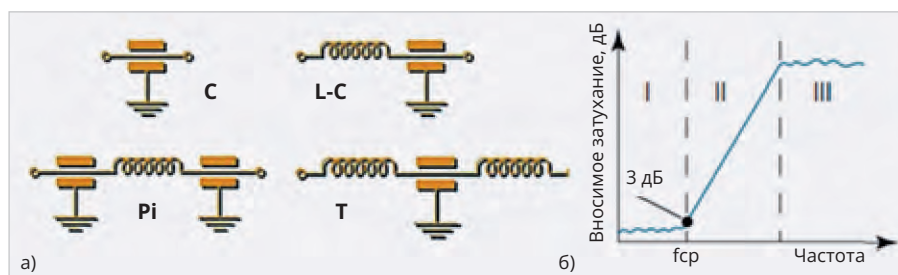


Рис. 2. Электрические схемы C-, L-C-, Pi- и T-фильтров нижних частот (а), частотная характеристика фильтра нижних частот. I – полоса пропускания; II – полоса перехода; III – полоса задержания, f_{cp} – частота среза (б)

Фильтр электромагнитных помех блокирует помехи, чтобы защитить от их негативного воздействия другие электронные устройства. При этом высокочастотные сигналы воспринимаются как шум, а низкочастотные сигналы пропускаются (рис. 1) [4].

2. Электрические схемы фильтров нижних частот

Электрические схемы однозвенных фильтров нижних частот приведены на рис. 2 [4, 5]. Помехоподавляющий фильтр нижних частот представляет собой линейный четырёхполюсник, предназначенный для частотной селекции сигналов. Фильтр выделяет из сложного электромагнитного колебания, подаваемого на его вход, частотные составляющие, расположенные в полосе пропускания, и подавляет частотные составляющие в полосе задержания (рис. 2б) [5].

C-фильтр – проходной конденсатор с тремя выводами, включаемый между источником помехи и нагрузкой. Конденсаторы работают как фильтры нижних частот, когда подключаются параллельно нагрузке в цепи между сигнальным проводником и «землёй» устройства. Особенность импеданса конденсатора заключается в том, что он уменьшается на более высоких частотах.

Примечание: импеданс – это комплексное эффективное электрическое сопротивление между двумя узлами для цепи гармонического сигнала. Символом полного сопротивления является Z , а единицей измерения Ом. $Z = \sqrt{R^2 + XL^2}$, где R – активное, а XL – реактивное сопротивление. Значения Z и XL зависят от частоты.

Так как характер помехи в основном высокочастотный, она отводится конденсатором на «землю». При большой ёмкости конденсатор шунтирует переменную составляющую тока помехи, и она не попадает в нагруз-

ку, и в нагрузку поступает постоянный ток. В высокочастотных схемах требуются конденсаторы с низкими эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR) и эквивалентной последовательной индуктивностью (ESL) для обеспечения минимальных потерь сигнала и высокой эффективности. Низкое значение ESR указывает на то, что фильтр не будет рассеивать много энергии во время работы.

L-C-фильтр содержит один индуктивный и один ёмкостной элементы и применяется в случае низкого импеданса источника и высокого импеданса нагрузки. В случае использования индуктивного элемента он включается последовательно в цепь с помехами.

В качестве индуктивности в таких фильтрах применяют трубчатые ферритовые сердечники, надетые на центральный проводник. Основную долю (более 90%) в величину индуктивности вносит феррит. Для применения в фильтрах выбирают высокочастотные термостабильные никель-цинковые ферриты марки 50 ВН [5]. Полное сопротивление индуктивности растёт с увеличением частоты, что позволяет ослабить или подавить помехи. Индуктивность при работе на высоких частотах по своим свойствам приближаются к резистору, что, во-первых, уменьшает вероятность возникновения паразитных колебаний, а во-вторых, не искажает форму полезного сигнала. Конденсатор действует как «канал связи с землёй» для сигналов, но только на высокой частоте, где и возникает «шум». Индуктивность отбрасывает «шум» обратно по линии, но пропускает сигналы постоянного тока [6].

Pi-фильтр содержит два ёмкостных и один индуктивный элементы. Наличие второго конденсатора значительно улучшает параметры подавления ЭМП. Фильтры с такой электрической схемой целесообразно применять при

низких значениях импеданса источника и нагрузки.

T-фильтр состоит из двух индуктивных и одного ёмкостного элементов. Этот фильтр применяют в случае высоких значений импеданса входа и выхода, например, в цепях коммутации.

3. Основные параметры помехоподавляющих фильтров

Основными параметрами фильтров с разными электрическими схемами являются: частота среза; вносимое затухание; электрическая ёмкость; номинальное напряжение и ток; сопротивление изоляции; герметичность; рабочий диапазон температур; миниатюрность, конструктивные особенности и удобство применения.

Главными показателями эффективности работы фильтра являются частота среза, величина вносимого затухания (а), размеры полос перехода и задержания (рис. 2б). На *частоте среза фильтра* (f_{cp}) – величина вносимого затухания равна 3 дБ, что на 3 дБ ниже по амплитуде уровня полосы пропускания фильтра. Частота среза определяет нижнюю границу частотного диапазона подавления помех. Частоту среза для LC-фильтра рассчитывают по формуле:

$$f_{cp} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1)$$

где L – индуктивность, C – ёмкость конденсатора.

Эффективность действия помехоподавляющих фильтров оценивают *величиной вносимого затухания* (а) сигнала помех:

$$\alpha(\text{дБ}) = 20 \lg (U_1 / U_2), \quad (2)$$

где U_1 и U_2 – напряжения на нагрузке без фильтра и с фильтром.

Вносимое затухание в технике СВЧ удобно измерять в децибелах. Например, если $U_1 = 100$ мВ, а $U_2 = 1$ мВ, то $\alpha = -40$ дБ. Приведём некоторые полезные соотношения, вытекающие из приведённой формулы (2): 3 дБ соответствуют изменению измеряемой величины в 2 раза, 6 дБ – 4 раза, 10 дБ – 10 раз, 20 дБ – 100 раз, 30 дБ – в 1000 раз и т.д. При величине 40 дБ вносимых потерь на частоте 100 МГц фильтр удаляет 99,99% помех.

Вносимое затухание – один из важнейших параметров при выборе фильтра электромагнитных помех. Чем больше величина вносимого затухания и чем уже полоса перехода, тем выше эффективность подавления ЭМП фильтром.

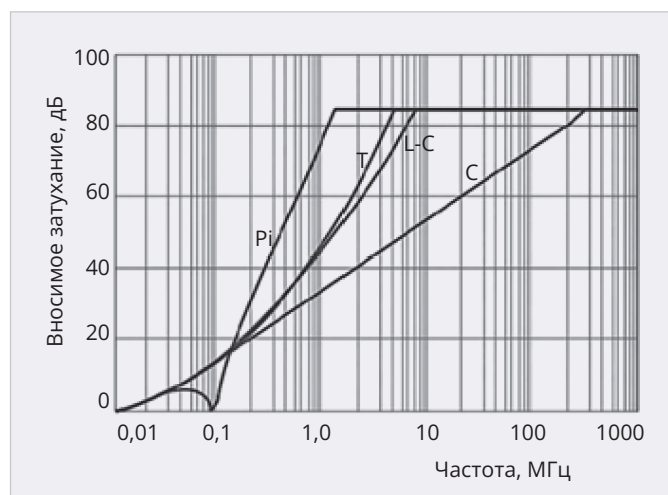


Рис. 3. Частотные зависимости фильтров с электрическими схемами C, L-C, Pi и T

Величина вносимого затухания фильтра зависит от его электрической схемы (рис. 3) [5].

Электрическая ёмкость фильтра (далее – ёмкость) – также важнейший параметр, определяющий все основные электрические параметры фильтра: частоту среза, ширину полосы перехода и уровень вносимого затухания в полосе задержания. Чем больше величина электрической ёмкости, тем меньше частота среза, ширина полосы перехода и тем выше уровень вносимого затухания. Ёмкость фильтров для применения в цепях питания должна быть не менее 1500 пФ, для цепей наносекундных импульсных сигналов (чтобы не исказить форму импульса) – не более 50 пФ [5, 8].

В табл. 1 показана частотная зависимость вносимого затухания от ёмкости фильтров с электрическими схемами C, L-C, Pi [5]. Сравнение частотных зависимостей вносимого затухания фильтров, построенных на основе разных электрических схем, показывает, что эффективность подавления электромагнитных помех возрастает в последовательности схем C, L-C, T и Pi.

Зарубежные компании приводят величины вносимого затухания на определённых частотах, например 10, 100 и 300 МГц, 1 и 10 ГГц. Величину вносимого затухания отечественных фильтров ранее приводили как среднее значение в заданном диапазоне частот. Это обстоятельство следует учитывать при сравнении отечественных и зарубежных фильтров.

Номинальный ток – максимально допустимый непрерывный рабочий ток при номинальном напряжении и заданной температуре окружающей среды.

Номинальный ток фильтра должен быть равен или превышать максимальный постоянный входной ток, который может потреблять устройство [8].

Номинальное напряжение – максимальное напряжение сети, с которым может работать фильтр. Оно должно быть равно или превышать максимальное входное напряжение, подаваемое на фильтруемое устройство. Фильтры могут выдерживать кратковременные перенапряжения выше номинального уровня, но постоянное превышение номинального напряжения может привести к серьёзному повреждению конденсаторов фильтра [8].

Сопротивление изоляции – электрическое сопротивление изоляции между корпусом и выводами фильтра, измеренное при определённом напряжении. Оно определяет токи утечки фильтра. Величина сопротивления изоляции помехоподавляющих фильтров разных типов от 500 МОм до 10 ГОм.

Рабочий диапазон температур – это диапазон температур, при которых фильтр может безопасно работать. Для большинства коммерческих фильтров диапазон рабочих темпера-

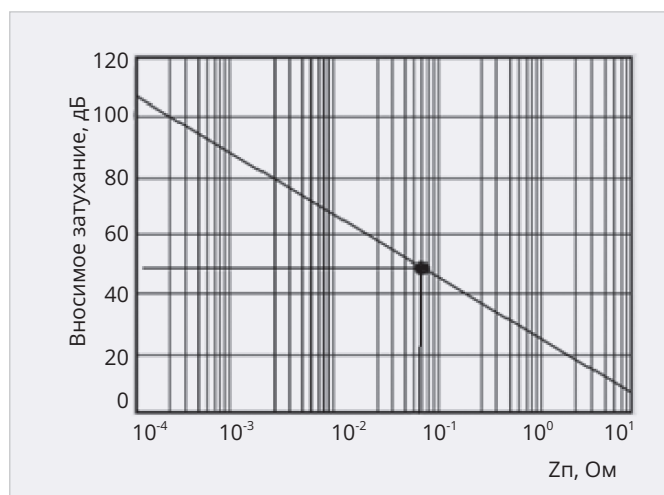


Рис. 4. График для определения сопротивления линии передачи

тур составляет от -25°C до $+85^{\circ}\text{C}$ или от -25°C до $+100^{\circ}\text{C}$. Для военных применений этот диапазон должен быть от -40°C до $+100^{\circ}\text{C}$ или от -60°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Использование фильтра при температуре, выходящей за пределы этого диапазона, может привести к повреждению его компонентов.

Герметичность. Понятие «герметичность» без указания величины скорости натекания гелия (или другого газа) через фильтр не имеет практического смысла. Известны три уровня герметичности [9].

1. Герметичность не регламентируется и поэтому не гарантируется. Это относится ко всем фильтрам, герметизированным эпоксидными компаундами.
2. Скорость $1,3 \times 10^{-6} - 1,3 \times 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ – средний уровень герметичности. Фильтры среднего уровня герметичности нежелательно применять в изделиях с большим сроком хранения. Они предназначены для изделий менее ответственного назначения или кратковременного действия.
3. Скорость натекания $1,3 \times 10^{-9} - 1,3 \times 10^{-11} \text{ м}^3 \cdot \text{Па} / \text{с}$ – высокий уровень

Таблица 1. Зависимость вносимого затухания от частоты и ёмкости фильтров разных типов

Ёмкость	Величина вносимого затухания, дБ, на частоте:								
	10 МГц	100 МГц	1 ГГц	10 МГц	100 МГц	1 ГГц	10 МГц	100 МГц	1 ГГц
	C-фильтр			L-C-фильтр			Pi-фильтр		
470 пФ	1	16	35	2	19	38	2	20	57
1 нФ	4	23	41	6	25	44	6	31	68
10 нФ	22	41	60	23	43	63	27	68	70
100 нФ	41	57	70	44	60	70	68	70	70
1 мкФ	61	70	70	61	70	70	70	70	70

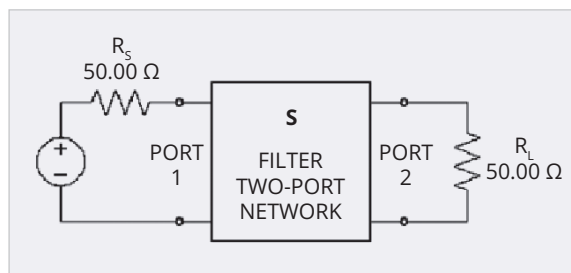


Рис. 5. Двухпортовый анализатор цепей

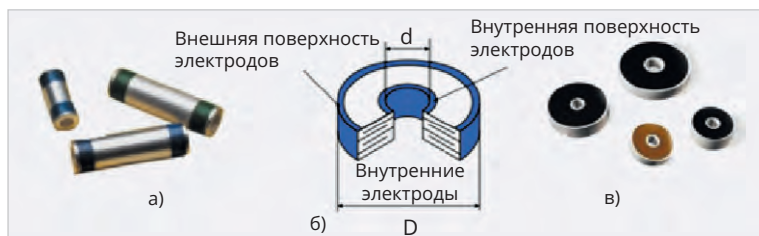


Рис. 6. Трубчатые конденсаторы (а), схема расположения электродов дисковых конденсаторов (б) и их внешний вид (в)

герметичности (вакуумная плотность) фильтра. Герметичность обеспечивается за счёт внутреннего металлостеклянного спая. Такую скорость натекания определяют масс-спектрометрическим методом при помощи гелиевого течеискателя. Фильтры высокого уровня герметичности необходимы для применения в герметизированной аппаратуре СВЧ высокой надёжности.

4. Об измерении параметров помехоподавляющих фильтров

Все производители указывают в спецификациях на выпускаемые

фильтры величину вносимых потерь на разных частотах в системе с эталонным сопротивлением 50 Ом. Производитель фильтра зачастую не знает ни уровня помех, связанных с конкретным устройством, ни реальных значений сопротивления нагрузки. Поэтому опубликованные характеристики вносимых фильтром потерь в определённом диапазоне частот или во всём диапазоне частот не обязательно отражают эквивалентное ослабление помех в устройстве на практике. Производителю устройства желательно проводить собственные испытания, чтобы определить, подходит ли фильтр для подавления помех в его устройстве.

Следует подчеркнуть, что вносимое затухание обычно определяют в измерительной схеме с волновым сопротивлением 50 Ом. При включении фильтра в электрическую схему, в которой сопротивления источника и нагрузки не равны 50 Ом, величина эффективного вносимого затухания фильтра будет отличаться от измеренной [8]:

$$\alpha_{\text{эфф}} (\text{дБ}) = 20 \log \left[1 + \frac{Z_{\text{и}} Z_{\text{н}}}{Z_{\text{п}} (Z_{\text{и}} + Z_{\text{н}})} \right], \quad (3)$$

где $Z_{\text{и}}$ и $Z_{\text{н}}$ – сопротивления соответственно источника и нагрузки, Ом;

$Z_{\text{п}}$ – сопротивление линии передачи, Ом, определяемое по графику рис. 4 [8].

Например, если $Z_{\text{и}} = 100$ Ом, $Z_{\text{н}} = 600$ Ом, а величина вносимого затухания

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ЭЛЕКОНД

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

<p>Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...</p> <p>Номинальное напряжение, $U_{\text{ном}}$, В,</p> <p>Номинальная ёмкость, $C_{\text{ном}}$, мкФ,</p> <p>Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{\text{ср}}$, °C</p>	<p>3,2 ... 485</p> <p>1,0 ... 470 000</p> <p>-60 ... 125</p>	
<p>Объёмно-пористые танталовые конденсаторы K52-...</p> <p>Номинальное напряжение, $U_{\text{ном}}$, В,</p> <p>Номинальная ёмкость, $C_{\text{ном}}$, мкФ,</p> <p>Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{\text{ср}}$, °C</p>	<p>3,2 ... 200</p> <p>1,5 ... 60 000</p> <p>-60 ... 175</p>	
<p>Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...</p> <p>Номинальное напряжение, $U_{\text{ном}}$, В,</p> <p>Номинальная ёмкость, $C_{\text{ном}}$, мкФ,</p> <p>Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{\text{ср}}$, °C</p>	<p>2,5 ... 63</p> <p>0,033 ... 2 200</p> <p>-60 ... 175</p>	
<p>Суперконденсаторы K58-...</p> <p>Номинальное напряжение, $U_{\text{ном}}$, В,</p> <p>Номинальная ёмкость, $C_{\text{ном}}$, Ф,</p> <p>Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{\text{ср}}$, °C</p>	<p>2,5 ... 2,7</p> <p>1,0 ... 4 700</p> <p>-60 ... 65</p>	
<p>Накопители электрической энергии на основе модульной сборки суперконденсаторов НЭЭ, МИК, МИЧ, ИТИ</p> <p>Номинальное напряжение, $U_{\text{ном}}$, В,</p> <p>Номинальная ёмкость, $C_{\text{ном}}$, Ф,</p> <p>Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{\text{ср}}$, °C</p>	<p>5,0 ... 48</p> <p>0,08 ... 783</p> <p>-60 ... 65</p>	

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

Реклама

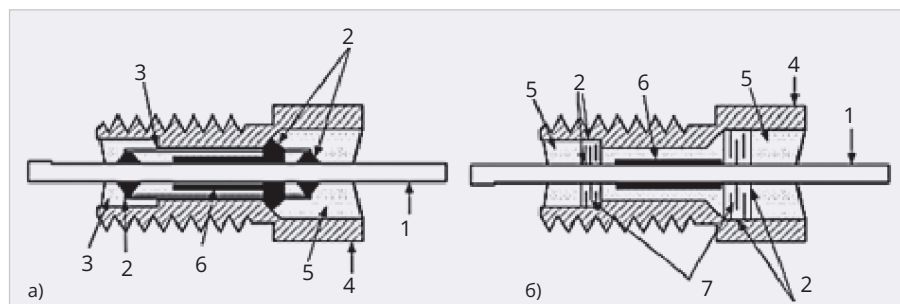


Рис. 7. Конструкция фильтров: а) с трубчатым конденсатором; б) с дисковым конденсатором: 1 – центральный проводник; 2 – области пайки; 3 – трубчатый конденсатор; 4 – корпус фильтра; 5 – эпоксидный компаунд; 6 – ферритовый сердечник; 7 – дисковые конденсаторы

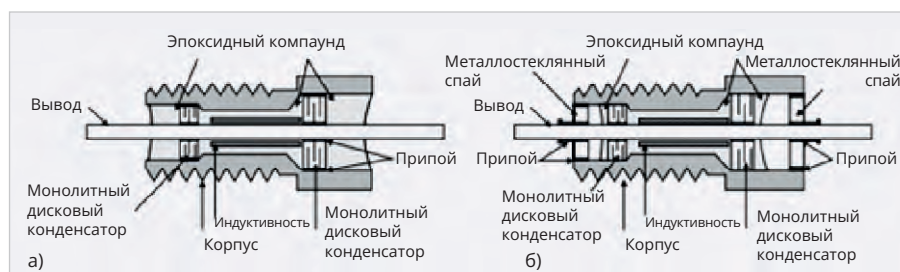


Рис. 8. Резьбовые фильтры с дисковыми конденсаторами, герметизированные: а) эпоксидным компаундом, б) металlostеклянным спаем и компаундом

Таблица 3. Параметры монолитных дисковых конденсаторов компании AMC

Размеры, мм			Максимальное напряжение постоянного тока, В	Ёмкость, пФ
Наружный диаметр	Внутренний диаметр	Толщина		
2,5±0,13	0,64±0,12	0,64±0,18	200	10 пФ – 66 нФ
3,8±0,13	0,94±0,15	0,64±0,18	200	10 пФ – 2,8 мкФ

хания фильтра равна 50 дБ на частоте 100 МГц при измерении в 50-омной схеме, то $Z_{\text{п}} = 0,08$ Ом. Тогда эффективное вносимое затухания равно:

$$\alpha_{\text{эф}} (\text{дБ}) = 20 \log \frac{100 \times 600}{0,08(100 + 600)} = 20 \log 1072 = 61 \text{ дБ}.$$

Эти измерения осуществляют с использованием двухпортового анализатора цепей (рис. 5) [9]. В данном контексте S-параметры пассивных радиочастотных фильтров представляют собой матрицу, зависящую от частоты:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}.$$

Поскольку измерительное устройство является пассивным (и немагнитным), то есть $S_{12} = S_{21}$, то для описания отклика фильтра необходимы только три параметра: S_{11} , S_{21} и S_{22} . Величина и фаза этих сигналов соответствуют нескольким частотно-зависимым параметрам, важным для анализа фильтров (табл. 2) [9].

Компания Corry Micronics рассчитывает величину вносимого затухания С-фильтров по упрощённой формуле:

$$\alpha (\text{дБ}) = \sqrt{1 + (50\pi fC)^2},$$

где f – частота, Гц; C – ёмкость фильтра, фарад [9].

5. Конструкция миниатюрных помехоподавляющих фильтров

5.1. Трубчатые и дисковые конденсаторы, применяемые в миниатюрных помехоподавляющих фильтрах

Первый международный стандарт MIL-PRF-15733 на конденсаторы и фильтры закрепил конструкцию фильтров, в которых в качестве электрической ёмкости применялся трубчатый тонкостенный керамический конденсатор. Но когда были разработаны монолитные многослойные дисковые конденсаторы, они сразу заняли доминирующее положение в

Таблица 2. Соотношения измеряемых параметров

Параметр	Отношение
Вносимые потери, дБ	$\alpha = -20 \lg (S_{21})$
Входные обратные потери, дБ	$\alpha_{\text{in}} = -20 \lg (S_{11})$
Обратные потери на выходе, дБ	$\alpha_{\text{in}} = -20 \lg (S_{22})$
Фаза, рад	$\Phi = \arg (S_{21})$
Групповая задержка, с	$\tau_d = -(1/2\pi) \times d\Phi / df$

конструкциях помехоподавляющих фильтров.

На рис. 6 показаны трубчатые и дисковые конденсаторы, применяемые в помехоподавляющих фильтрах.

Многослойные монолитные дисковые конденсаторы, содержащие от двух до нескольких десятков металлизированных определённым образом тонких слоёв керамики, имеют прочную конструкцию, малую собственную индуктивность и ёмкость до нескольких единиц микрофарад. Такая структура достигается путём нанесения на керамическую подложку слоёв различных металлических электродов и диэлектрика. Используемые материалы, как правило, представляют собой керамический диэлектрик на основе BaTiO_3 с электродами из PdAg с покрытием Au [14].

В качестве примера в табл. 3 приведены размеры и параметры некоторых дисковых конденсаторов американской компании Advanced Monolithic Ceramics (AMC) [9].

5.2. Конструкция фильтров с трубчатым и дисковым конденсаторами

На рис. 7 показаны типичные конструкции помехоподавляющих фильтров с трубчатым и дисковым конденсаторами компании Souriau PA&E [13]. Внутри трубчатого конденсатора расположены ферритовый сердечник и центральный проводник (индуктивность) (рис. 7а).

В зависимости от материалов, используемых для изготовления сердечника, феррит эффективно работает на определённых частотных диапазонах. На более высоких частотах ферриты переходят из режима индуктивности в режим потерь, как резисторы [1].

Конструкция с трубчатым конденсатором имеет следующие недостатки: ● невозможность получения в миниатюрных фильтрах большой ёмкости (более сотых долей микрофарада);

● повышенная хрупкость трубчатого конденсатора, из-за которой в нём могут возникнуть трещины во время установки и при пайке фильтра в корпус изделия.

Конструкция фильтра с дисковыми конденсаторами показана на рис. 76 и 8.

В фильтре с Pi-схемой компании Souriau PA&E ферритовый сердечник расположен между двумя дисковыми конденсаторами [13]. Фильтр, показанный на рис. 8б, герметизирован с торцов металlostеклянным спаем и эпоксидным компаундом.

Заключение

Борьба с электромагнитными помехами – важнейшая задача при создании изделий микроэлектроники СВЧ. Подход к её решению усложняют следующие факторы:

- возрастание функциональных возможностей и сложности изделий;
- миниатюризация;
- увеличение плотности компоновки и усиление взаимного влияния компонентов;
- повышение рабочих частот;

● рост требований к надёжности и долговечности и вследствие этого необходимость герметизации изделий.

Помехоподавляющие фильтры являются важнейшими компонентами электронных устройств, обеспечивающими снижение уровня нежелательных помех.

Во второй части данной статьи будут рассмотрены типы фильтров, их выбор и применение, а также сравнение зарубежных и отечественных фильтров.

Литература

1. Guide to EMI Filters | Ohmite Mfg Co. URL: <https://ohmite.com>.
2. Экранирование RFI/EMI: защита электроники в современном мире. URL: <https://www.niceone-keypad.com/ru>.
3. Воловик М., Смирнов В. Керамические проходные конденсаторы и фильтры нижних частот. Состояние и перспективы развития // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2004. № 7. С. 36–40.
4. Applications and Benefits of EMI Filters. URL: <https://www.iqsdirectory.com/articles>.
5. Джурицкий К.Б. Миниатюрные помехоподавляющие фильтры СВЧ диапазона частот // Современная электроника. 2023. № 8. С. 28–33.
6. EMI Filters advanced EMI protection. Oxley Group. URL: <https://www.oxleygroup.com>.
7. How to Choose the Right EMI Filter for your Design? URL: <https://components101.com>.
8. EMI Filters Selection Guide – EEE Parts... | doEEEt.com.
9. Джурицкий К.Б. Современные радиочастотные соединители и помехоподавляющие фильтры / под ред. д.т.н. А.А. Борисова. СПб.: Изд-во ЗАО «Медиа Группа Файнстрит», 2014. 426 с.
10. LC Filter Design Tool. Marki Microwave. URL: <https://markimicrowave.com>.
11. Bulkhead-miniature-emi-filters-for-aerospace-applications-explained. URL: <https://www.doeet.com>.
12. Comprehensive Guide to EMI Filter Selection – EMC Directory. URL: <https://emc-directory.com>.
13. PAE. cat.057. Souriau PA&E. 2007. Vol. 3.
14. Производство керамических конденсаторов. 31 янв. 2024 г. Компания «ЕвроМикроТех». URL: <https://euromicrotech.ru>.



Промышленный ТЕХНОПАРК

Производство, разработка и поставка постоянных резисторов, аттенюаторов и чип-индуктивностей:

- Эквиваленты нагрузок ПР1-24 (от 50 Вт — 2000 Вт)
- Аттенюаторы ПР1-25 (от 50 Вт — 2000 Вт)
- ТПИ — тепловые чип-перемычки
- СВЧ-резисторы
- Мощные СВЧ-резисторы Р1-170 (до 1000 Вт)
- Силовые резисторы Р1-150М (до 1500 Вт)
- Наборы резисторов НР1-82
- Чип-резисторы Р1-8В (А, И, С) соответствуют требованиям стандарта АЕС-Q200



Современная
производственная база



Высокое качество



Индивидуальный
подход к потребителю



Изделия по вашему ТЗ



Связаться с нами: **8 800 444 30 99**

г. Нижний Новгород, ул. Нартова, д.6
e-mail: info@erkonpark.ru

erkonpark.ru

Реклама

Энергоэффективные гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи средней мощности для применения в аппаратуре специального назначения

Виктор Жданкин (info@prochip.ru)

В обзоре представлены модули преобразователей напряжения средней мощности (ряд мощностей 15, 30 и 60 Вт) с улучшенными удельными массо-объёмными характеристиками и увеличенным КПД, предназначенные для применения в аппаратуре специального назначения наземного базирования, авиационной и ракетной технике, а также для других применений с жёсткими требованиями к объёму и высокой удельной мощности источника питания.

Введение

Обеспечить высокое значение КПД и повышенные удельные массо-объёмные показатели позволило повышение рабочей частоты, применение режима синхронного выпрямления, размагничивание силового трансформатора с помощью активного ограничителя и резонансного переключения, применение эффективных магнитомягких ферритов для изготовления индуктивных элементов, а также снижения мощности потерь в ключевых элементах – MOSFET-транзисторах. Размеры корпусов описываемых модулей, расположение выводов и их функциональное назначение идентичны параметрам продукции известных американских компаний, которая применялась в аппаратуре специального назначения, выпускаемой российскими предприятиями, до введения запрета на её поставку в Россию. Замена продукции американского производства в серийной аппаратуре продукцией Восточно-китайского научно-исследовательского института микроэлектроники позволит сократить финансовые и временные затраты. На протяжении многих лет непрерывно прогрессируют такие параметры преобразователей электрической энергии, как удельная мощность и коэффициент полезного действия (КПД), являющиеся критериями миниатюризации силовых устройств: получение заданной мощности при минимальном объёме – это уменьшение доли источника питания в массе и объёме системы. Основные принципы мини-

атюризации силовых устройств изложены в многочисленных трудах отечественных специалистов, докладах на научно-технических конференциях по устройствам и системам энергетической электроники. До настоящего времени являются актуальными основные положения теории, методы расчёта и принципы конструирования источников вторичного электропитания, использование достижений микроэлектроники для преобразования электрической энергии в электро системах с целью уменьшения массы и объёма устройств и систем, уменьшения тепловых потерь, увеличения ресурса работы, которые изложены в книгах [1], [2]. Основные принципы миниатюризации базируются на повышении рабочей частоты, применении активных полупроводниковых компонентов с высокими удельными энергетическими характеристиками, применении специализированных микросхем управления, а также оптимальных схмотехнических и конструктивно-технологических решений.

Комплексный подход российских разработчиков к конструированию преобразователей напряжения позволил увеличить удельные энергетические характеристики преобразователей напряжения за последние несколько лет в несколько раз (кратность увеличения зависит от вида исполнения конструкции). Российские компании выпускают обширный ряд источников питания AC/DC, DC/DC-преобразователей напряжения от малой до повышенной мощности,

охватывающих все востребованные диапазоны напряжений постоянно-го тока. Выпускаются преобразователи напряжения для применения в промышленной аппаратуре, а также в аппаратуре специального назначения наземного и морского базирования, авиационной, ракетной и космической техники. Для изготовления применяется элементная база как зарубежная, так и отечественная. Преобразователи напряжения отечественного производства вносят свой вклад в качество систем вооружений и военной техники, которые признаются одними из лучших в мире.

Но до февраля 2022 года в специальных системах, изготавливаемых отечественными предприятиями, широко применялись изделия зарубежных компаний, которые прекратили поставки своей продукции в Российскую Федерацию. Заменить модули зарубежных, в основном американских, производителей модулями отечественного производства не всегда представляется возможным, так как если по электрическим параметрам можно подобрать аналог, то установочные размеры, расположение выводов и их функциональное назначение могут оказаться неприменимыми. Две российские компании производят гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи, которые полностью взаимозаменяемы с зарубежными радиационно-стойкими преобразователями уровня качества Space. Но полностью идентичные американским преобразователям напряжения уровня качества Military изделия производятся в ограниченном диапазоне выходных мощностей. Замена импортных преобразователей напряжения модулями отечественного производства в существующих системах потребует полной конструкторской модернизации с последующим повторением комплекса проверочных испытаний и больших



Рис. 1. Внешний вид модуля HMNA28S5 без монтажных фланцев

финансовых и временных затрат. Для частичного сокращения затрат при замене импортных модулей предлагается рассмотреть возможность применения DC/DC-преобразователей и помехоподавляющих фильтров уровня качества Military, изготовленных по гибридной технологии Восточно-китайским научно-исследовательским институтом микроэлектроники. Продукция и возможности компании были представлены в ряде статей. DC/DC-преобразователи и фильтры электромагнитных помех уровня качества Military представлены в статье [3]. В настоящее время доступ к сайтам китайских компаний, специализирующихся в разработке и производстве электронных компонентов для аппаратуры ракетно-космической и военной техники, заблокирован, и получить техническую информацию о продукции этих компаний можно только на конференциях, которые проводятся с привлечением специалистов компаний-производителей.

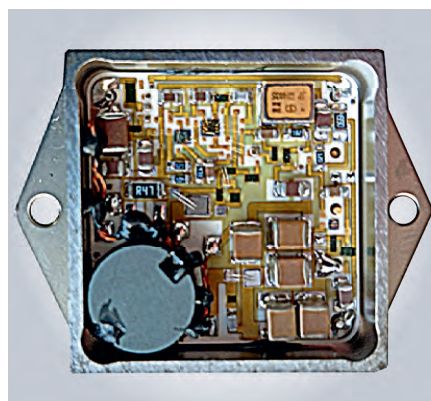


Рис. 2. Внешний вид модуля серии HMNA28 с крепёжными фланцами и удалённой крышкой

В 2024 году Восточно-китайский научно-исследовательский институт микроэлектроники представил три серии DC/DC-преобразователей категории качества Military, выполненных с применением гибридной толстоплёночной технологии, которые являются результатом совместного решения энергетических, структурных и конструкторско-технологических задач миниатюризации при проектировании этих устройств. Возможно, информация о новых высокоэффективных модулях будет полезна российским специалистам, специализирующимся в области разработок и производства специальных систем, в которых использовались изделия американских компаний, так как массо-объёмные, присоединительные размеры, размещение выводов и их функциональное назначение идентичны параметрам этих устройств, а удельные энергетические характеристики значительно выше. Изготавливаются модули в довольно сжатые сроки – от 8 до 22 недель.

Миниатюрные 15-ваттные DC/DC-преобразователи серии HMNA28

Малогабаритные модули серии HMNA28 предназначены для работы в системах электропитания с сетями, напряжение которых меняется в диапазоне от 14 до 40 В, при этом допускается кратковременное (до 1 с) превышение входного напряжения до 50 В. Серия включает одно- и двухканальные модели, которые формируют наиболее часто востребованные напряжения постоянного тока. Полная номенклатура и основные технические параметры модулей серии HMNA28 приведены в табл. 1.

Все функциональные узлы модулей размещены в герметичном металлическом корпусе размерами 27,43×27,43×8,5 мм, предлагаются также модели, выполненные в корпусе с крепёжными фланцами размерами 38,5×27,43×8,5 мм с вертикальным расположением выводов относительно плоскости основания для монтажа на печатную плату. Внешний вид модуля без монтажных фланцев показан на рис. 1.

На рис. 2 показан внешний вид модуля с крепёжными фланцами и снятой крышкой, который демонстрирует высокую плотность упаковки компонентов бескорпусного исполнения.

Удельная мощность по объёму без учёта теплоотвода модуля HMNA28S5 достигает значения 2345 Вт/дм³. В модуле рассеивается тепловая мощность 3,3 Вт, что составляет 22% от входной мощности. Следует выбирать наиболее эффективный способ отвода тепла от модуля в конкретных условиях эксплуатации, минимизировать перегрев и тем самым обеспечить надёжную работу модуля. Когда в электронной аппаратуре имеется корпусной теплоотвод значительной площади, на который можно установить модуль, кондуктивный теплоотвод реализуется при соединении теплоотводящей поверхности корпуса модуля с массивными металлическими (алюминий, медь) элементами конструкции. Миниатюрные модули с высокими значениями удельной мощности также можно рекомендовать для применения в бортовой аппаратуре, имеющей ограниченное время работы после включения, или при работе в режимах кратковременной отдачи максимальной мощности.

Таблица 1. Номенклатура и основные характеристики модулей серии HMNA28

Модель	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки, А	Мощность, Вт	КПД (мин.), %	Ёмкость нагрузки (макс.), мкФ	Пulsация выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ
HMNA28S5	4,85...5,15	3	15	84	1000	80
HMNA28S8	7,92...8,08	1,88	15	85	500	100
HMNA28S12	11,76...12,24	1,25	15	84	500	100
HMNA28S15	14,7...15,3	1	15	84	500	100
HMNA28S24	23,76...24,24	0,625	15	84	500	200
HMNA28D5	+4,85...+5,15/-5,15...-4,85	±1,5	15	82	500	80
HMNA28D6	+5,87...+6,13/-6,13...-5,8	±1,25	15	82	500	80
HMNA28D10	+9,90...+10,10/-10,10...-9,90	±0,75	15	83	500	100
HMNA28D12	+11,88...+12,12/-12,12...-11,88	±0,625	15	84	500	150
HMNA28D15	+14,85...+15,15/-15,15...-14,85	±0,5	15	84	500	200

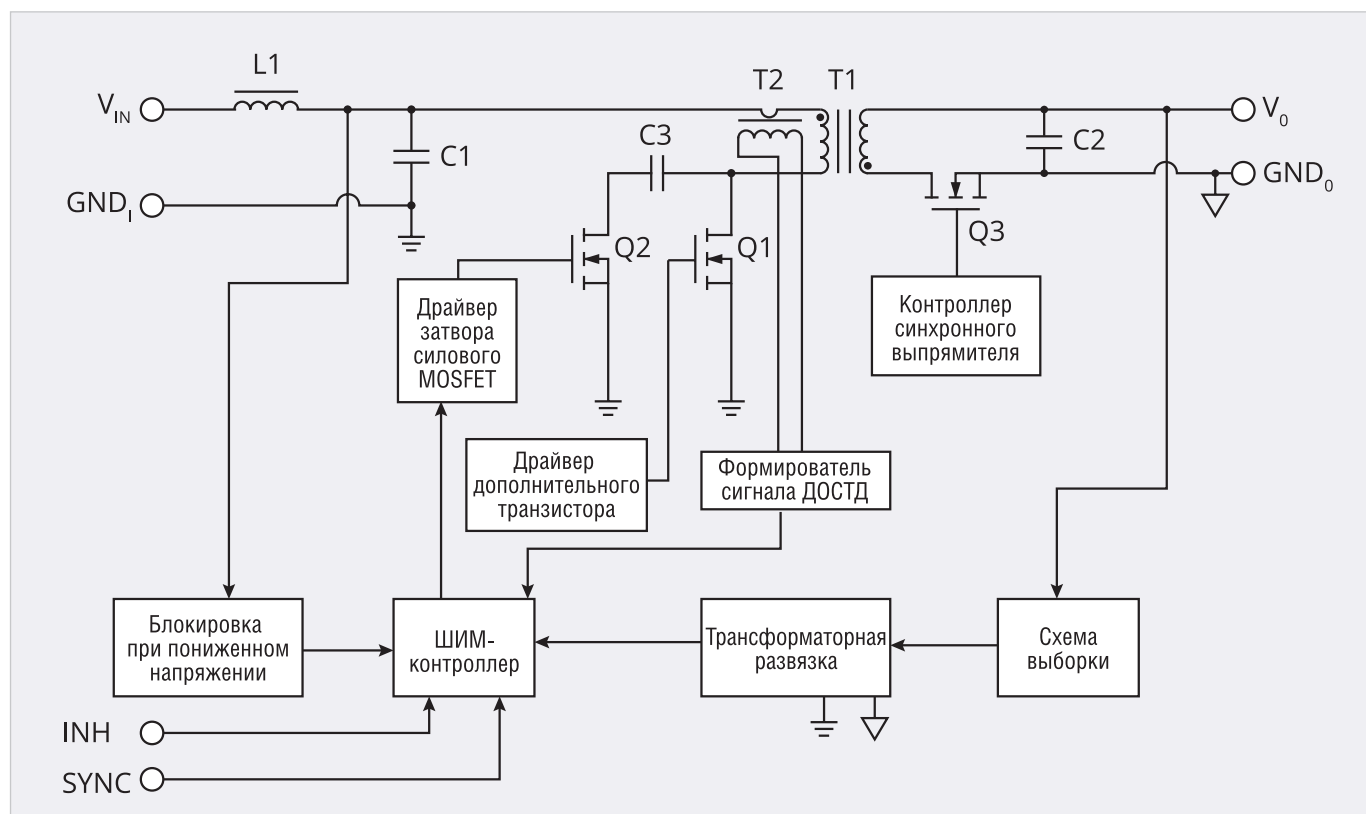


Рис. 3. Структурная схема одноканального преобразователя напряжения серии НМНА28 с синхронным выпрямлением и активным ограничителем для размагничивания трансформатора

Необходимо заметить, что преобразователи напряжения серии MSA (Crane Aerospace & Electronics, Interpoint®, США) с подобными габаритами обеспечивают в нагрузке только 5 Вт. Координаты выводов модулей серии НМНА28 и их функциональное назначение идентичны параметрам модулей серии MSA.

Одно- и двухканальные модули выполнены по обратноточковой структуре, которая является одной из самых простых и экономичных топологий и лучше всего подходит для преобразования низких уровней мощности. Ключевым элементом преобразователя является трансформатор, который является накопителем энергии и выполняет функции дросселя – при закрытом ключе вторичная обмотка отдаёт в нагрузку энергию, которая запасалась при открытом ключе, когда первичная обмотка была подключена к питающей сети.

Упрощённая структурная схема одноканального преобразователя напряжения серии НМНА28 представлена на рис. 3.

Для управления работой преобразователя применяется метод широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей частотой (от 350 до 550 кГц) и обратной связью по

напряжению (voltage mode), а также внутренним контуром регулирования по току дросселя (current mode). Основной контур служит для устранения зависимости уровня выходного напряжения от величины входного напряжения и изменений, вызванных изменением нагрузки. Внутренний быстрый контур служит для контроля тока силового ключа ($Q1$) (индуктивности, первичной обмотки трансформатора) на каждом цикле его включения. Ток в силовом ключе контролируется с помощью трансформатора тока $T2$ специальным входом ШИМ-контроллера. При подаче сигнала на открытие силового ключа ток через индуктивность, а значит, и через силовой ключ начинает линейно расти. При достижении порога силовой ключ размыкается, начинается отдача энергии индуктивности. Поскольку силовой ключ размыкается при достижении пикового тока, то обеспечивается постоянство накопленной энергии в индуктивности вне зависимости от входного напряжения (изменение входного напряжения влияет на скорость заряда). Режим с обратной связью по току дросселя обеспечивает параметрическую компенсацию отклонений входного напряжения, поцикловое

ограничение тока. Параметрическая компенсация отклонений входного напряжения позволяет мгновенно корректировать (без использования динамического диапазона усилителя сигнала ошибки) режим работы преобразователя при произвольных изменениях входного напряжения. Благодаря этому нестабильность по сети получается очень небольшой, и режим работы усилителя сигнала ошибки меняется только при изменениях тока нагрузки. Использование режима регулирования с обратной связью по току дросселя и высокой рабочей частоты позволяет добиться уменьшения габаритов.

В обратноточковых преобразователях напряжения при отключении силового транзистора возникает большое по величине перенапряжение. Оно возникает из-за наличия индуктивности рассеяния трансформатора. При проектировании трансформатора применяются меры для снижения индуктивности рассеяния, например, применением чередующейся обмотки.

Для поглощения энергии, накопленной в индуктивности рассеяния и подавления броска напряжения, в схемах применяются диссипативные RCD- или недиссипативные схемы

LCD-ограничителей. При этом энергия рассеивается на элементах схемы, что приводит к снижению КПД, а применение дополнительных элементов увеличивает габариты модуля. Для повышения КПД преобразователя за счёт возврата энергии рассеяния используются активные схемы цепи ограничения. В схему вместо диода и резистора вводятся дополнительный ключ (Q2) и ограничительный конденсатор C3. Приемлемые энергетические характеристики в модулях питания с выходными напряжениями 5 В и ниже обеспечиваются применением синхронного выпрямления, при котором демпферный диод Шоттки понижающего регулятора заменяется коммутируемым транзистором MOSFET (Q3). Таким образом устраняется рост относительных потерь в выпрямительном диоде из-за увеличения соотношения падения напряжения на диоде к выходному напряжению. В двухканальных моделях применяется выходной выпрямитель на диодах Шоттки.

Значительно повысить КПД преобразователей за счёт снижения потерь на переключение позволило применение MOSFET (Q1 и Q2) с небольшим сопротивлением в открытом состоянии и небольшим зарядом затвора, а также низким сопротивлением затвора.

Сложности, возникающие при использовании активного ограничителя для размагничивания трансформатора, снижаются применением современного ШИМ-контроллера.

Анализ процессов и характеристик обратного преобразователя с активной цепью ограничения и схемой синхронного выпрямления приводится, например, в работе [4].

Обратноходовые преобразователи содержат всего один моточный эле-

мент, что значительно снижает их стоимость. С целью снижения массогабаритных показателей трансформатора, который определяет массогабаритные показатели и технические параметры всего преобразователя, для его изготовления применяется магнитомягкий феррит с низкой величиной объёмных удельных магнитных потерь и высокой величиной индукции насыщения при незначительных габаритных размерах.

Модули оснащены рядом сервисных и защитных функций, необходимых для безопасной эксплуатации. Блокировка при пониженных напряжениях на входе обеспечивает корректную работу при питании от аккумуляторной батареи. Защита по току срабатывает, если сопротивление нагрузки оказывается слишком малым, и ток превышает определённое пороговое значение. Функция дистанционного включения и выключения повышает гибкость применения преобразователей в системах электропитания, требующих определённого алгоритма подачи питания к отдельным узлам. Синхронизация частоты преобразования от внешнего генератора обеспечивает работу нескольких преобразователей с одной частотой. Подключение внешнего резистора между выводом TRIM и общим проводом или выводом положительного напряжения, в зависимости от направления регулировки, обеспечивает корректировку выходного напряжения на величину $\pm 6\%$ от номинального значения выхода.

Для подавления пульсаций входного тока на входе преобразователей встроены сглаживающий LC-фильтр. Для дополнительного подавления пульсаций напряжения на входе модуля рекомендуется применять внешний помехоподавляющий фильтр НМФА-

461 или НМФСА-461, обеспечивающие ослабление помех на 50 дБ на частотах 500 кГц и 1 МГц и на 45 дБ на частоте 5 МГц.

Модули разработаны и производятся, как и вся продукция компании, в соответствии с требованиями национальных производственных стандартов:

- GJB 548C-2021 «Методы и процедуры испытаний микроэлектроники» (соответствует стандарту MIL-STD-883 “Test Methods and Procedures for Microelectronics”);
- GJB 2438B-2017 «Технические требования к гибридным микросхемам. Общая спецификация» (соответствует спецификации MIL-PRF-38534 “Hybrid Microcircuits, General Specification For”).

Выпускаются модули с уровнями качества H и QJB (H-), отличающиеся набором процедур отбраковочных испытаний при производстве.

Рабочая температура модулей лежит в диапазоне $-55...+125^{\circ}\text{C}$, диапазон температур хранения от -65°C до $+150^{\circ}\text{C}$. Расчётное значение среднего времени наработки до отказа (Mean Time Between Failure, MTBF) $2,2 \times 10^6$ ч (для температуры $+25^{\circ}\text{C}$ и эксплуатации в стационарном наземном оборудовании).

Малогабаритные 30-ваттные модули серии НМТФ28

Преобразователи напряжения серии НМТФ28 предназначены для применений, где существуют жёсткие требования к занимаемому объёму и высокой удельной мощности и аппаратура подвергается воздействию экстремальных температур, вибрации, механическим ударам.

Модули предназначены для работы от входных сетей с диапазоном изменения напряжения от 14 до 40 В с допускаемым кратковременным (до 1 с) превышением входного напряжения до 50 В. Выпускаются одно- и двухканальные модули, формирующие наиболее часто требуемые выходные напряжения. В табл. 2 представлена полная номенклатура серии НМТФ28 и их общие характеристики. Габаритные размеры модулей без монтажных фланцев $37,23 \times 28,84 \times 9$ мм, с крепёжными фланцами $51,3 \times 28,84 \times 9$ мм. Масса модели без фланцев 37 г и 40 г в исполнении с монтажными флан-

Таблица 2. Номенклатура и общие характеристики модулей серии НМТФ28

Модель	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки (макс.), А	Мощность (макс.), Вт	КПД (мин.), %	Ёмкость нагрузки (макс.), мкФ	Пульсация выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ
НМТФ28S3R	3,22...3,38	6	20	80	1000	80
НМТФ28S5	4,87...5,13	6	30	85	1000	80
НМТФ28S12	11,88...12,12	2,5	30	87	500	100
НМТФ28S15	14,7...15,3	2	30	86	500	120
НМТФ28S24	23,76...24,24	1,25	30	87	500	200
НМТФ28D12	+11,88...+12,12/-12,12...-11,88	$\pm 0,625$	30	87	500	100
НМТФ28D15	+14,85...+15,15/-15,15...-14,85	± 1	30	87	500	100

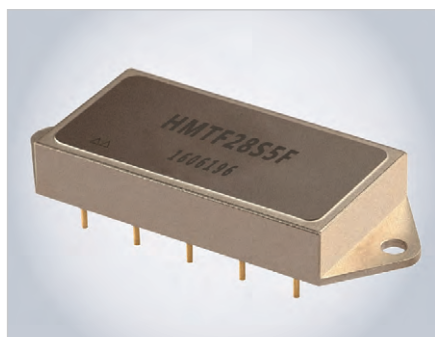


Рис. 4. Внешний вид модуля HMTF28S5F с крепёжными фланцами



Рис. 5. Внешний вид модуля серии HMTF28 с удалённой крышкой (макетный образец)



Рис. 6. Внешний вид модуля HMFR28S5Z в варианте исполнения с монтажными фланцами специальной формы (Z-форма)

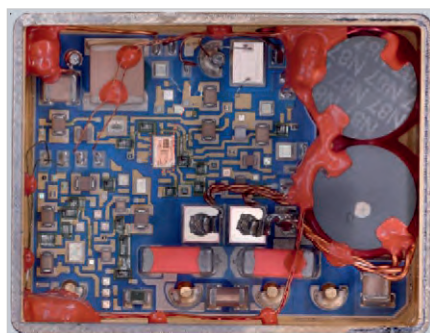


Рис. 7. Внешний вид модуля серии HMFR28 с удалённой крышкой

цами. На рис. 4 показан внешний вид модуля HMTF28S5F с монтажными фланцами.

Внешний вид конструкции модуля, выполненного с применением гибридной толстоплёночной технологии, с открытой крышкой представлен на рис. 5.

Подобно модулям преобразователей напряжения серии НМНА28 модули серии HMTF28 выполнены по обратноточковой топологии с двумя контурами обратной связи. Для регулирования выходного напряжения применяется метод широтно-импульсной модуляции с посто-

янной рабочей частотой 400 кГц (типовое значение) и обратной связью по напряжению, внутренний контур дополнительной обратной связи по току дросселя осуществляет прямое регулирование амплитуды тока дросселя посредством сигнала ошибки. В одноканальных моделях применяется синхронное выпрямление, которое в преобразователях с низким выходным напряжением обеспечивает максимальный эффект. Структурная схема одноканальных модулей преобразователей напряжения серии HMTF28 идентична схеме модулей серии НМНА28. В двухканаль-

ных модулях применяется выходной выпрямитель на диодах Шоттки.

В результате применения методов энергетической оптимизации для 30-ваттных модулей удалось достичь значения удельной мощности по объёму 3100 Вт/дм³. DC/DC-преобразователи содержат схему блокировки при пониженных напряжениях на входе, защиту от короткого замыкания. Функция дистанционного включения/выключения сигналом логического уровня может использоваться для снижения собственного энергопотребления. Синхронизация частоты преобразования от внешнего генератора позволяет синхронизировать работу нескольких преобразователей в системе электропитания и уменьшить пульсации потребляемого тока. При эксплуатации необходимо учитывать особенность организации режима синхронизации частоты преобразования внешним синхросигналом. Частота синхронизации должна быть больше рабочей частоты ШИМ-контроллера (примерно 400 кГц), в противном случае работа преобразователя становится неустойчивой. Рекомендуемая частота синхросигнала внешнего генератора прямоугольной формы от 420 до 460 кГц с коэффициентом заполнения (30±10)%. Функция точной настройки выходного напряжения обеспечивает корректировку на величину ±10% от номинального значения выхода подключением подстроечного резистора между специальным выводом TRIM и выходом положительного напряжения или общим проводом в зависимости от направления регулирования.

Для дополнительного подавления пульсаций напряжения на входе рекомендуется применять помехоподавляющий фильтр HMFH-461 с коэффициентом подавления ≥ 50 дБ на частотах 500 кГц и 1 МГц и коэффициентом подавления ≥ 45 дБ на частоте 5 МГц.

Выпускаются модели с уровнями качества H и QJB (H-).

Расчётное значение среднего времени наработки до отказа (Mean Time Between Failure, MTBF) 1,9×10⁶ ч (для температуры +25°C при эксплуатации в стационарном наземном оборудовании).

Массогабаритные параметры 30-ваттных модулей серии HMTF28, расположение выводов и их функциональное назначение идентичны параметрам

Таблица 3. Номенклатура и общие характеристики модулей серии HMFR28

Модель	Выходное напряжение, В	Ток нагрузки (макс.), А	Мощность (макс.), Вт	КПД (мин.), %	Ёмкость нагрузки (макс.), мкФ	Пульсация выходного напряжения (двойная амплитуда), мВ
HMFR28S3R3	3,2...3,4	12	39,6	85	5000	100
HMFR28S5	4,87...5,13	12	60	87	5000	150
HMFR28S6R5	6,37...6,63	8	52	86	Н/Д	60
HMFR28S12	11,87...12,13	5	60	87	Н/Д	100
HMFR28S15	14,87...15,13	4	60	87	Н/Д	100
HMFR28S20	19,8...20,2	2,5	50	85	Н/Д	150
HMFR28S24	23,8...24,2	2,5	60	86	Н/Д	150
HMFR28S28	27,8...28,2	2,5	70	86	Н/Д	150

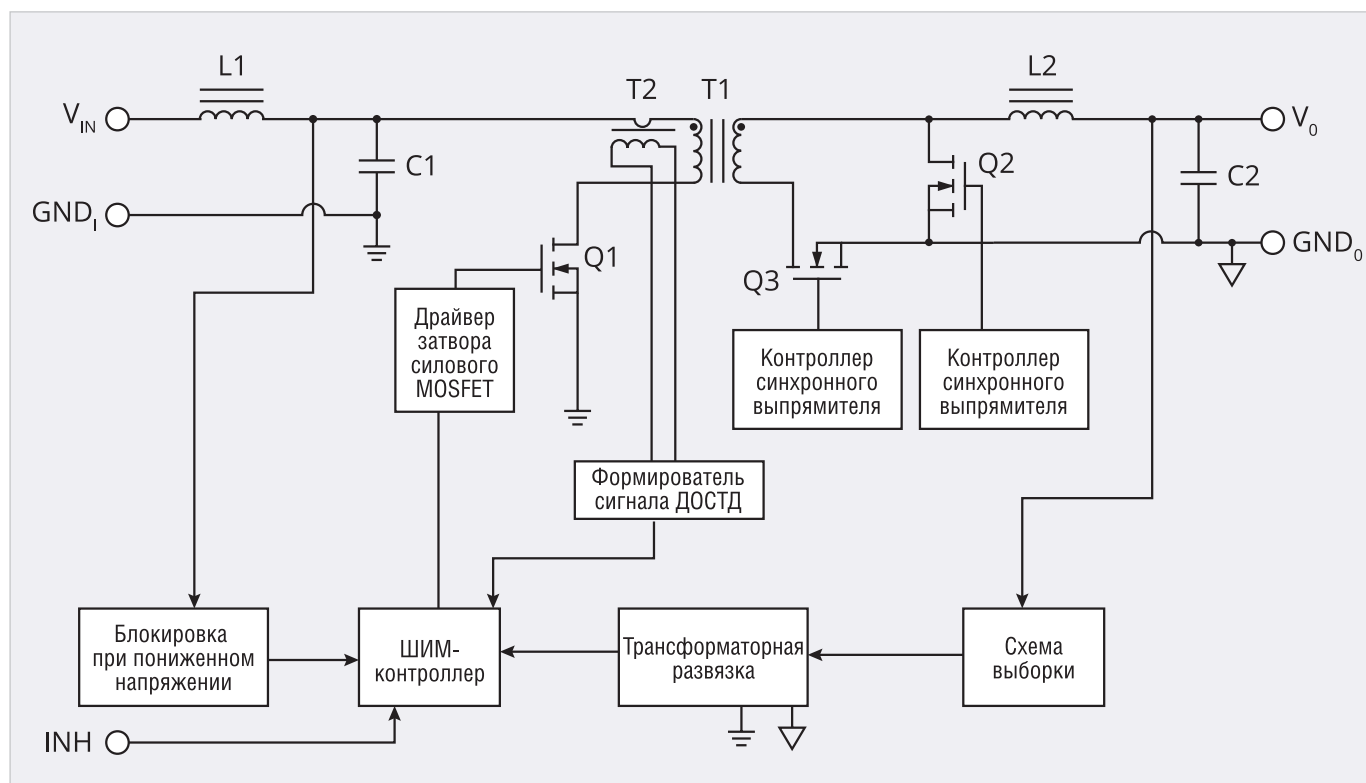


Рис. 8. Упрощённая функциональная схема одноканального модуля серии HMFR28 с резонансным размагничиванием трансформатора и синхронным выпрямлением

15-ваттных модулей серии MHF+ (компания Crane Aerospace & Electronics, Interpoint®, США).

Энергетически эффективные 60-ваттные модули серии HMFR28

Модули серии HMFR28 предназначены для работы от входной сети постоянного тока с диапазоном изменения от 16 до 40 В и допускают переходное отклонение до 50 В длительностью 1 с. Конструктивно модули выполнены в герметичных металлических корпусах с фланцами и без них с вертикальным расположением выводов относительно плоскости основания для сквозного монтажа. На рис. 6 показан внешний вид модуля HMFR28SS5Z с монтажными фланцами специальной формы. Внешние габариты корпуса без монтажных фланцев 54,4×29×10,96 мм (масса 60 г) и 74×29×10,96 мм в исполнении с монтажными фланцами (масса не более 65 г). В табл. 3 представлена полная номенклатура одно- и двухканальных модулей серии HMFR28 и приведены их основные параметры. Удельная мощность по объёму без учёта теплоотвода составляет 2892 Вт/дм³ (для модуля HMFR28S5). Массогабаритные характеристики модулей HMFR28S3R и HMFR28S5, расположе-

ние выводов и их функциональное назначение идентичны параметрам модулей DVHE283R3S и DVHE2805S (VPT, США), но величина выходной мощности модуля HMFR28S5 на 10 Вт больше, чем у модуля DVHE2805S.

На рис. 7 показан внешний вид модуля серии HMFR28 без фланцев с удалённой крышкой, демонстрирующий высокую плотность упаковки активных компонентов бескорпусного исполнения.

Модули выполнены по однотактной прямоходовой структуре, которая является энергетически наиболее эффективной структурой источника питания. Функциональная схема одноканального преобразователя серии HMFR28 показана на рис. 8.

Регулирование (стабилизация) выходного напряжения производится методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей частотой от 300 до 500 кГц, при этом применяются два контура управления – основной контур с обратной связью по напряжению и дополнительный контур с обратной связью по току дросселя. Основной контур служит для компенсации в выходном напряжении, как всех изменений входного напряжения, так и любых изменений, вызванных изменени-

ем нагрузки. Коэффициент заполнения последовательности импульсов от ШИМ-модулятора регулируется от уровня выходного напряжения. Дополнительный контур регулирования используется для прямого регулирования амплитуды тока дросселя (первичной обмотки трансформатора) посредством сигнала ошибки. Ток в силовом транзисторе Q1 контролируется с помощью трансформатора тока T2. Применение дополнительной петли обратной связи по току позволяет значительно улучшить переходную характеристику преобразователя при резких изменениях нагрузки или входного напряжения, а также ещё одним положительным свойством этого режима является автоматическое обеспечение защиты от короткого замыкания в нагрузке, в том числе и в пределах каждого цикла преобразования.

Для повышения эффективности преобразователя за счёт снижения мощности потерь в элементах схемы, упрощения конструкции трансформатора и исключения размагничивающей обмотки применяется структура прямоходового преобразователя с одним силовым ключом, резонансным размагничиванием сердечника силового трансформатора и синхронным выпрямлением.

Размагничивание трансформатора осуществляется через резонансную цепь, состоящую из индуктивности намагничивания и ёмкости, образованной ёмкостями силового ключа Q1, первичной обмотки и всеми ёмкостями на вторичной стороне, приведёнными к первичной стороне. Синхронные ключи Q2 и Q3, используемые вместо прямого и возвратного диода, управляются контроллером при помощи сигналов, поступающих от основного ключа. Сигналы управления транзисторами Q2 и Q3 поступают от цепей контроля первичного ключа. Для исключения кратковременного перекрытия обоих синхронных ключей в схему вводится задержка между сигналами управления синхронных ключей. Транзистор MOSFET синхронного выпрямителя (Q3) характеризуется сверхнизким сопротивлением в открытом состоянии.

Использование синхронного выпрямления позволяет уменьшить перенапряжение на полупроводниковых компонентах схемы в переходных режимах. Детально структура прямоходового преобразователя с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием рассмотрена в работе [5].

MOSFET-драйвер предназначен для быстрой зарядки входных ёмкостей силового ключа Q1.

Высокая нагрузочная способность драйвера обеспечивает управление мощными или параллельно соединёнными n-канальными MOSFET. Драйвер имеет защиту от переходных напряжений, перегрузки по току, падения напряжения управления, перегрева, электростатического разряда.

Пульсирующий входной ток снижается установленным на входе преобразователя LC-фильтром. Для дополнительного подавления помех на входных линиях рекомендуется применение внешнего модуля фильтрации HMFH-461. Применение рекомендуемого производителем сглаживающего фильтра гарантирует устойчивую работу системы «входной фильтр-преобразователь» во всём диапазоне входного напряжения и допустимых нагрузок.

Набор сервисных функций обеспечивает безопасную эксплуатацию и расширяет возможности практического использования модулей в составе комплексов радиоэлектрон-

ной аппаратуры и электронных приборов: управление внешним сигналом включения/выключения, защита от короткого замыкания, защита от пониженного входного напряжения, подстройка выходного напряжения на величину $\pm 6\%$ от номинального значения выхода внешним построеным резистором, выносная обратная связь по напряжению используется для компенсации падения напряжения на соединительных проводниках с нагрузкой. Необходимо учитывать, что в случае, когда цепи внешней обратной связи не используются, выводы VSEN+ и VSEN- могут быть подвешенными или вывод VSEN+ может быть подключён к выводу VOUT, а вывод VSEN- может быть соединён с выводом GNDOUT непосредственно на корпусе модуля.

Диапазон регулировки выходного напряжения ограничен (изменять выходное напряжение модуля могут функции TRIM и SENSE). Для модуля с выходным напряжением 5 В диапазон подстройки лежит в диапазоне от 4,5 до 5,4 В и выходное напряжение должно быть строго меньше 5,4 В. Вывод входа дистанционного выключения должен быть свободным в случае, если он не используется. Когда температура корпуса может достигать значения $+125^\circ\text{C}$, рекомендуется использовать медную теплоотводящую пластину толщиной 3 мм.

В распределённых системах электропитания модули могут применяться в качестве формирователя промежуточной шины для модулей преобразователей напряжения типа POL (Point of Load), которые размещаются в непосредственной близости от питаемого функционального узла.

Модули способны устойчиво работать в условиях воздействия факторов внешней среды, таких как вибрационная нагрузка, линейные перегрузки, механические удары, низкое давление газовой среды, повышенная влажность. Расчётное среднее значение времени наработки до отказа (Mean Time Between Failure, MTBF) составляет 2 250 000 ч (при температуре корпуса 25°C и условиях эксплуатации в стационарном наземном оборудовании).

Модули серии HMFR28 не имеют нормированных показателей радиационной стойкости. Но испытания модулей на стойкость к воздействию ионизирующих излучений, проведё-

нные в одном из российских испытательных центров, подтвердили способность модулей устойчиво работать при высокой дозовой нагрузке – 50 крад (Si).

Закключение

Новые серии компактных DC/DC-преобразователей расширяют номенклатуру изделий, выпускаемых Восточно-китайским научно-исследовательским институтом микроэлектроники. Модули гарантируют долговременную надёжность и высокую стабильность рабочих характеристик в жёстких условиях эксплуатации с повышенными требованиями к объёму и удельной мощности вторичного источника электропитания.

Необходимо заметить, что высоконадёжные компоненты из Китая не стоят много дешевле аналогов из США или стран ЕС, так как это такие же качественные изделия, в их производство вложено не меньше интеллекта и ресурсов [6].

Литература

1. Источники вторичного электропитания / С.С. Букреев, В.А. Головацкий, Г.Н. Гулякович и др.; под ред. Ю.И. Конева. М.: Радио и связь, 1983. 280 с.
2. Микроэлектронные электросистемы. Применения в радиоэлектронике / Ю.И. Конев, Г.Н. Гулякович, К.П. Полянин и др.; под ред. Ю.И. Конева. М.: Радио и связь, 1987. 240 с.
3. Жданкин В. Гибридно-плёночные DC/DC – преобразователи напряжения для применения в аппаратуре специального назначения // Электронные компоненты. 2023. № 2.
4. Brian King, David Strasser. Incorporating Active-Clamp Technology to Maximize Efficiency in Flyback and Forward Designs. pp. 2-21–2-23. URL: <http://u.dianyuan.com/upload/community/2013/12/01/1385866965-98168.pdf>.
5. Герасимов А.А., Кастров А.Ю. Разработка прямоходового преобразователя постоянного напряжения с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием // Практическая силовая электроника. 2011. № 41.
6. Петров Д. Из Китая с космической электронной компонентной базой // Компоненты и Технологии. 2020. № 11.



Панель оператора в качестве терминального устройства

Олег Вальпа

Приведено описание проекта, разработанного автором статьи, позволяющее использовать панель оператора в качестве терминального устройства.



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

Введение

Довольно часто операторам систем управления приходится на практике использовать различные терминальные устройства, работающие через последовательный порт. Простота и большая функциональность таких устройств сохраняют актуальность их применения и в современном технологичном мире.

Благодаря своей компактности и наличию всех необходимых для терминального устройства составляющих практически любую панель оператора можно использовать в качестве терминального пульта. Для этого требуется лишь небольшая программа, которая может быть отдельной частью системы управления.

Рассмотрим на конкретном примере готовый пример такого проекта и программы.

Проект

В качестве панели оператора была использована распространённая модель MT8072iP компании Weintek [1]. Данная семидюймовая панель имеет цветной сенсорный графический экран с разрешением 800×480 пикселей и несколько коммуникационных интерфейсов, среди которых присутствует последовательный порт RS-232. Данный порт позволяет подключать панель оператора к микроконтроллерам, компьютерам или к другой панели оператора, имеющей аналогичный порт. Для осуществления такого подключения потребуется всего лишь три

провода, соединяющие между собой сигнальные цепи: TxD, RxD и GND. Схема подобного соединения между панелью оператора и компьютером показана на рис. 1.

Аналогичным образом можно подключить панель оператора к другой панели оператора или к микропроцессорному устройству.

Программа

С помощью свободно распространяемой среды разработки EasyBuilder Pro создан рабочий программный проект для панели оператора. Описание среды разработки и способы загрузки приложения в панель оператора приведены в статье [2]. Основой проекта служит заготовка, которая автоматически формируется средой разработки при создании нового проекта.

В системных параметрах проекта необходимо добавить новое устройство в соответствии с окном, приведённым на рис. 2.

Здесь задаётся формат интерфейса RS-232, который будет использоваться в терминальном обмене данными.

Главное и единственное окно программы представлено на рис. 3.

Данное окно содержит один строковый элемент ASCII в поле отправки и четыре строковых элемента ASCII в поле приёма. Каждая из строк имеет максимально допустимый для данных элементов размер в 64 символа.

Инициализация этих строк производится с помощью макроса Init. В этом

макросе приведена карта памяти панели оператора. Код макроса Init с подробными комментариями приведён в листинге 1.

Листинг 1. Код макроса Init

```
// Макрос инициализации
macro_command main()
// Карта памяти панели оператора
// LW0...LW255 - Буфер приёма
// LW2000...LW2255 - Буфер отправки
// LW3000 - Указатель начала строки в памяти x
// LW3001 - Счётчик отправленных символов n
// LW3002 - Количество принятых символов k
unsigned short m[256]={0} // Массив строк
unsigned short d=0 // Переменная данных
FILL(m[0], ' ', 256) // Заполнить весь массив строк символом пробела
SetData(m[0], "Local HMI", LW, 0, 256) // Записать массив строк в память панели оператора
SetData(d, "Local HMI", LW, 3000, 1) // Обнулить указатель начала строки в памяти x
SetData(d, "Local HMI", LW, 3001, 1) // Обнулить счётчик отправленных символов n
SetData(d, "Local HMI", LW, 3002, 1) // Обнулить количество принятых символов k
end macro_command
```

При нажатии на поле отправки в окне панели автоматически появится виртуальная клавиатура для ввода любых доступных символов. Завершение ввода производится виртуальной кнопкой «Enter», очистка – кнопкой «Clear», а закрытие клавиатуры – кнопкой «Esc».

Для отправки набранной строки применён элемент «Битовый переключатель» с именем «Отправить», используемый в качестве программной кнопки, который вызывает

Компьютер	Панель оператора
COM1	COM1
RxD 2	6 TxD
TxD 3	9 RxD
GND 5	5 GND

Рис. 1. Схема подключения панели оператора

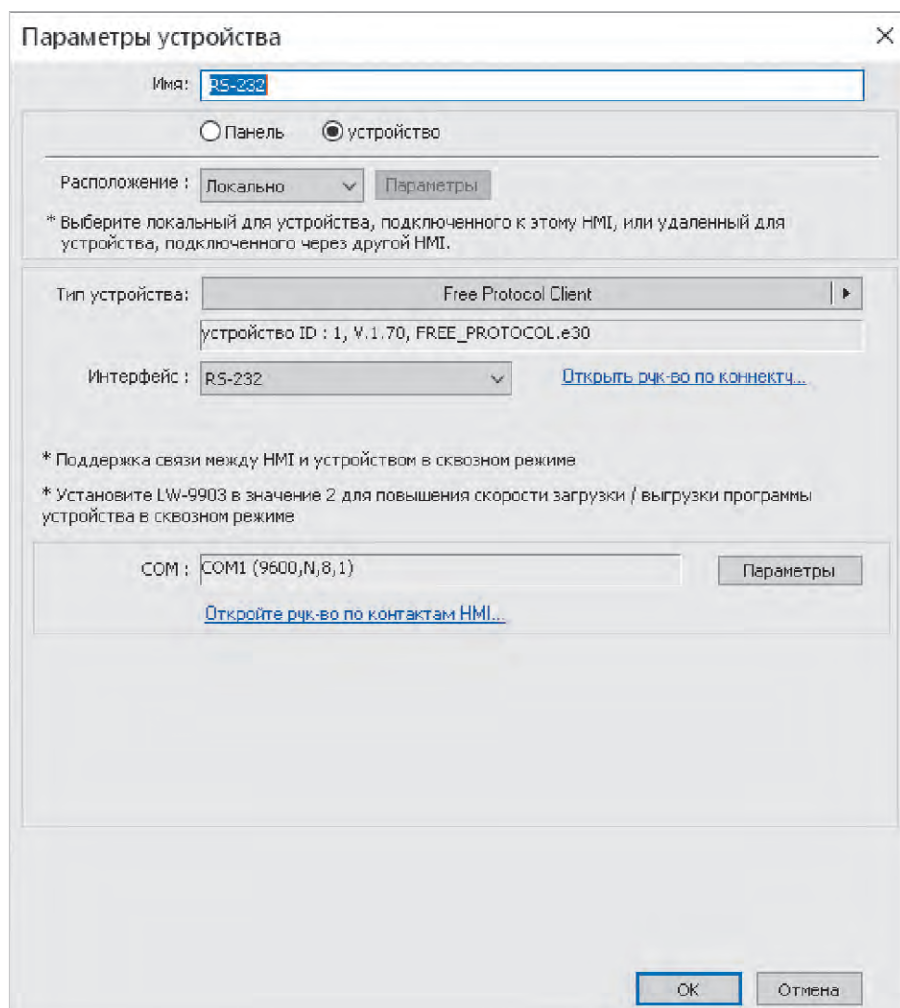


Рис. 2. Окно параметров устройства RS-232

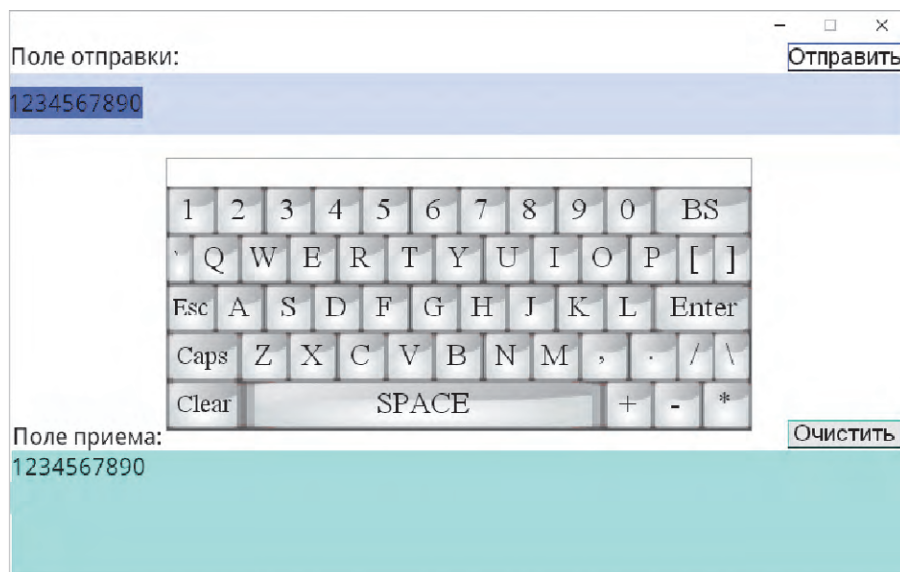


Рис. 3. Главное окно программы

макрос Send_RS-232. Код этого макроса приведён в листинге 2.

Листинг 2. Код макроса Send_RS-232

```
// Макрос отправки строки символов в порт RS-232
macro_command main()
unsigned char tx[256]={0} //
```

```
Массив символов строк
unsigned short n=0 // Счётчик
отправленных символов
unsigned short i=0 // Переменная
цикла
FILL(tx[0], 0, 256) // Обнулить
массив
GetData(tx[0], "Local HMI", LW,
```

```
2000, 256) // Читать из памяти
символы строк в массив
for i=0 to 255 // Проверка мас-
сива
if tx[i] <> 0 then // Если эле-
мент массива не нулевой
OUTPORT(tx[i], "RS-232", 1) //
Отправить элемент массива в порт
RS-232
n=n+1 // Считать отправленные
символы
end if
next i
SetData(n, "Local HMI", LW,
3001, 1) // Записать счётчик в
память
// Веер() // Формировать звуко-
вой сигнал окончания отправки
end macro_command
```

Для очистки поля приёма применён элемент «Битовый переключатель» с именем «Очистить». Он позволяет вызывать макрос Init, который и производит очистку памяти поля приёма.

Последний, третий макрос, который используется в программе, имеет имя Read_RS-232. Он постоянно опрашивает порт RS-232 с периодичностью 100 мс и помещает принятые символы в буфер памяти приёмника. Код макроса Read_RS-232 приведён в листинге 3.

Листинг 3. Код макроса Read_RS-232

```
// Макрос регулярного чтения
порта RS-232
macro_command main()
unsigned char rx[256]={0} //
Массив 8-разрядных символов
строк
unsigned short rxu[256]={0} //
Массив 16-разрядных символов
строк
unsigned short k=0 // Количество
принятых символов
unsigned short x=0 // Указатель
начала строки в памяти
unsigned short i=0 // Переменная
цикла
FILL(rx[0], 0, 256) // Обну-
лить массив 8-разрядных символов
строк
INPORT2(rx[0], "RS-232", k, 1)
// Читать порт RS-232
// TRACE("k=%u", k) // Отладоч-
ная информация
if k>0 then // Если приняты сим-
волы из порта RS-232
SetData(k, "Local HMI", LW, 3002,
1) // Записать количество приня-
тых символов в память
for i=0 to 255
rxu[i]=rx[i] // Копировать
```



```

массив
next i
GetData(x,"Local HMI", LW, 3000,
1) // Читать указатель начала
строки в памяти
SetData(rxu[0],"Local HMI", LW,
x, k) // Записать массив 16-раз-
рядных символов строк в память
x=x+k // Вычислить смещение ука-
зателя
if x>255 then // Если указатель
превысил границу
x=0 // Обнулить указатель
end if
SetData(x,"Local HMI", LW, 3000,
1) // Записать указатель в па-
мять
Beep() // Формировать звуковой
сигнал окончания приёма символов
end if
end macro_command

```

Протестировать программу можно с помощью любого компьютера с установленной на нём терминальной программой или с помощью двух панелей оператора, подключив их между собой.

Заключение

Рабочий проект можно загрузить с сайта журнала и модернизировать его под конкретные задачи.

В данном проекте была использована библиотечная виртуальная клавиатура с латинскими буквами. При необходимости использования других национальных символов можно создать клон этой клавиатуры и назначить для неё нужные коды символов.

Кроме того, можно подключить к панели оператора физическую клавиатуру через интерфейс USB и использовать её для ввода символов. Для этого нужно изменить в атрибутах строкового элемента ASCII из поля отправки свойство ввода данных путём снятия отметки «Использовать всплывающую клавиатуру».

Окно программы можно оформить в соответствии с необходимым дизайном и стилем, соответствующим используемому комплексу системы управления.

Проект можно перенастроить и компилировать для загрузки в любой другой тип панели Weintek с необходимым размером экрана.

Литература

1. URL: <https://www.weintek.net/MT8072iP.html>.
2. Вальна О. Интеллектуальное освещение // СТА. 2025. № 2. С. 52.

НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Россия намерена стать первой страной в мире, которая продемонстрирует работу замкнутого ядерного топливного цикла

Директор по управлению научно-техническими программами «Росатома» Наталья Ильина заявила, что госкорпорация планирует первой в мире продемонстрировать замыкание ядерного топливного цикла. Это должно произойти к 2030 году.

Ильина сообщила, что ведётся активная работа по инновационным ядерным направлениям, в частности по развитию малых и средних станций. Известно, что ядерный энергокомплекс состоит из трёх объектов: энергоблока безопасности с реактором БРЕСТ, модуля переработки облучённого ядерного топлива и завода по производству ядерного топлива, который уже реализован на площадке в Северске (Томская область).



ВАШ ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОПУТЧИК!

Полосковые дисплеи для транспорта

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

PROCHIP
POWERED BY PROSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

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



Реклама

Автоматы лестничного освещения с акустическим датчиком и функцией таймера

Александр Одинец

В статье рассмотрены два автомата, представляющие собой так называемые «трёхполюсник» и «двухполюсник». Первый автомат включает лампу накаливания на время от 15 с до 2 мин при появлении звуковых сигналов. Выдержка времени продлевается по мере поступления новых звуковых сигналов. Второй вариант автомата обеспечивает двухступенчатую задержку выключения освещения. По прошествии половины временного интервала автомат уменьшает яркость лампы накаливания до 50%, а по прошествии всей временной выдержки уменьшает до 10%.

Общие сведения

Первый автомат «трёхполюсник» имеет три выходных контакта, а второй автомат – «двухполюсник» – два контакта, что позволяет включать его последовательно с лампой накаливания без необходимости дополнительной проводки. Стандартную сетевую разветвительную коробку промышленного производства, в которую устанавливается каждый из автоматов, можно разместить в любом удобном месте, обеспечив хорошую вентиляцию коммутирующим элементам в целях пожарной безопасности.

Значительно увеличить срок службы лампы накаливания можно, только обеспечив наиболее благоприятный режим её работы. Как известно, разрушение нити лампы накаливания происходит в большинстве случаев именно в момент включения, когда сопротивление нити в холодном состоянии почти в 10 раз меньше, чем в разогретом. Разогрев нити происходит в течение нескольких полупериодов сетевого напряжения, поэтому при включении происходит большой бросок тока, достигающий по амплитуде нескольких ампер. Применение тиристорного регулятора яркости с фазоимпульсным управлением в составе автомата лестничного освещения позволяет ограничить максимальное напряжение в вечерние часы, когда оно возрастает по причине уменьшения числа потребителей. Такой автомат можно дополнить акустическим датчиком и функцией таймера, что позволит при появлении звукового сигнала включать лампу накали-

вания с максимальной яркостью на время от 15 секунд до 2 минут. Кроме того, ограничение по времени включения лампы накаливания позволяет достичь дополнительной экономии электроэнергии.

Схема электрическая и принцип работы первого варианта устройства

Первый вариант автомата с акустическим датчиком (микрофоном), схема электрическая которого показана на рис. 1, при звуке шагов, хлопке закрываемой двери и других достаточно громких звуках автоматически включает свет на лестничной площадке, в арке или где-нибудь в подсобном помещении. После прекращения звуковых сигналов производится выдержка времени (от 15 с до 2 мин), после чего освещение выключается. Автомат обладает высокой чувствительностью, питается непосредственно от осветительной сети и не требует применения дополнительных блоков питания.

Работает автомат следующим образом. При появлении звукового сигнала переменное напряжение амплитудой несколько милливольт с выхода микрофона через разделительный конденсатор С1 поступает на двухкаскадный усилитель, выполненный на транзисторах VT1 и VT2, и после усиления до напряжения 6...7 В через разделительный конденсатор С4 поступает на входы триггера Шмитта DD1.1, который формирует на выходе прямоугольные импульсы положительной полярности. Каждый такой импульс

открывает эмиттерный повторитель VT3, усиливающий сигнал по току, и быстро заряжает конденсатор С5. На входах элемента DD1.2 формируются уровень лог. 1, который, инвертируясь, закрывает ключевой транзистор VT4 и формирует на его коллекторе, благодаря резистору R12, напряжение уровня лог. 1, разрешающее работу схемы управления коммутирующим тиристором VS1.

Для коммутации лампы накаливания используется узел на основе цифрового компаратора, рассмотренный в [1], который реализует наиболее экономичное импульсное управление тиристором в моменты перехода сетевого напряжения, близкие к нулю. Опыт повторения автором данной конструкции показал частичную неработоспособность данного автомата по приведённой в [1] схеме двухполюсника, однако схемотехническое решение управления коммутирующим тиристором заслуживает внимания, так как позволяет значительно повысить экономичность автомата и рассеивание мощности на балластном резисторе за счёт импульсного управления тиристором, а не постоянным током. Рассмотрение причин неработоспособности оригинальной конструкции [1] выходит за рамки данной статьи, но здесь отметим, что автору всё-таки удалось заставить работать оригинальный автомат управления освещением, но только включив его по схеме «трёхполюсника».

В схеме на рис. 1 на элементах DD1.3 и DD1.4 выполнен вышеназванный компаратор, срабатывающий при каждой полуволне сетевого напряжения в момент, когда её значение достигает порога переключения элемента DD1.3 (примерно половина питающего напряжения ИМС). При этом на выходе элемента DD1.4 формируются положительные импульсы, равные по длительности времени открывания тиристора. Каждый такой импульс открывает транзистор VT5. В результате тиристор VS1 также открывает-

ся и подключает лампу накаливания последовательно с диодным мостом. Но после этого напряжение на тиристоре уменьшается примерно до 1,5 В, что приводит компаратор, собранный на элементах DD1.3 и DD1.4, в исходное состояние, напряжение с выхода которого закрывает транзистор VT5. Тиристор же остаётся в открытом состоянии до тех пор, пока сетевое напряжение не достигнет «нулевого» значения. Затем начнётся вторая полуволна сетевого напряжения и описанный процесс повторится.

Ток протекает через транзистор VT5, а значит, и подаётся на управляющий электрод тиристора, только в течение времени, необходимого для открывания тиристора, – несколько десятков микросекунд. Таким образом, тиристор открывается коротким мощным импульсом тока с небольшой задержкой после начала каждой полуволны сетевого напряжения. Это и обеспечивает устройству высокую экономичность, а тиристору – надёжное включение.

После исчезновения звукового сигнала конденсатор C5 начинает постепенно разряжаться, и когда напряжение на нём снизится до порога переключения элемента DD1.2, напряжение на коллекторе транзистора VT4 упадёт до нуля, и лампа накаливания погаснет. При появлении новых звуковых сигналов открывающийся транзистор VT3 будет подзаряжать конденсатор C5, и время выдержки будет продлеваться. Время задержки свечения лампы накаливания определяется ёмкостью конденсатора C5 и величиной введённой части сопротивления подстроечного резистора R9 и может изменяться в пределах от 15 секунд до 2 минут.

Конструкция и детали. Данный автомат собран на печатной плате (рис. 2) из одностороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм из квадратной заготовки размерами 78×78 мм. Для установки в стандартную пластмассовую сетевую разветвительную коробку типа КЭМ5-10-7 в квадратной заготовке вырезаются уголки размерами 13×13 мм. В автомате применены постоянные резисторы типа МЛТ-0,125, МЛТ-0,5 (R15), МЛТ-2 (R18), подстроечный – СПЗ-386 в горизонтальном исполнении, электролитические конденсаторы – типа К50-35 или аналогичные импортные, неполярные – К10-17. Микрофон может

быть типа CZN-15E, МКЭ-332, МКЭ-333, МКЭ-389-1 (используются в телефонии). На месте стабилитрона VD1 могут работать Д814В (а также с индексами «Г», «Д»), Д810, Д811, Д812, КС510, КС512 или аналогичные импортные маломощные с напряжением стабилизации 10...12 В – BZX55C10, BZX55C12. Диод VD2 – любой маломощный кремниевый из серий КД503, КД521, КД522, 1N4148 – ограничивает напряжение, подводимое к входу элемента DD1.3 с делителя R13–R15 уровнем, чуть превышающим (на величину прямого напряжения диода VD2) напряжение питания микросхемы. Диод VD3 – типа КД105 с индексами «Б», «В», «Г» или Д226 с индексами «Б», «В» или КД209 с индексами «А», «Б», «В». Диоды моста VD4...VD7 могут быть из серии КД226 с индексами «Г», «Д», «Е» или другие с минимально допустимым током не менее 1 А и обратным напряжением не менее 400 В. На месте тиристора VS1 могут работать КУ201 с индексами «К», «Л», «М» (при мощности нагрузки до 300 Вт), а также КУ202М, КУ202Н (при мощности нагрузки до 2 кВт). Во втором случае диоды выпрямительного моста должны быть рассчитаны на ток не менее 10 А и все силовые элементы должны устанавливаться на теплоотводящие радиаторы. Транзисторы VT1, VT2 должны быть из серии КТ3102 с индексом «ЕМ» или импортные BC547C или BC549C, но обязательно со статическим коэффициентом передачи тока не менее 400; VT3...VT5 – из серий КТ3102, КТ503 с любым буквенным индексом. Микросхема К561ТЛ1 (CD4093AN) заменяема на KP1561ТЛ1 (CD4093BN).

Автомат в настройке практически не нуждается, за исключением установки желаемого времени задержки свечения лампы накаливания после исчезновения звукового сигнала с помощью резистора R9. Для получения ещё большей чувствительности (для срабатывания на звук поворота ключа в замочной скважине) в устройство устанавливают резистор R7 сопротивлением 2,2 МОм, показанный на схеме штриховой линией.

Схема электрическая и принцип работы второго варианта устройства

В качестве базового схемотехнического решения второго варианта автомата лестничного освещения (рис. 4) используется тиристорный регулятор

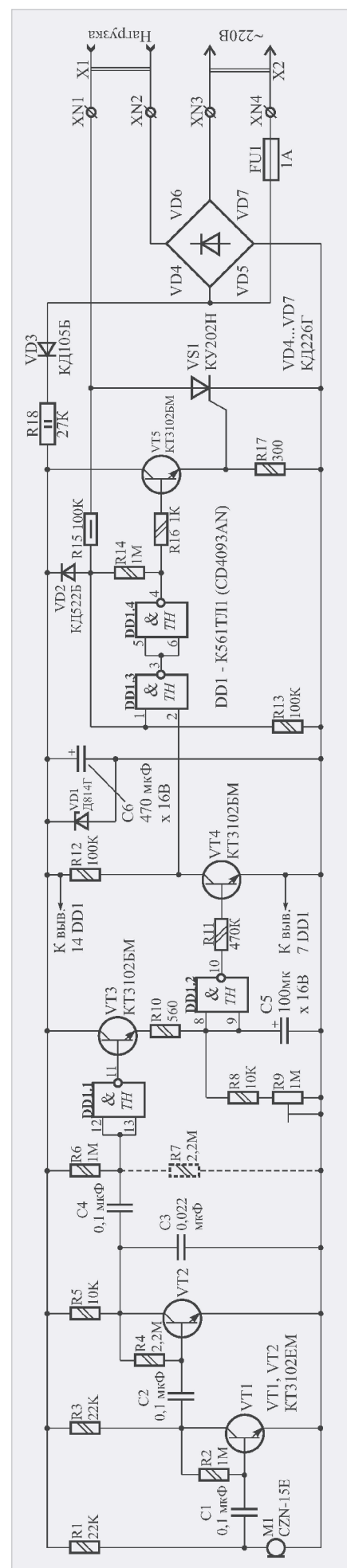


Рис. 1. Автомат лестничного освещения с акустическим датчиком. Схема электрическая принципиальная

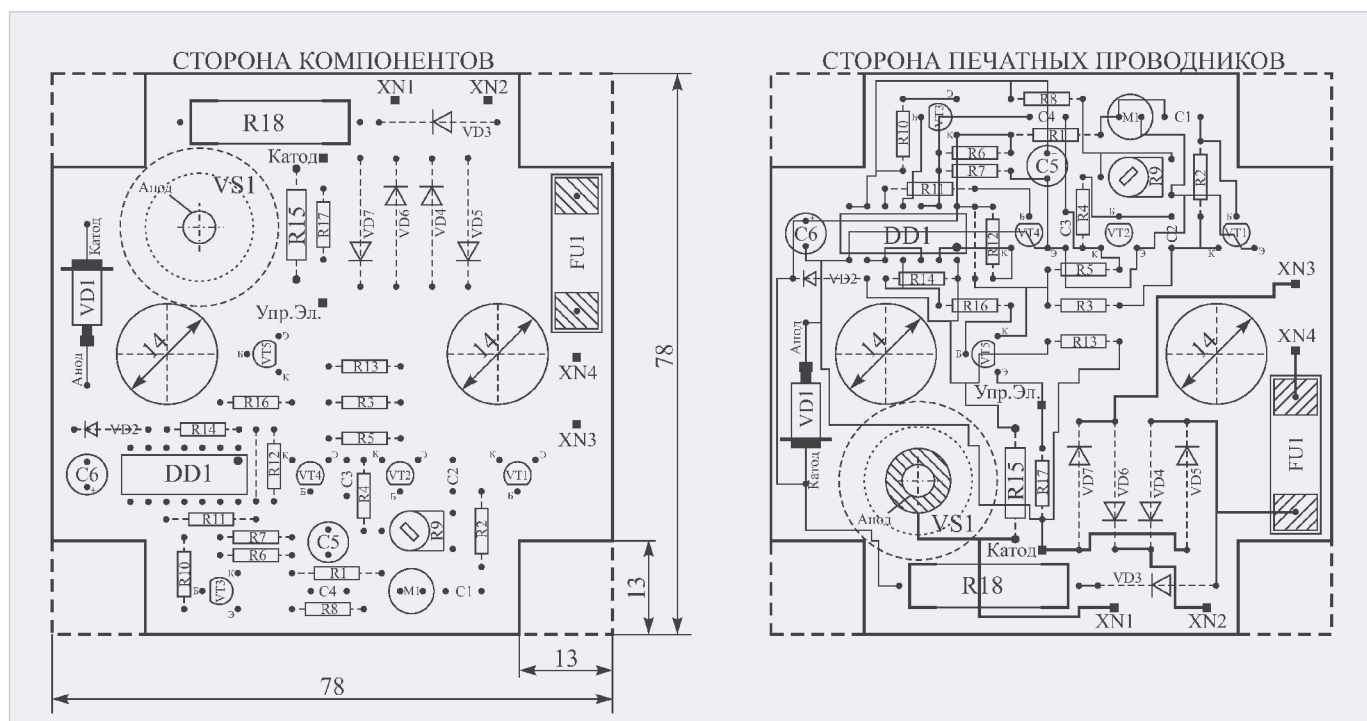


Рис. 2. Автомат лестничного освещения с акустическим датчиком. Рисунок печатной платы

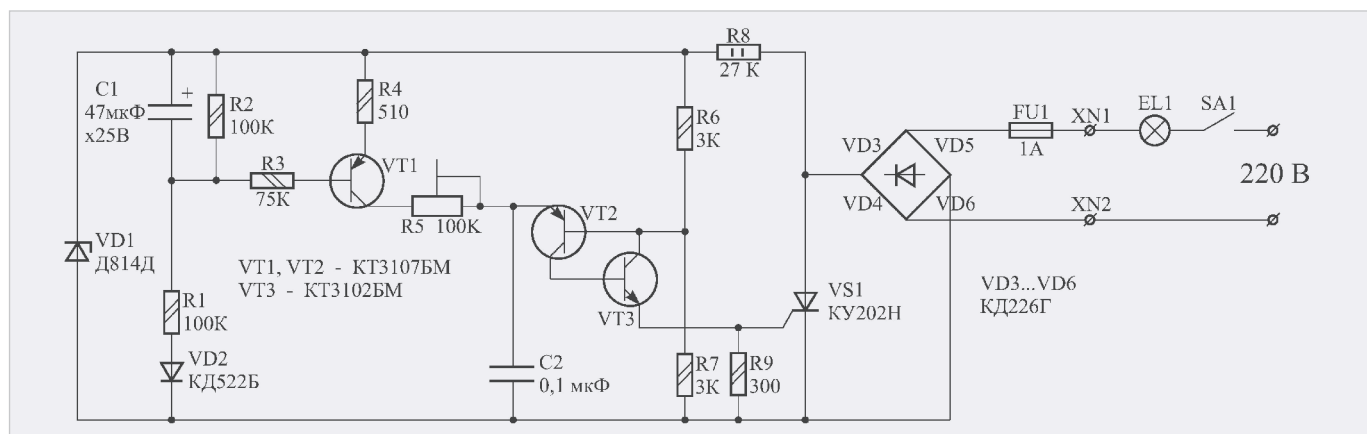


Рис. 3. Автомат защиты ламп накаливания. Схема электрическая принципиальная

яркости [2] с некоторыми изменениями (рис. 3). В частности, два транзистора КТ361, образующие составной, заменены одним из серии КТ3107ЕМ с большим коэффициентом усиления, а для уменьшения времени разрядки конденсатора С1 после выключения питания введён резистор R2.

Автомат (рис. 4) обеспечивает ступенчатое снижение яркости лампы накаливания по прошествии половины выдержки времени, а после полного завершения отсчёта всего временного интервала переходит в режим пониженного энергопотребления с минимальной яркостью лампы. Длительность выдержки может составлять от 1 до 18 часов. Соответственно полупериод отсчёта составляет от 30 минут до 9 часов. По прошествии полупериода отсчёта вре-

мени яркость лампы снижается вдвое, к примеру, до 50% от максимальной, что исключает превышение максимально допустимого напряжения в вечерние часы, когда число потребителей сокращается и напряжение в сети возрастает.

Благодаря применению фазоимпульсного регулятора яркости (рис. 3) в своём составе автомат обеспечивает плавное нарастание тока в момент включения в течение 1 с, что исключает бросок тока благодаря плавному разогреву нити накаливания. Данный автомат (рис. 4) использует фазоимпульсное управление моментом включения тиристора, что определяет мощность, отдаваемую в нагрузку. Сущность фазоимпульсного метода заключается в изменении задержки до момента открывания тиристора,

считая с момента перехода сетевого напряжения через нуль. Чем раньше открывается тиристор, тем больше мощность, отдаваемая в нагрузку, и наоборот – чем позже открывается тиристор, тем меньше мощность, отдаваемая в нагрузку.

В начальный момент времени, когда сетевое напряжение близко к нулю, конденсатор С2 разряжен, транзисторы VT2, VT3 и тиристор VS1 закрыты. После завершения зарядки конденсатора С1 транзистор VT1 полностью открыт, и момент открывания тиристора определяется только постоянной времени цепи R4-R5-C2. По мере заряда конденсатора С2 падение напряжения на эмиттерном переходе транзистора VT2 возрастает. При достижении значения около 0,6 В начинает открываться транзистор VT3, поскольку

в его базовой цепи начинает протекать ток. Это приводит к ещё большему увеличению тока базы транзистора VT2 и лавинообразному включению двух последних и тиристора. Момент появления тока управляющего электрода тиристора VS1 определяет мощность, отдаваемую в нагрузку.

Схема электрическая усовершенствованного варианта автомата лестничного освещения, предназначенного для ступенчатого снижения яркости лампы, приведена на рис. 4. В его составе используется рассмотренный выше тиристорный регулятор яркости с фазоимпульсным управлением, но для нормальной работы автомата и обеспечения питающих напряжений в состав регулятора введена цепочка последовательно включённых резисторов R29–R30, задающая начальную яркость свечения лампы накаливания на уровне 10...15%. Это необходимо для получения стабильного питающего напряжения автомата «+5 В».

В момент замыкания цепи питания (SA1) падение напряжения на лампе накаливания максимально, и, так как в состав параметрического стабилизатора введены балластные конденсаторы C5, C6 относительно небольшой ёмкости, зарядка конденсатора C4 происходит не сразу, а в течение десятых долей секунды. По этой причине постоянная времени интегрирующей цепи R4–C2 выбрана несколько больше времени установления питающего напряжения «+5 В» на выходе интегрального стабилизатора DA1 для обеспечения надёжного обнуления счётчиков DD2 и DD3 в момент включения питания. После установления питающего напряжения «+5 В» на входе инвертирующего элемента DD1.3 с триггером Шмитта ещё некоторое время (определяется номиналами R4, C2) поддерживается уровень лог. 0, который после инвертирования этим элементом обнуляет счётчики DD2 и DD3.

После установки счётчиков DD2 и DD3 в нулевое состояние на выходе «Q12» счётчика DD3 (вывод 1) старшего разряда появляется уровень лог. 0, который, инвертируясь элементом DD1.5, закрывает диод VD8, и, благодаря уровню лог. 1 с выхода элемента DD1.6, открывается ключевой транзистор VT1. Нижний по схеме вывод резистора R18 оказывается подключённым к общему проводу, и происходит зарядка конденсато-

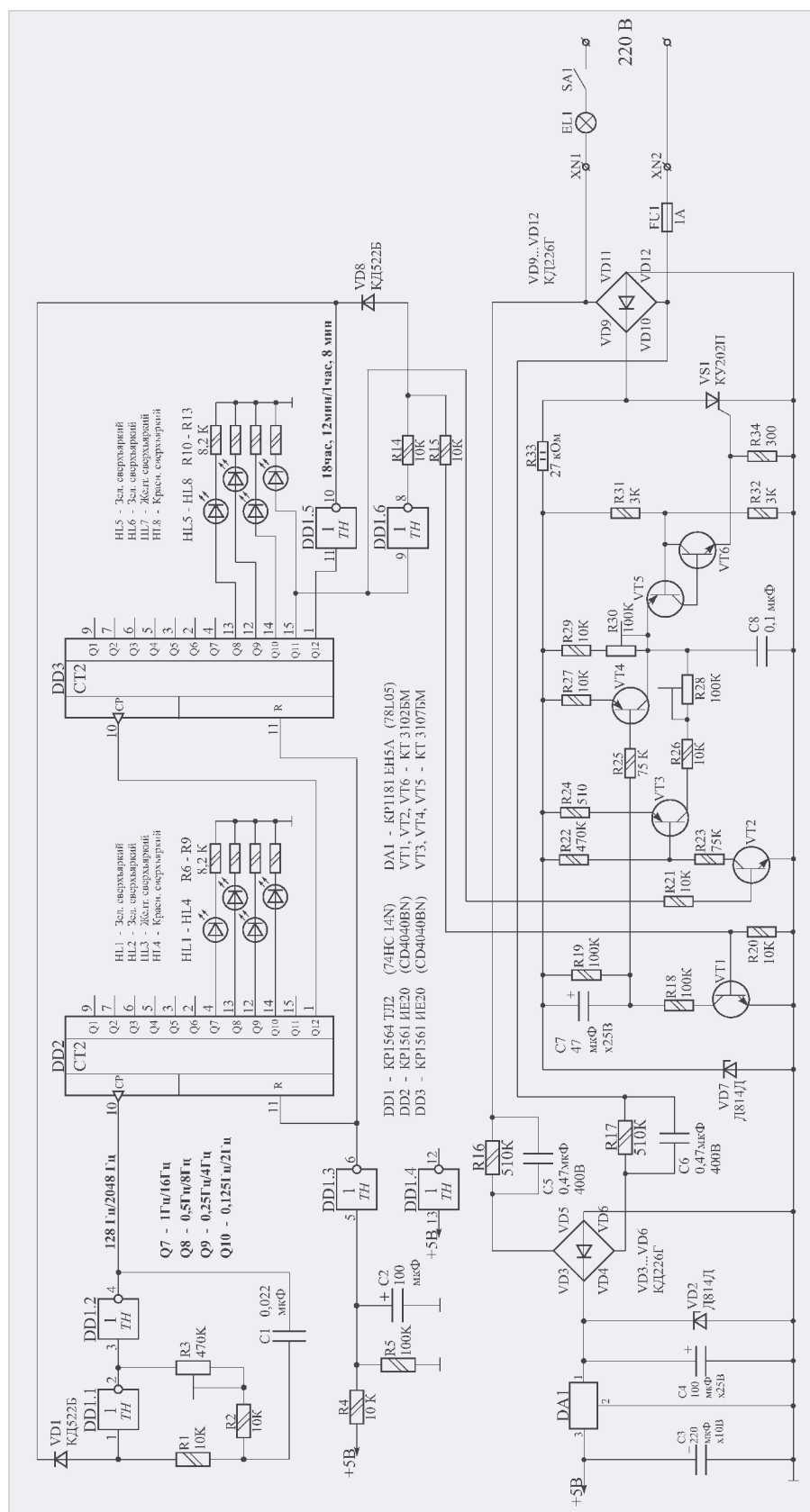


Рис. 4. Автомат лестничного освещения с функцией таймера. Схема электрическая принципиальная

ра C7. Яркость лампы накаливания возрастает в течение 1 с до максимального значения, определяемого сопротивлением резистора R27. Для указанного на схеме номинала R27 максимальное значение яркости составляет около 80%. Таким образом, при первом включении автомата лам-

па накаливания горит с максимальной яркостью 80% в течение полупериода отсчёта временного интервала. Ещё большую яркость лампы (до 95%) можно обеспечить, только включив автомат по схеме «трёхполюсника», как в случае первого варианта автомата (рис. 1). Для автомата лестнич-

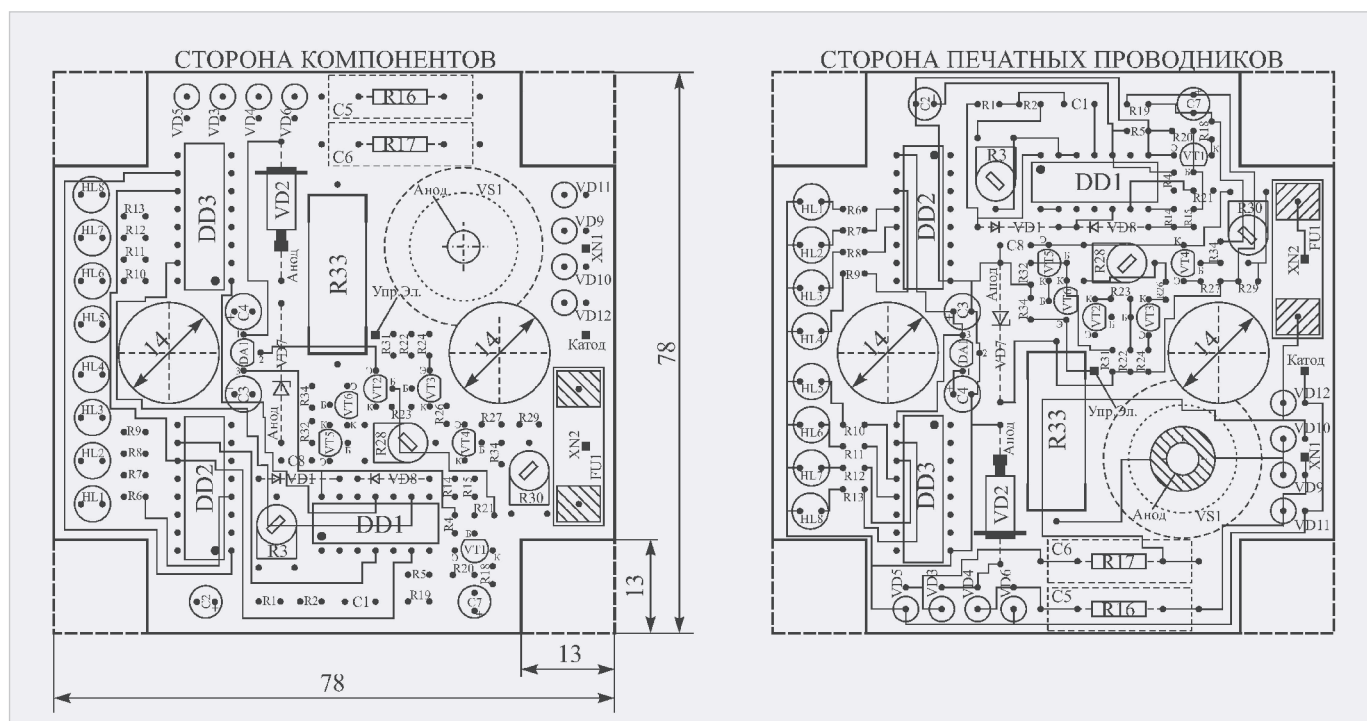


Рис. 5. Автомат лестничного освещения с функцией таймера. Рисунок печатной платы

ного освещения ограничение максимальной яркости непринципиально, поскольку большой яркости освещения обычно не требуется, но в случае необходимости компенсировать потерю яркости можно за счёт установки лампы накаливания большей мощности.

Одновременно уровень лог. 1 с выхода элемента DD1.5 закрывает диод VD1 и разрешает работу генератора, собранного на элементах DD1.1, DD1.2, R1...R3, C1. Импульсы положительной полярности являются счётными для DD2, а импульсы с его выхода – счётными для DD3, который при достижении 1024 состояния формирует на выходе своего предпоследнего разряда «Q11» (вывод 15) уровень лог. 1. Этот уровень открывает транзистор VT2, а вслед за ним – и VT3. Уровень лог. 0 с выхода элемента DD1.6 закрывает транзистор VT1, и яркость лампы теперь определяется введённым сопротивлением резистора R28 и может быть выбрана в диапазоне 10...80%.

При достижении счётчиком DD3 своего 2048 состояния уровень лог. 1 на выходе его разряда «Q11» (вывод 15) сменяется уровнем лог. 0, а на выходе старшего разряда «Q12» (вывод 1) счётчика появляется уровень лог. 1, который, инvertируясь элементом DD1.5, приводит к остановке генератора. Этот же уровень лог. 0 пунтирует правый по схеме вывод резистора

R14 на «землю» и закрывает транзистор VT1. Одновременно уровнем лог. 0 с выхода «Q11» счётчика DD3 закрываются транзисторы VT2 и VT3, и автомат переходит в режим ожидания с минимальной яркостью (устанавливается резистором R30), что необходимо для обеспечения минимального энергопотребления.

Визуальную оценку прошедшего времени выдержки (при настройке таймера) производят по линейкам светодиодов HL1...HL4 и HL5...HL8 (для удобства HL1, HL2, HL5, HL6 выбраны зелёные, HL3, HL7 – жёлтые и HL4, HL8 – красные).

Конструкция и детали. Данный автомат собран на печатной плате (рис. 5) из двустороннего стеклотекстолита толщиной 1,5 мм из квадратной заготовки размерами 78×78 мм. Для установки в стандартную сетевую разветвительную коробку типа КЭМ5-10-7 в квадратной заготовке вырезаются уголки размерами 13×13 мм. В автомате применены постоянные резисторы МЛТ-0,125, МЛТ-2 (R33), подстроечные СПЗ-386 в горизонтальном исполнении, балластные конденсаторы C5, C6 типа К73-17 с номинальным напряжением 400 В, остальные неполярные – К10-17, электролитические – К50-35. На месте стабилитронов VD2, VD7, как и в предыдущем варианте, могут работать Д814В (а также с индексами «Г», «Д»), КС510, КС512, КС515 или аналогичные импортные маломощ-

ные ВХ55С10, ВХ55С12, ВХ55С15 с напряжением стабилизации 10...15 В. Транзисторы VT1, VT2, VT6 могут быть из серии КТ3102 с любыми индексами или импортные BC547; VT3...VT5 – КТ3107 или импортные BC557. ИМС DD1 KP1564TL2 (74HC14N), содержащая шесть триггеров Шмитта, заменяя CD40106, счётчик KP1561IE20 (CD4040BN) заменим KP1564IE20 (74HC4040N).

Настройка второго варианта устройства заключается в установке минимальной яркости в режиме ожидания с помощью резистора R30, яркости в режиме пониженного энергопотребления резистором R28 и времени выдержки резистором R3. При мощности лампы накаливания более 75 Вт тиристор необходимо установить на теплоотвод.

Внимание! Элементы устройств имеют непосредственный гальванический контакт с сетью 220 В / 50 Гц, поэтому при работе с ними следует соблюдать требования техники безопасности! При настройке следует использовать отвёртку с ручкой из изоляционного материала, а также избегать прикосновения к элементам, находящимся под напряжением сети!

Литература

1. Нечаев И. Автомат управляет освещением // Радио. 1996. № 5. С. 46–47.
2. Регулируем яркость светильника // Радио. 1992. № 1. С. 22.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Новый лазерный «гребень» обеспечивает сверхточную идентификацию химических веществ в реальном времени

Учёные из Массачусетского технологического института (MIT) разработали ультракомпактный инфракрасный частотный гребень с рекордной шириной полосы пропускания – прорыв, который может революционизировать портативную и дистанционную спектроскопию. Это устройство способно быстро и с предельной точностью обнаруживать и идентифицировать химические вещества, включая следовые загрязнители в атмосфере, что открывает новые возможности для экологического мониторинга, медицинской диагностики и безопасности.

Что такое частотный гребень?

Оптический частотный гребень – это специальный тип лазера, генерирующий ряд точно расположенных лазерных линий, напоминающих зубья гребня. Эти «зубцы» служат как высокоточная линейка для измерения частот света. Благодаря своей стабильности и равномерности частотные гребни позволяют с исключительной точностью определять спектральные «отпечатки» молекул – уникальные поглощения света на определённых длинах волн, характерные для каждого химического соединения.

Особенно эффективны гребни в длинноволновом инфракрасном диапазоне (LWIR), где многие молекулы, включая парниковые газы, токсины и летучие органические соединения, имеют сильные и характерные полосы поглощения.

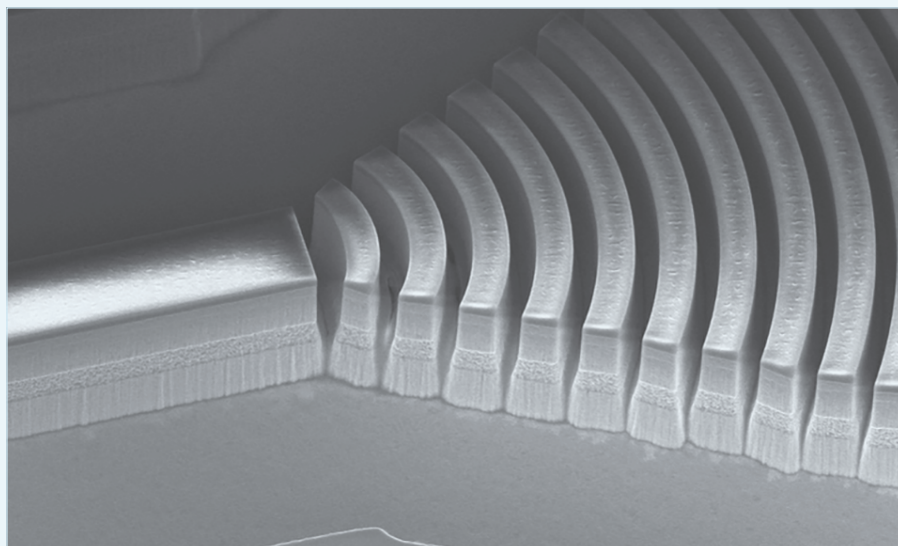
Почему ширина полосы имеет значение

Чем шире полоса пропускания гребня, тем больше химических веществ он может обнаружить одновременно. Однако расширение полосы наталкивается на серьёзное препятствие – оптическую дисперсию. Когда свет проходит через материал, разные длины волн ведут себя по-разному, что нарушает равномерность «зубьев» гребня и делает его бесполезным.

«Дисперсия – главный враг широкополосных частотных гребней, особенно в инфракрасном диапазоне, где она особенно сильна», – говорит Цин Ху, заслуженный профессор электротехники и компьютерных наук в MIT, руководитель исследования. – Вместо того чтобы её избегать, мы сделали её центральным элементом нашей разработки и научились её контролировать».

Ключ к успеху: зеркало с двойным чирпированием

Решение нашлось в адаптации технологии, ранее разработанной командой Ху для терагерцовых лазеров: зеркало с двой-



ным чирпированием (DCM – Double-Chirped Mirror). Это многослойное оптическое зеркало, в котором толщина слоёв плавно изменяется по длине, что позволяет компенсировать дисперсию за счёт точной настройки ки отражения различных длин волн.

Перенести эту технологию на инфракрасный диапазон оказалось непросто. Инфракрасные волны в 10 раз короче, чем терагерцовые, что требует нанометровой точности при изготовлении. Кроме того, зеркало нужно было покрыть толстым слоем золота для отвода тепла, а стандартные методы измерения дисперсии не работали на таких высоких частотах.

Команда разработала новую платформу для измерения дисперсии в инфракрасном диапазоне, не требующую громоздкого внешнего оборудования. Это позволило им точно проектировать и настраивать DCM для конкретных лазеров.

Интеграция и миниатюризация

Ключевым достижением стало полное интегрирование DCM в сам лазер. Это сделало устройство чрезвычайно компактным – без движущихся частей и внешних компонентов. Устройство стало по-настоящему масштабируемым и пригодным для массового производства.

«Соседние слои зеркала отличаются всего на десятки нанометров», – говорит Тяньи Цзэн, ведущий автор исследования, доктор MIT. – Такой уровень точности недостижим с помощью обычной фотолитографии. Нам пришлось разработать специальные методы травления, чтобы достичь нужной глубины и геометрии в сложных многослойных структурах».

Как это работает: двухгребенчатая спектроскопия

Новый гребень идеально подходит для метода, называемого двухгребенчатой спек-

троскопией (DCS). В этой технике два идентичных частотных гребня используются одновременно:

- один луч проходит напрямую к детектору (референсный сигнал),
- второй проходит через исследуемый образец, где молекулы поглощают определённые длины волн.

Сравнивая два сигнала, система может с высокой точностью восстановить химический состав образца – даже при крайне низких концентрациях.

Благодаря широкой полосе пропускания новый гребень способен охватить множество химических соединений за один раз, что делает его мощным инструментом для мониторинга воздуха, обнаружения утечек или анализа выдыхаемого воздуха у пациентов.

Преимущества для реального мира

Технология открывает путь к созданию:

- портативных спектрометров для полевых исследований и экологического контроля,
- дистанционных датчиков, способных обнаруживать опасные вещества на расстоянии (например, в аэропортах или промышленных зонах),
- миниатюрных систем диагностики для медицинского применения.

«Наш подход гибкий, – подчёркивает Ху. – Пока мы можем измерить дисперсию, мы можем спроектировать DCM, который её компенсирует. Это означает, что нашу технологию можно адаптировать под разные лазерные платформы и диапазоны».

Что дальше?

В перспективе исследователи планируют расширить свою методологию на другие типы лазеров, чтобы создавать гребни с ещё большей полосой пропускания и мощностью – для более сложных и требовательных приложений, включая космические миссии и квантовые технологии.

Приёмно-контрольный прибор охранно-пожарной сигнализации на базе программируемого реле

Сергей Шишкин

В статье представлен вариант построения приёмно-контрольного прибора охранно-пожарной сигнализации с контролем состояния включённых в шлейф пожарных и охранных извещателей. Прибор выполнен на базе программируемого реле ПР205.

Введение

Комплексная система безопасности предприятий, офисов, складов и пр. создаётся для обеспечения необходимого уровня защищённости объекта. И важным звеном такой системы является система охранно-пожарной сигнализации – ОПС. В зависимости от уровня важности защищаемого объекта, его категории определяется структура и её состав.

ОПС – это совокупность совместно действующих технических средств обнаружения проникновения нарушителя на охраняемых объектах и (или) возникновения пожара на них, передачи, сбора, обработки и отображения информации в заданном виде.

В составе любой ОПС имеется прибор – приёмно-контрольный ППК. Это техническое средство ОПС, выполняющее функции сбора и обработки информации от охранных или пожарных извещателей (которые могут быть подключены в шлейф) и выдачи тревожных сообщений на пульт центрального наблюдения ПЦН, а также формирования управляющих сигналов для системы оповещения и ликвидации угроз. Шлейф охранно-пожар-

ных извещателей – электрическая цепь, соединяющая выходные цепи охранных (пожарных, охранно-пожарных) извещателей, включающая в себя вспомогательные (выносные) элементы (диоды, резисторы, конденсаторы и т.п.) и соединительные провода, предназначенные для передачи на приёмно-контрольный прибор извещений о проникновении, попытке проникновения и неисправности, а в некоторых случаях и для подачи электропитания на извещатели.

ППК должен обеспечивать выполнение следующих основных функций:

- приём сигналов от извещателей и других устройств, включённых в шлейфы сигнализации;
- формирование извещений для передачи на ПЦН ОПС (для ППК централизованной сигнализации или на другой ППК);
- контроль исправности шлейфов сигнализации и каналов связи;
- управление световыми и/или звуковыми оповещателями, средствами отображения информации и другими объектовыми устройствами;
- управление постановкой на охрану и снятием с охраны.

Приборы приёмно-контрольные классифицируются по следующим признакам:

- по виду организации тревожной сигнализации;
- по способу контроля извещателей;
- по структуре шлейфов сигнализации;
- по информационной ёмкости;
- по виду канала связи с извещателями;
- по информативности.

На ответственных объектах в состав системы охранно-пожарной сигнализации входит автоматизированное рабочее место диспетчера АРМ. На

рис. 1 приведён внешний вид серийно выпускаемых ППК «Гранит».

ППК для неадресных извещателей на базе ПР205

По способу контроля извещателей ОПС могут быть следующих типов:

- неадресные (аналоговые);
- адресные;
- комбинированные.

В статье представлен ППК, который задействован в неадресной ОПС. Неадресные системы строятся по следующему принципу. Охраняемый объект разбивается на сектора прокладкой отдельных шлейфов, объединяющих некоторое количество извещателей. При срабатывании любого датчика подаётся сигнал тревоги по всему шлейфу. Решение о возникновении события «принимает» только извещатель, работоспособность которого можно проверить только во время технического обслуживания ОПС. Стоимость такой системы относительно низкая, хотя и необходимо прокладывать большое количество шлейфов. Структурная схема ОПС с представляемым ПКП приведена на рис. 2.

На структурной схеме представлены следующие составные части: ПЦН (позиционное обозначение – А1); система передачи извещений А2; автоматизированное рабочее место оператора АРМ А3; ППК А4; шлейф с пожарными извещателями В01; шлейф с охранными извещателями В02; оповещатель пожарной сигнализации О1; оповещатель охранной сигнализации О2; модуль электропитания U1. В качестве оповещателей могут быть задействованы следующие устройства:

- звуковая сигнализация (ревун, сирена и др.);
- световая сигнализация (лампочки, световые полосы, стробоскоп и др.).

Устройство выполнено на базе программируемого реле ОВЕН ПР205-24.1211.02.2.0 (далее программируемое реле или ПР205). Внешний вид программируемого реле ПР205 приведён на рис. 3.



Рис. 1. Внешний вид ППК «Гранит»

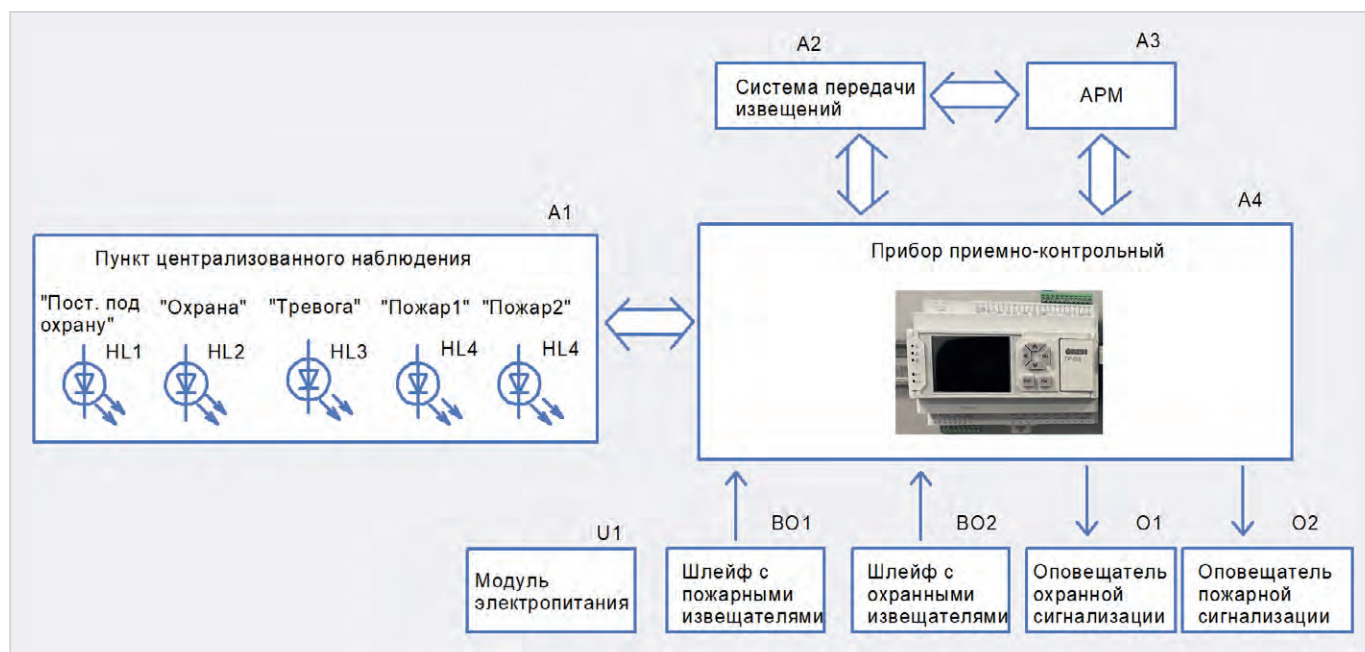


Рис. 2. Структурная схема СТС

ПР205 предназначено для построения простых автоматизированных систем управления технологическим оборудованием и программируется в среде Owen Logic на языке FBD. Пользовательская программа записывается в энергонезависимую флеш-память прибора.

Прибор поддерживает следующие функции:

- работа по программе, записанной в память;
- отображение данных и мнемосхем на графическом цветном экране;
- ввод и редактирование данных с помощью кнопок на лицевой панели;
- работа в сети RS-485 по протоколам Modbus RTU/Modbus ASCII в режиме Master или Slave;
- работа в сети Ethernet по протоколу Modbus TCP в режиме Slave;
- обработка входных сигналов от датчиков;
- управление подключёнными устройствами с помощью дискретных или аналоговых сигналов.

Более подробно работа ПР205 рассмотрена в [1]. В описываемом устройстве ПР205 выполняет следующие функции:

- осуществляет контроль тока в шлейфе (контроль режима функционирования шлейфа);
- работа по заданному алгоритму;
- управление исполнительными устройствами;
- передача по последовательному сетевому интерфейсу (RS-485) дан-

ных в центральный диспетчерский пункт ОС;

- обмен данными по сетевым интерфейсам с АРМ;
- отображение сигналов при функционировании устройства на графическом цветном экране.

Для передачи извещений на ПЦН или на АРМ в ПР205 могут быть задействованы сетевые интерфейсы (2× RS-485 или Ethernet). На рис. 4 приведена принципиальная схема ОПС с ППК на базе ПР205.

ОПС состоит из следующих составных частей: ППК на базе ПР205 (позиционное обозначение – А1); шлейфы с нормально замкнутыми пожарными извещателями А2, А3; шлейфы с охранными извещателями А4, А5.

В состав ППК входят: ПР205 АВ1; кнопки управления S1–S7; лампа Н1; модуль питания U1; звуковой пьезоизлучатель ВА1; клеммные колодки ХТ1–ХТ4. К соединителям ХС1 и ХС2 подключаются соответственно пожарные и охранные оповещатели. Сетевое напряжение 220 В поступает на соединитель ХР1. Напряжение 24 В поступает на соединитель ХР2.

Функциональное назначение резисторов в ОПС следующее:

- R1–R4 – ограничительные резисторы тока в шлейфах;
- R5–R8 – балластные резисторы для пожарных извещателей;
- R9–R12 – оконечные резисторы.

Рассмотрим работу принципиальной схемы. Шлейф пожарной сигнализации А2 (далее ШС1) с двумя

пожарными извещателями на размыкание S1 и S2 подключается к ПКП А1 через клеммную колодку ХТ1. Данный шлейф имеет 5 режимов функционирования:

- режим «обрыв шлейфа»;
- срабатывание одного извещателя S1 на размыкание (режим «Пожар1»);
- срабатывание двух извещателей S1, S2 на размыкание (режим «Пожар 2»);
- рабочий «дежурный» режим;
- режим «короткое замыкание».

Параметры ШС1 для различных режимов функционирования приведены в табл. 1.

При подсчёте общего сопротивления шлейфа учитывается ограничительный резистор R1 в ПКП. Сопротивлением кабеля и током утечки между проводами шлейфа можно пре-



Рис. 3. Внешний вид программируемого реле ПР205



Рис. 4. Принципиальная схема ОПС с ППК на базе ПР205

Таблица 1. Параметры ШС1 для различных режимов функционирования

	Обрыв шлейфа	Срабатка одного извещателя на размыкание	Срабатка двух извещателей на размыкание	Дежурный режим	Короткое замыкание
Сопротивление шлейфа, кОм	∞	8,7	11,7	5,7	1
Ток шлейфа, мА	0	2,3	1,7	3,5	20

Таблица 2. Параметры ШС3 для различных режимов функционирования

	Обрыв шлейфа. Срабатка охранного извещателя на размыкание (взлом)	Дежурный режим	Короткое замыкание шлейфа
Сопротивление шлейфа, кОм	∞	8,5	1
Ток шлейфа, мА	0	2,4	20

Таблица 3. Характеристики универсальных аналоговых входов ПР205

Наименование	Значение
Разрешающая способность АЦП	12 бит
Период обновления результатов измерения всех каналов, не более	1 мс
Тип измеряемых сигналов	Униполярный 0...10 В, 4...20 мА
Предел основной приведённой погрешности	Не более ±0,5%
Дополнительная приведённая погрешность, вызванная изменением температуры окружающей среды в пределах рабочего диапазона, на каждые 10 градусов	0,5 от основной
Предельное положительное входное напряжение для режима дискретного входа и датчика 0...10 В	30 В

Таблица 4. Функциональное назначение дискретных и аналоговых входов реле ПР205

Дискретный вход ПР205	Обозначение в среде OWEN Logic	Подключение элементов управления на принципиальной схеме	Функциональное назначение в устройстве
DI1	I1	Подключение кнопки S1	Кнопка постановки под охрану / снятия с охраны ШС1
DI2	I2	Подключение кнопки S2	Кнопка постановки под охрану / снятия с охраны ШС2
DI3	I3	Подключение кнопки S3	Кнопка постановки под охрану / снятия с охраны ШС3
DI4	I4	Подключение кнопки S4	Кнопка постановки под охрану / снятия с охраны ШС4
DI5	I5	Подключение кнопки S5	Кнопка «Пуск». Ручной запуск оповещения о пожаре
DI6	I6	Подключение кнопки S6	Кнопка «Стоп». Остановка оповещения о пожаре
FDI1	FI1	Подключение кнопки S7	Выключение звука при срабатывании охранно-пожарной сигнализации
Аналоговый вход	Обозначение в среде OWEN Logic		
AI1	AI1	-----	Контроль тока в шлейфе пожарной сигнализации ШС1
AI2	AI2	-----	Контроль тока в шлейфе пожарной сигнализации ШС2
AI3	AI3	-----	Контроль тока в шлейфе охранной сигнализации ШС3
AI4	AI4	-----	Контроль тока в шлейфе охранной сигнализации ШС4

небрежь. Для того чтобы минимизировать разброс параметров шлейфа, целесообразно применить в качестве ограничительных и балластных прецизионные резисторы. Шлейф пожарной сигнализации А3 (далее ШС2) подключается к ПКП А1 через клеммную колодку ХТ2. Его параметры аналогичны ШС1. Шлейф охранной сигнализации А4 (далее ШС3) подключается к ПКП А1 через клеммную колодку ХТ3. Параметры ШС3 для различных режимов функционирования приведены в табл. 2.

Шлейф охранной сигнализации А5 (далее ШС4) подключается к ПКП А1 через клеммную колодку ХТ4. Его параметры аналогичны ШС3.

В ПР205 имеется четыре универсальных аналоговых входа типа «ДАТ». То есть к данным входам можно подключить четыре независимых шлейфа с охранно-пожарными извещателями. Характеристики данных входов приведены в режиме «аналогового входа 1» в табл. 3.

Режим работы входов типа «ДАТ» в ППК сконфигурирован как измерение тока 4–20 мА. При контроле неадресных шлейфов по напряжению данные входы в ПР205 могут быть сконфигурированы на измерение напряжения 0–10 В. Пожарные извещатели (S1–S4) могут быть применены следующих типов:

- пожарные ручные ИП535-8-А;

- пожарные тепловые ИП101-1А-А1/А3 и ИП101-3А-А3R;
- пожарные дымовые ИП212-63 «ДАНКО» и ИП212-63М «ДАНКО вариант 2».

Охранные извещатели (S5–S8) могут быть применены следующих типов:

- охранные оптико-электронные «Рapid» вар. 1, 2, 4, 5, «Рapid-3» вар. 1, 2, «Рapid-10» вар. 1, 2, «Рapid Эк»;
- охранные магнитоконтактные ИО102-32 «ПОЛЮС-2»;
- охранные звуковые (разбития стекла) «СОНАР», «СОНАР-2».

Программа на языке FBD в среде QWEN LOGIC для ПКП

Прибор имеет следующие основные режимы работы.

Для охранной сигнализации:

- режим «Снят с охраны»;
- режим «Постановка на охрану»;
- режим «Охрана» («Дежурный» режим);
- режим «Тревога».

Для пожарной сигнализации:

- режим «Снят с охраны»;
- режим «Дежурный»;
- режим «Пожар1»;
- режим «Пожар2»;
- режим «Пуск» (ручной запуск оповещения о пожаре), «Стоп» (остановка ручного пуска оповещения о пожаре).

Устройство может выдавать следующие основные виды извещений на встроенные индикаторы, внешние оповещатели и сигнальные линии для ПЦН:

- «Норма» – при отсутствии тревог и неисправностей;
- «Тревога» – при срабатывании охранного извещателя в любом охранном ШС;
- «Пожар1» – при срабатывании одного пожарного извещателя в любом пожарном ШС;
- «Пожар2» – при срабатывании двух пожарных извещателей в любом пожарном ШС;
- «Неисправность общая» – при любой общей неисправности шлейфов прибора;
- «Отключение звука» – при отключении звука встроенного сигнализатора с панели прибора.

Скриншот управляющей программы для ПКП в среде OWEN Logic приведён на рис. 5.

В табл. 4 приведено функциональное назначение дискретных и аналоговых входов реле ПР205.

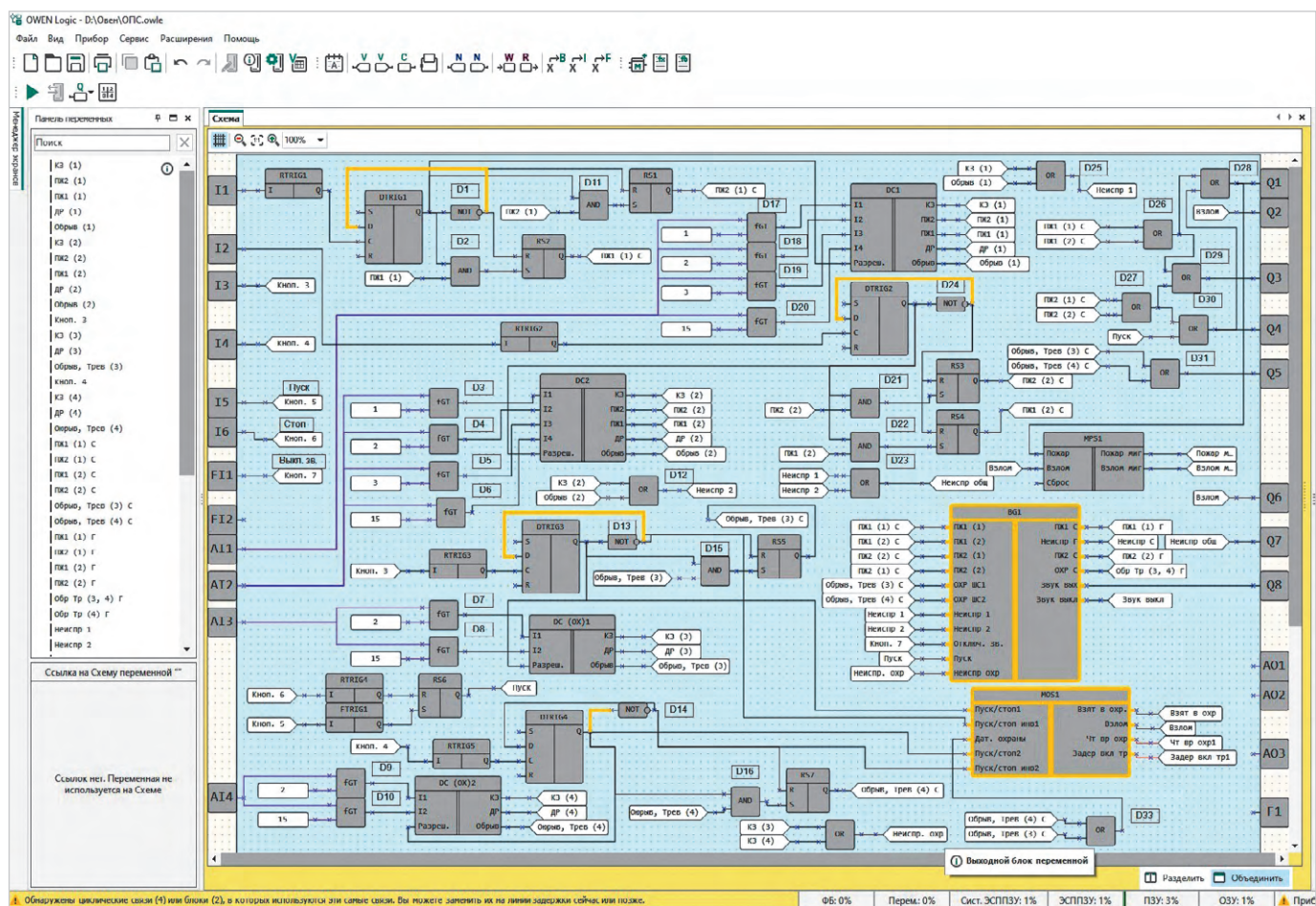


Рис. 5. Скриншот управляющей программы для ПКП в среде OWEN Logic

Вход FDI1 сконфигурирован как дискретный. В табл. 5 приведено функциональное назначение дискретных выходов реле PR205 в устройстве.

В среде QWEN Logic при создании проекта на холсте, у элементов функций (логических, арифметических, сравнения и пр.), взятых из библиотеки, отсутствуют позиционные обозначения с нумерацией. Поэтому для описания алгоритма работы на холсте их приходится делать вручную с помощью блока комментариев.

В скриншоте управляющей программы, представленной на рис. 4, можно выделить семь функциональных блоков:

- блок контроля и обработки сигналов пожарного ШС1 включает в себя: детектор переднего фронта RTRIG1, RS-триггеры RS1, RS2, D-триггер DTRIG1, модули сравнения fGT D17-D20, макрос дешифратора DC1, логический элемент HE D1, логические элементы 2И-D2, D11;
- блок контроля и обработки сигналов пожарного ШС2 включает в себя: детектор переднего фронта RTRIG2, RS-триггеры RS3, RS4, D-триггер DTRIG2, модули сравнения fGT D3-D6, макрос

Таблица 5. Функциональное назначение дискретных выходов реле PR205

Дискретный выход	Обозначение в среде OWEN Logic	Функциональное назначение выхода в устройстве
D01	Q1	Выход для подключения оповещателя пожарной сигнализации
D02	Q2	Выход для подключения оповещателя охранной сигнализации
D03	Q3	Выход для передачи тревожных извещений в режимах «Пожар2» и «Пожар1» на пульт ПЦН
D04	Q4	Выход для передачи тревожных извещений в режимах «Пожар2» и «Пуск» на пульт ПЦН
D05	Q5	Выход для передачи тревожных извещений на пульт ПЦН при срабатывании охранного извещателя в любом из охраняемых ШС
D06	Q6	Выход для передачи тревожных извещений в режиме «Тревога» на пульт ПЦН
D07	Q7	Выход сигнала на пульт ПЦН в режиме «Неисправность общая»
D08	Q8	Выход звуковой сигнализации

дешифратора DC2, логический элемент HE D26, логические элементы 2И-D21, D22;

- блок контроля и обработки сигналов охранного ШС3 включает в себя: детектор переднего фронта RTRIG3, RS-триггер RS5, D-триггер DTRIG3, модули сравнения fGT D7, D8; макрос дешифратора DC (OX)1; логический элемент HE D13, логический элемент 2И D15;
- блок контроля и обработки сигналов охранного ШС4 включает в себя: детектор переднего фронта RTRIG5, RS-триггер RS7, D-триггер DTRIG4, мо-

дули сравнения fGT D9, D10; макрос дешифратора DC (OX)2; логический элемент HE D14, логический элемент 2И D116;

- блок генераторов (макрос BG1);
- модуль охранной сигнализации (макрос MOS1);
- модуль формирования выходных сигналов для ПЦН (элементы D27-D33).

Рассмотрим работу блока контроля и обработки сигналов пожарного ШС1.

Ток в пожарном ШС1 поступает на аналоговый вход AI1. Значения тока контролируются модулями сравнения

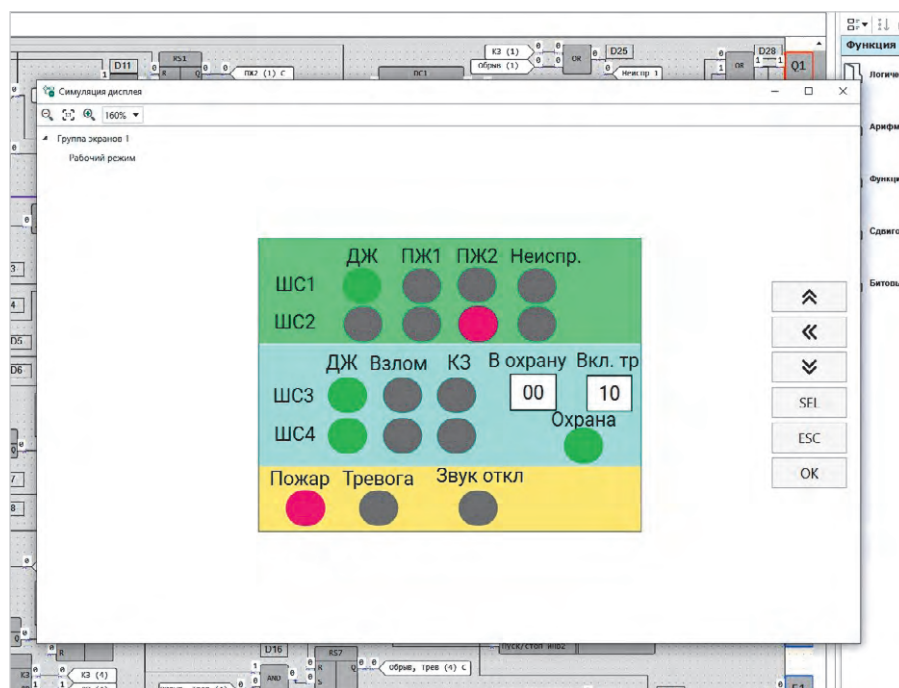


Рис. 6. Скриншот менеджера экранов в среде OWEN Logic, в режиме симуляции

Таблица 6. Значения рабочего кода для различных режимов функционирования пожарного ШС1

	Обрыв шлейфа	Срабатка одного извещателя на размыкание	Срабатка двух извещателей на размыкание	Дежурный режим	Короткое замыкание шлейфа
Ток шлейфа, мА	0	2,3	1,7	3,5	20
Код на выходе модулей сравнения fGT D17–D20	0000	0001	0011	0111	1111

Таблица 7. Звуковая сигнализация устройства в зависимости от его состояния

Режим, состояние устройства, событие	Звуковая сигнализация
«Пожар1»	Прерывистый звуковой сигнал с периодом 2 с
«Пожар2»	Прерывистый звуковой сигнал с периодом 1 с
«Тревога»	Непрерывный звуковой сигнал
«Неисправность»	Прерывистый звуковой сигнал с периодом 4 с
Кнопка «Пуск». Ручной запуск оповещения о пожаре	Прерывистый звуковой сигнал с периодом 1 с

Таблица 8. Значения рабочего кода для различных режимов функционирования охранного ШС3

	Обрыв шлейфа. Срабатка охранного извещателя на размыкание (взлом)	Дежурный режим	Короткое замыкание шлейфа
Ток шлейфа, мА	0	2,4	20
Код на выходе модулей сравнения fGT D7, D8	00	01	11

fGT D17-D20. Код на выходе модулей сравнения fGT D17-D20 соответствует определённому значению тока в шлейфе, а значит, и определённому режиму функционирования пожарного ШС1. В табл. 6 приведены значения рабочего кода для различных режимов функционирования пожарного ШС1.

Данный код поступает на вход дешифратора DC1. В зависимости от его значения соответствующие выходы макроса DC1 после получения сиг-

нала «разрешения» устанавливаются в лог. 1. Выходы макроса DC1 имеют следующее функциональное назначение:

- КЗ – короткое замыкание;
- ПЖ1 – режим «Пожар1»;
- ПЖ2 – режим «Пожар2»;
- ДР – «дежурный» режим;
- Обрыв – обрыв шлейфа.

После нажатия на кнопку S1 «ШС1» импульс сигнала уровня лог. 1 с выхода RTRIG1 установит выход Q1 D-триггера DTRIG1 в лог. 1. На входе

«разрешение» макроса DC1 появится лог. 1. Это значит, что работа данного макроса разрешена. Пусть пожарный шлейф ШС1 функционирует в режиме «Пожар1». Это значит, на входе макроса DC1 присутствует код 0001. А на его выходе «ПЖ1» устанавливается лог. 1, которая через элемент D1 поступит на вход S триггера RS2, тем самым устанавливая выход триггера RS2 в лог. 1 (переменная «ПЖ1 (1) С»). Далее лог. 1 поступает на соответствующий вход макроса блока генераторов BG1, а также на вход элемента D28. Данный элемент функционально входит в модуль формирования выходных сигналов для ПЦН. Макрос блока генераторов BG1 необходим для формирования звуковой сигнализации в различных режимах работы ППК, а также для формирования периодических световых сигналов, которые выводятся на дисплей PR205. Сигнал с макрос-блока генераторов BG1 поступает на звуковой пьезоизлучатель BA1 (рис. 4). Звуковая сигнализация устройства в зависимости от его состояния приведена в табл. 7.

Блок контроля и обработки сигналов пожарного ШС2 работает совершенно аналогичным образом.

Рассмотрим работу блока контроля и обработки сигналов охранного ШС3.

Ток в охранном ШС3 поступает на аналоговый вход AI3 программируемого реле. Значения тока контролируются модулями сравнения fGT D7, D8. Код на выходе модулей сравнения fGT D7, D8 соответствует определённому режиму функционирования охранного ШС3. В табл. 8 приведены значения рабочего кода для различных режимов функционирования охранного ШС3.

Контрольный код поступает на вход дешифратора DC (OX)1. В зависимости от его значения соответствующие выходы макроса DC (OX)1 после получения сигнала «разрешения» устанавливаются в лог. 1. Выходы макроса DC1(OX) имеют следующее функциональное назначение:

- КЗ – короткое замыкание;
- ДР – дежурный режим;
- Обрыв – обрыв шлейфа (срабатывание охранного датчика).

Пусть охранный ШС3 функционирует в «Дежурном» режиме. После нажатия на кнопку S3 «ШС3» импульс сигнала уровня лог. 1 с выхода RTRIG3 установит выход Q1 D-триггера DTRIG3 в лог. 1. На входе «разрешение» макроса DC (OX)1 установится лог. 1. На вхо-

де «Пуск/стоп1» макроса MOS1 также установится лог. 1. Это значит, что работа данных макросов разрешена. Прибор переходит в режим «Постановка под охрану». Начинается обратный отсчёт времени постановки времени устройства под охрану «В охрану», который отображается на дисплее ПР205. За это время необходимо закрыть окна, двери и покинуть помещение. Как только параметр принимает нулевое значение, на дисплее ПР205 включается индикатор «Охрана». Прибор переходит в режим «Охрана».

Допустим, злоумышленник пытается проникнуть на объект. Тогда охранный ШС3 переходит в режим «Обрыв шлейфа. Тревога». Это значит, на входе макроса DC (ОХ)1 присутствует код 00. А на его выходе «Обрыв» устанавливается лог. 1, которая через элемент D15 поступит на вход S триггера RS5, тем самым устанавливая выход триггера RS5 в лог. 1 (переменная «Обрыв Трев.» (3) С). Далее лог. 1 поступает на соответствующий вход макроса блока генераторов BG1, а также на вход элемента 2ИЛИ D33 и далее на вход «Дат. охраны» макроса MOS1. Начинается обратный отсчёт времени включения тревоги «Вкл. тр.», который

отображается на дисплее ПР205. Как только параметр принимает нулевое значение, на дисплее ПР205 включается индикатор «Тревога». Блок контроля и обработки сигналов охранного ШС4 работает совершенно аналогичным образом. Разобраться в его работе совсем нетрудно.

На рис. 6 приведён скриншот менеджера экранов в среде OWEN Logic в режиме симуляции.

На рисунке приведена экранная форма, которая будет отображаться на экране ПР205. Смоделированы следующие режимы работ устройства:

- пожарный ШС1 функционирует в «дежурном» режиме;
- пожарный ШС2 функционирует в режиме «Пожар2»;
- охранный ШС3 функционирует в «дежурном» режиме;
- охранный ШС4 функционирует в «дежурном» режиме.

Устройство находится в режиме «Охрана». Включён индикатор «Охрана». Включён общий сигнал «Пожар».

Заключение

Существующие методы контроля состояния неадресных ШС сводятся к двум типам:

- контроль по напряжению шлейфа;
- контроль по току шлейфа.

ПР205 позволяет осуществлять контроль ШС как по току, так и по напряжению. Кроме того, узел сети на базе ПР205 с подключёнными двумя модулями расширения ПРМ-24.2 позволяет контролировать двенадцать независимых шлейфов охранно-пожарных сигнализаций. Программируемое реле ПР205 – готовое решение для реализации ППК охранно-пожарных сигнализаций. Фактически разработка ППК на базе ПР205 сводится к разработке специального программного обеспечения для ПР205.

Литература

1. Руководство по эксплуатации. Устройство управляющее многофункциональное ПР205.
2. ГОСТ Р 53325-2009. Техника пожарная. Технические средства пожарной автоматики.
3. ГОСТ 31817.1.1-2012. Системы тревожной сигнализации.
4. Приборы приёмно-контрольные и управления охранно-пожарные ГРАНИТ-3, ГРАНИТ-5, ГРАНИТ-8, ГРАНИТ-12. Руководство по эксплуатации САПО.425519.028РЭ.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Научный прорыв в области 3D-печати сверхпроводников совершили специалисты в США. Новая методика открывает широкие возможности для применения в квантовой электронике и других высокотехнологичных сферах

Учёные Корнеллского университета (Cornell University) представили новую технологию 3D-печати сверхпроводящих элементов, которая значительно упрощает их производство. Если ранее для создания таких компонентов требовалось несколько циклов отжига на каждом этапе, то теперь их можно печатать за один подход – с единственным циклом термообработки. Это открывает возможности для изготовления сверхпроводников сложной конфигурации и расширяет сферу их применения в науке и промышленности.

В основе метода – специальный состав из сополимеров и неорганических наночастиц, который в процессе печати самоорганизуется, а после отжига превращается в пористые кристаллические сверхпроводни-

ки. Такой «одноэтапный» процесс (one-pot) исключает необходимость многоступенчатого синтеза, использования множества порошков, связующих компонентов и повторяющихся нагревов.

Новая технология позволяет контролировать структуру сверхпроводников на трёх уровнях: атомном (кристаллическая решётка), мезоскопическом (благодаря самоорганизации сополимеров) и макроскопическом (в виде готовых компонентов схемы – катушек, спиралей и других сложных форм). Метод был успешно испытан на нитриде ниобия, который демонстрирует сверхпроводимость при охлаждении до -256°C и сохраняет свои свойства в магнитных полях силой до 50 тесла – значительно выше, чем у аналогов этого класса. Напечатанные элементы подтвердили работоспособность даже в условиях максимального для них магнитного поля.

Применение порошковой 3D-печати для создания сверхпроводников не только упрощает их производство, но и открывает перспективы для улучшения целого ряда технологий – от магнитов для МРТ до квантовых устройств.



«Мы долго шли к этому результату, – отмечают исследователи. – Наша работа демонстрирует, что можно не только печатать сложные формы, но и придавать материалам свойства, ранее недостижимые».

В планах команды – адаптировать этот подход для других сверхпроводящих соединений, включая нитрид титана, а также исследовать сложные трёхмерные структуры, которые невозможно получить традиционными методами. Кроме того, пористая архитектура материала обеспечивает рекордную площадь поверхности, что может быть востребовано в исследованиях квантовых материалов и устройств нового поколения.



DeepSeek запускает V3.1 – новый вызов лидерству США в корпоративном ИИ

Китайский стартап DeepSeek сделал решительный шаг в глобальной гонке искусственного интеллекта, представив свою самую мощную на сегодняшний день модель – DeepSeek V3.1 с 685 миллиардами параметров. Распространяемая с открытым исходным кодом новая модель, по утверждениям экспертов, достигает уровня производительности, сопоставимого с ведущими проприетарными системами от OpenAI и Anthropic, и может стать серьёзным конкурентом на рынке корпоративного ИИ.

Появление модели вызвало широкий резонанс в техническом сообществе: ранние тесты показывают, что V3.1 уверенно конкурирует с топовыми западными моделями, включая GPT-4 и Claude 3, особенно в задачах обработки длинных текстов благодаря масштабному контекстному окну в 128 тысяч токенов.

Глобальный сдвиг в балансе сил

Запуск V3.1 – не просто технический проыв. Это сигнал о том, что Китай всё увереннее входит в число лидеров в области ИИ, бросая вызов технологическому доминированию США.

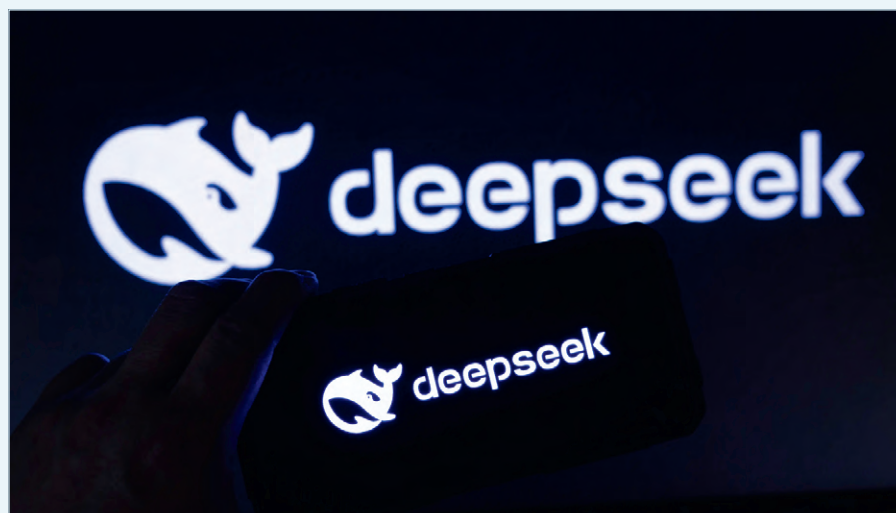
Генеральный директор OpenAI Сэм Алтман прямо признал этот тренд, заявив CNBC, что решение компании выпустить модели с открытыми весами (впервые с GPT-2) было во многом продиктовано растущей конкуренцией со стороны китайских разработчиков, включая DeepSeek. Он также предостерёг: экспортные ограничения на чипы вряд ли удержат Китай в долгосрочной перспективе, если тот продолжит интенсивно развивать собственные технологии.

«США могут недооценивать масштаб и скорость прогресса Китая в области ИИ, – отметил Алтман. – Конкуренция становится всё более глобальной и острой».

Открытый код как оружие инноваций

Одно из главных преимуществ DeepSeek V3.1 – открытость. В отличие от закрытых моделей, доступ к которым контролируется через API и подписки, V3.1 можно свободно загрузить, модифицировать и развернуть локально. Это делает её особенно привлекательной для компаний, стремящихся к контролю, прозрачности и снижению зависимости от платформенных посредников.

«DeepSeek разрушает "закрытый ров", в котором долгое время находились американские ИИ-гиганты, – говорит Оиси Мазумдер, старший аналитик Everest Group. – Теперь OpenAI, Anthropic и Google должны дифференцироваться не только мощностью



модели, а доверием, безопасностью, корпоративной поддержкой и экосистемой».

Праху Рам, вице-президент по отраслевым исследованиям в Cybermedia Research, добавляет: «DeepSeek поднял планку по размеру, производительности и стоимости. Теперь операторы, предлагающие ИИ по подписке, вынуждены пересматривать свои стратегии – открытые модели становятся серьёзной альтернативой».

Чего ждать дальше: R2 и вызовы инфраструктуры

В то время как V3.1 уже доступна, внимание разработчиков приковано к следующему поколению – DeepSeek R2. По данным Financial Times, запуск R2 был временно отложен из-за трудностей с обучением модели на чипах Huawei Ascend. В итоге компания была вынуждена частично перейти на оборудование Nvidia, чтобы завершить обучение, поскольку процессоры Huawei пока недостаточно эффективны для масштабного обучения, хотя и подходят для вывода (inference).

Этот инцидент подчёркивает ключевое противоречие: Китай стремится к технологической независимости, но всё ещё зависит от западной инфраструктуры на критических этапах разработки.

Внедрение в бизнес: возможности и риски

Несмотря на технические достижения, аналитики сомневаются, что DeepSeek V3.1 немедленно завоюет рынок США.

«Для массового внедрения в западные корпорации нужны два условия, – говорит Лянь Цзе Су, главный аналитик Omdia. – Во-первых, ослабление геополитической напряжённости. Во-вторых, доказательство, что DeepSeek может существенно превзойти модели от Meta, Mistral или Nvidia в реальных бизнес-сценариях – например, в юридическом анализе, финансовой аналитике или автоматизации процессов».

Тем не менее за пределами США – особенно в Азии, Ближнем Востоке и частях Европы – открытая лицензия DeepSeek может стать катализатором для ИТ-директоров, стремящихся:

- ускорить внутреннюю разработку ИИ,
- снизить затраты на API и подписки,
- получить полный контроль над данными и настройкой моделей.

Однако, как предупреждает Праху Рам, масштаб модели требует огромных вычислительных ресурсов. Компаниям нужно тщательно оценить свою инфраструктуру, риски соблюдения нормативных требований и возможные последствия экспортного контроля.

Корпоративные стандарты: где DeepSeek ещё отстаёт

Несмотря на производительность, DeepSeek пока не предлагает уровня поддержки, безопасности и соответствия стандартам, характерного для корпоративных решений вроде Anthropic's Claude for Enterprise или Microsoft Azure OpenAI.

«Нет ни SLA, ни встроенных механизмов аудита, ни системы управления доступом на уровне предприятия, – отмечает Нил Шах из Counterpoint Research. – Для крупных компаний это критично. DeepSeek может быть технически продвинут, но он ещё не "корпоративный" в полном смысле слова».

Стратегический контекст: борьба за будущее технологий

Глобальная гонка ИИ – это уже не просто соревнование моделей. Это борьба за будущее вычислений, экономики и безопасности.

США сохраняют лидерство в полупроводниках, облачных платформах и операционных системах. Китай, сталкиваясь с санкциями, компенсирует это агрессивными инвестициями в ИИ, фокусируясь на открытых моделях, национальных экосистемах и государственной поддержке.



Двухканальный усилитель для наушников, подключаемых к телефону, с батарейным питанием

Алексей Кузьминов

В статье описан двухканальный усилитель для наушников на базе сдвоенного ОУ AD8532 и ОУ AD8531. Для питания усилителя используется аккумулятор 18650 ёмкостью 3 А·ч, что позволяет устройству непрерывно работать около 100 часов. Диапазон входных напряжений – стандартный входной звуковой сигнал (телефон, плеер, проигрыватель виниловых пластинок и т.п.) с амплитудой 0,3–0,4 В. Активное сопротивление наушников – не менее 30–50 Ом. Диапазон частот 0 Гц – 30 кГц. КНИ+Ш – менее 0,3%. Приведены: схема усилителя, разводка и внешний вид его платы, общий вид всего устройства, а также осциллограммы, полученные при тестировании усилителя.



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

Введение

Портативный усилитель для наушников, подключаемых к современным смартфонам, оснащённым разъёмом USB Type-C, хорошо известен; его можно приобрести по цене от 1000 руб. и выше. Питание такого усилителя и два выходных звуковых сигнала выведены на этот же разъём USB Type-C. Однако до сих пор используются смартфоны и планшеты, оборудованные разъёмом USB Micro, который подоб-

ным свойством не обладает. У этих смартфонов и планшетов для подключения к наушникам используется стандартный разъём: гнездо 3,5 мм стерео. Однако, если подключить к этому разъёму даже достаточно качественные наушники, звук будет очень слабым, поскольку активное сопротивление таких наушников составляет 40–60 Ом, на которое подобные смартфоны и планшеты, как правило, не рассчитаны. В связи с этим выпу-

скаются усилители для наушников, укомплектованные аккумулятором, цены на которые достаточно высокие (от 2–3 тысяч рублей и выше). Также выпускаются усилители для наушников, питание которых осуществляется от сетевого напряжения ≈ 220 В. Цены на подобные усилители начинаются уже от 10 тыс. руб. Автор задался вопросом: а нельзя ли сконструировать усилитель для наушников своими силами? Тем более что уже имелись достаточно качественные наушники и смартфон, оборудованный аудиовходом 3,5 мм стерео, а разъём USB был как раз Micro. Просмотр схем подобных усилителей из Интернета показал, что подавляющее их большинство основано на дискретных элементах (транзисторах), и эти схемы достаточно сложны и габаритны. Более простое решение – использование мощных ОУ. Но такие ОУ достаточно дороги и также габаритны. Стандартные ОУ в менее габаритных корпусах, например, MSOP или «безногих» QFN, как правило, обеспечивают выходной ток не более 10–20 мА, поэтому обеспечить нагрузку в 40–60 Ом не способны. Однако автор нашёл несколько достаточно мощных ОУ в корпусах MSOP и QFN, выходной ток которых может достигать 250 мА. Одним из таких ОУ является AD853X производства компании Analog Devices. Существует одноканальная версия этого ОУ – AD8531 (в корпусе SOT23-5), двухканальная – AD8532 (MSOP-8) и даже 4-канальная – AD8534 (TSSOP-14). Этот ОУ достаточно скоростной (5 В/мкс, 3 МГц), обеспечивает выходной ток до 250 мА и требует питания напряжением 2,7–6 В. ОУ достаточно распространён, легкодоступен и недорог: AD8531 можно приобрести за 40–60 руб., а AD8532 – за 100–120 руб. Этот ОУ, в частности, как раз предназначен для аудиоприменений (Multimedia Audio) и

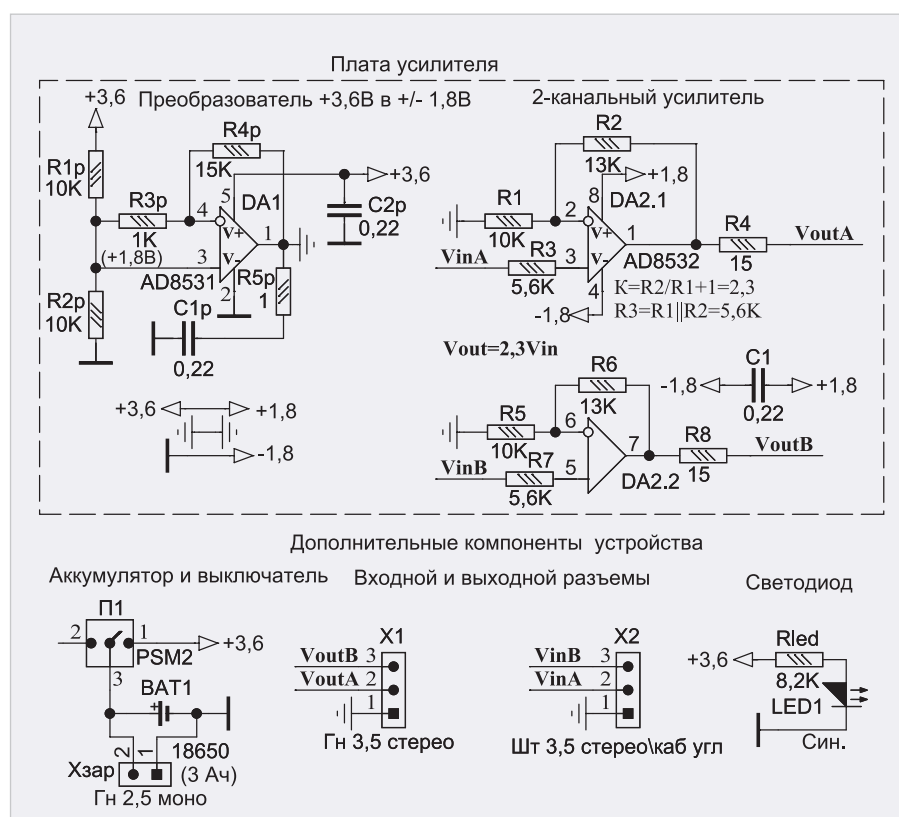


Рис. 1. Принципиальная схема устройства

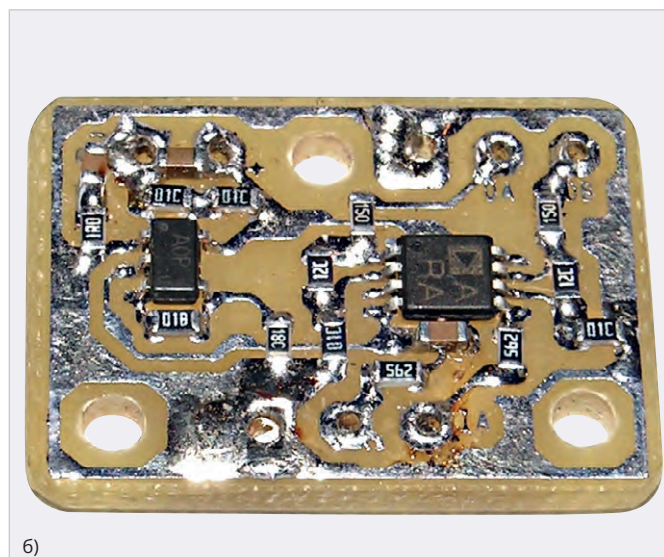
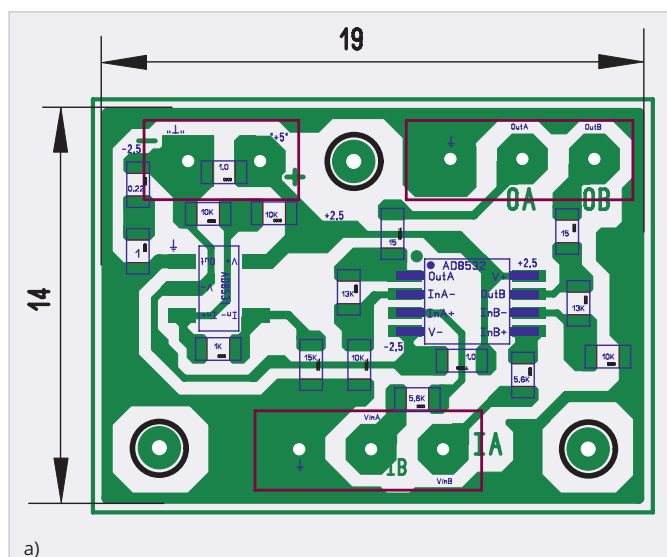


Рис. 2. Разводка (а) и внешний вид (б) платы устройства

даже как усилитель для наушников (Headphone Driver), что указано в его особенностях, описанных в справочном листке (Datasheet). Там же приведена схема двухканального усилителя для наушников (Figure 44. A Single-Supply, Stereo Headphone Driver), предназначенная для подключения наушников с сопротивлением 48 Ом. Однако эта схема, на взгляд автора, обладает двумя существенными недостатками. Во-первых, в этой схеме ОУ включены как обычные повторители напряжения, т.е. по амплитуде они сигнал не усиливают (у повторителя коэффициент усиления, как известно, равен 1), а усиливают только по току. Во-вторых, поскольку напряжение питания однополярное, ко входу повторителя дополнительно подключён делитель напряжения питания (пополам, т.е. в 2 раза), чтобы напряжение входного и выходного сигналов находилось в пределах напряжения питания. Для этого использованы разделительные конденсаторы как на входе (10 мкФ), так и на выходе (270 мкФ). Если в качестве входных использовать недорогие керамические конденсаторы такой ёмкости, то в качестве выходных необходимо либо использовать достаточно дорогие и габаритные электролитические конденсаторы с низким импедансом (Low Imp) стоимостью 70–100 руб., либо (что существенно лучше) ещё более габаритные и дорогие неполярные аудиоконденсаторы по цене 250–300 руб. за штуку, а поскольку их два, то общая стоимость выходных конденсаторов составит 500–600 руб., что непозволительно дорого. В приве-

дённой далее схеме автора оба этих недостатка сняты, а качество усилителя получилось настолько высоким, что автор этого даже не ожидал.

Принципиальная схема усилителя

Схема устройства (рис. 1) достаточно проста. Она состоит из преобразователя однополярного питания в двухполярное (или формирователя искусственной «земли») на базе одноканального ОУ AD8531 (DA1). Схему такого формирователя автор «подсмотрел» в справочном листке (Datasheet) на мощный ОУ LM675 (Figure 3. Generating a Split Supply From a Single Supply). Этой схемой как на LM675, так и на AD8531 (рис. 1) автор уже неоднократно пользовался, и она показала идеальную работу. Как видно из рис. 1, схема состоит из делителя напряжения питания (в 2 раза) с помощью резисторов R1p и R2p, усилителя в 15 раз на ОУ и резисторах R4p и R3p (коэффициент усиления равен: $K = R4p/R3p = 15K/1K = 15$) и RC-цепочки R5p-C1p, устраняющей самовозбуждение

ОУ. Конденсатор C2p блокировочный и положен для штатной работы этого ОУ. Выходное напряжение ОУ как раз и является искусственной «землей» – перевёрнутая «ёлочка». Если напряжение питания ОУ DA1 составляет, например, 3,6 В, то относительно этой искусственной «земли» образуются два напряжения: +1,8 В и –1,8 В. Этими двумя напряжениями питается двоярный ОУ AD8532 (DA2), на базе которого сконструированы два идентичных неинвертирующих усилителя (на DA2.1 и DA2.2) с коэффициентом усиления, равным: $K = R2/R1 + 1$ (или $R6/R5 + 1$) = $13K/10K + 1 = 1,3 + 1 = 2,3$. Резисторы R4 и R8 (как и в Datasheet на AD8532) ограничивают выходной ток ОУ, если выходы случайно будут замкнуты на «землю». Конденсатор C1 блокировочный и положен для штатной работы ОУ.

Питается усилитель от аккумулятора 18650 (BAT1 в левом нижнем углу рис. 1) ёмкостью 3 А·ч. Для зарядки аккумулятора используется зарядное устройство (см. далее), кото-

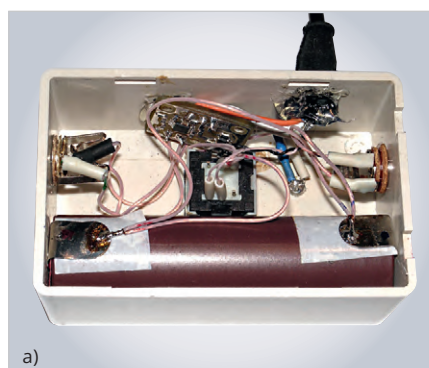


Рис. 3. Усилитель в корпусе: а) со снятой крышкой, б) общий вид в сборе

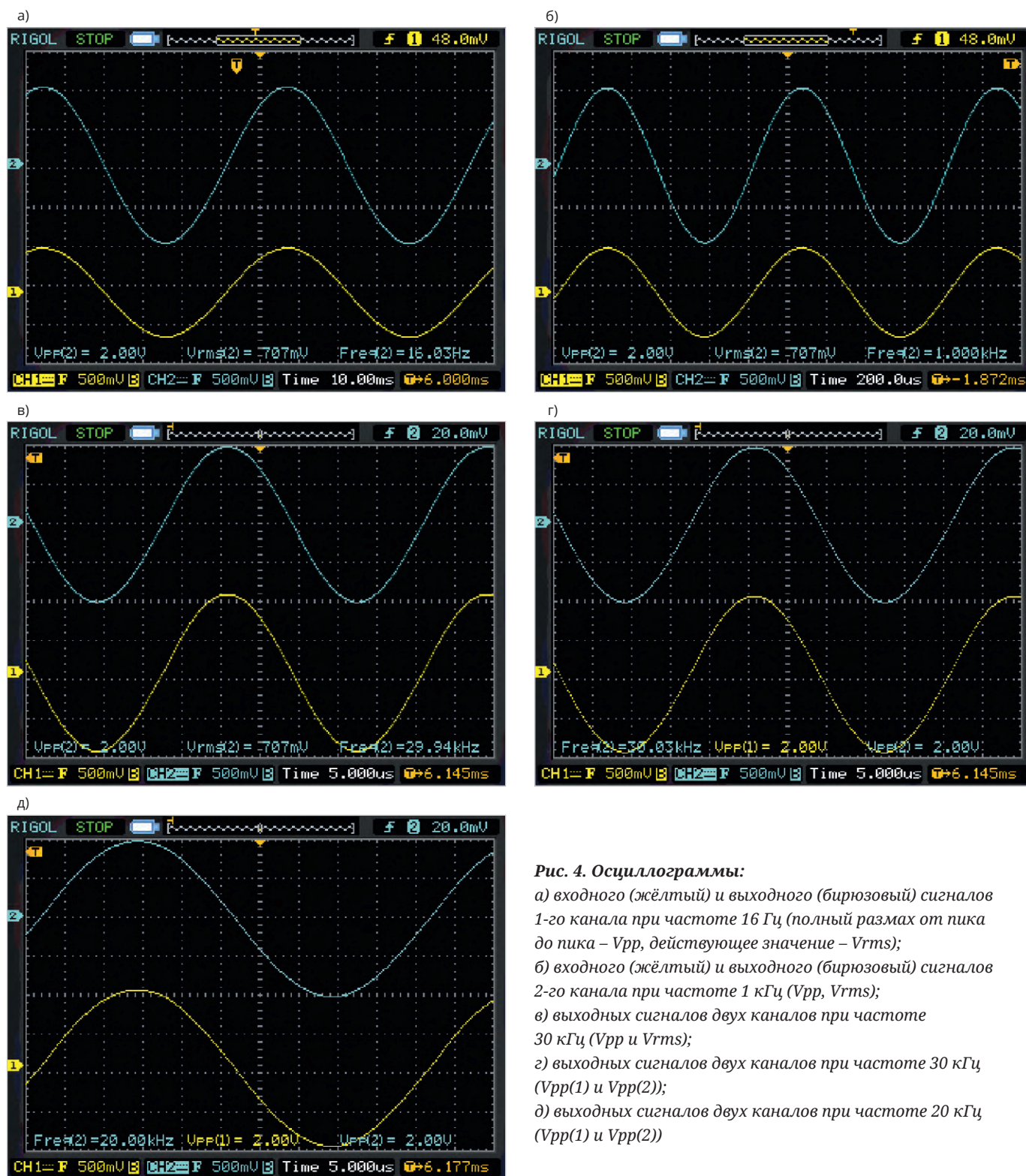


Рис. 4. Осциллограммы:

- а) входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов 1-го канала при частоте 16 Гц (полный размах от пика до пика – V_{pp} , действующее значение – V_{rms});
- б) входного (жёлтый) и выходного (бирюзовый) сигналов 2-го канала при частоте 1 кГц (V_{pp} , V_{rms});
- в) выходных сигналов двух каналов при частоте 30 кГц (V_{pp} и V_{rms});
- г) выходных сигналов двух каналов при частоте 30 кГц ($V_{pp}(1)$ и $V_{pp}(2)$);
- д) выходных сигналов двух каналов при частоте 20 кГц ($V_{pp}(1)$ и $V_{pp}(2)$)

рое подключается кабелем к гнездовому аудиоразъёму 2,5 моно (Хзар). Для подключения напряжения аккумулятора к усилителю используется кнопка с фиксацией PSM2 (П1). Подключение усилителя к телефону осуществляется кабелем, на конце которого расположен штекерный разъём 3,5 стерео (Х2), а подключение наушников к усилителю – штекером на кабеле наушников, который вставляется в гнездовой разъём 3,5 стерео (Х1), расположенный на корпусе усилителя. Для

индикации включённого состояния усилителя служит синий светодиод (LED1), который со своим токоограничительным резистором (Rled) подключается к напряжению питания (+3,6 В и «земля»). И последнее, что следует упомянуть о схеме. Отсутствие разделительных конденсаторов позволяет усиливать даже постоянное напряжение или, другими словами, минимальная частота частотного диапазона схемы составляет 0 Гц. Что касается максимальной частоты, то её значение, как

будет видно из дальнейшего изложения, составляет 30 кГц (и даже больше) – см. далее. Как видно из рис. 1, схема достаточно проста и поэтому легко разводится (см. далее).

Разводка платы усилителя и её внешний вид

Разводка платы (рис. 2а) сделана автором с помощью программы SprintLayout 6.0. Файл разводки в формате *.lay6 приведён в дополнительных материалах на сайте журнала.

В связи с простотой схемы разводка сделана односторонней (рис. 2а), а сама плата (рис. 2б) изготовлена на стеклотекстолите толщиной 1,5 мм с односторонним медным покрытием размером 14×19 мм.

Устройство усилителя

Прибор расположен в пластиковом корпусе марки 20-33 размером 70×45×28 мм с защёлкивающейся крышкой (рис. 3а, б). Аккумулятор приклеен к внутренней поверхности корпуса тонкой лентой с двусторонним липким слоем. Выходной гнездовой разъём 3,5 стерео и разъём для зарядки аккумулятора – гнездовой разъём 2,5 моно – прикручены гайками к боковым поверхностям корпуса через соответствующие отверстия. Входной разъём (штекер 3,5 стерео) укреплен на одном конце кабеля, а провода второго его конца непосредственно припаяны к соответствующим контактным площадкам платы. Сама плата приклеена к боковой внутренней поверхности корпуса термоклеем.

Этим же клеем укреплены провода кабеля (пропущенного через резиновую втулку) со входным разъёмом. Для кнопки на лицевой поверхности корпуса прорезано прямоугольное окно, в которое она вставлена с натягом (рис. 3а, б). Светодиод вставлен в отверстие, просверленное на лицевой поверхности корпуса (рис. 3а, б). Стоимость комплектующих устройства не более 600–700 руб., в которую включена стоимость корпуса (60 руб.), аккумулятора (200 руб.), разъёмов (3 шт. по 60–80 руб.), кнопки (60 руб.), а также ОУ (60 руб. и 100 руб. – см. выше).

Результаты работы прибора

Для проверки синусоидальности выходных сигналов усилителя к его входам был подключён генератор синусоидальных сигналов, описанный автором в [1], а к выходам усилителя и входу генератора (в разных комбинациях) был подключён двухканальный цифровой осциллограф, на котором была выбрана опция с открытыми входами (DC). Оба выхода усилителя были нагружены постоянными резисторами по 50 Ом. Полученные осциллограммы (рис. 4) показывают, что при частотах 16 Гц, 1 кГц и 30 кГц выходные сигналы строго синусоидальны, о чём свидетельствуют измеренные осциллографом амплитуда сигнала

в 1 В (она равна половине размаха – $V_{pp} = 2 \text{ В}$, т.е. 1 В) и соответствующее ей действующее значение ($V_{rms} = 0,707 \text{ В}$). Как известно, если сигнал синусоидален, то действующее значение $V_{rms} = V_{amp}/\sqrt{2} \approx 0,707 \times V_{amp}$, где V_{amp} – амплитудное значение сигнала. Если подсчитать относительную ошибку V_{rms} , учитывая, что $1/\sqrt{2} \approx 0,707106$, то можно получить: $(0,707106 - 0,707)/0,707106 \times 100\% \approx 0,015\%$. В справочном листке на AD8532 приведено значение коэффициента нелинейных искажений + шум (КНИ+Ш – THD +N) для схемы усилителя для наушников (Figure 44), которое составляет менее 0,3%. Однако, судя по приведённым осциллограммам и расчёте относительной ошибки для V_{rms} , у схемы автора КНИ+Ш на порядок меньше. Кроме того, поскольку схема рис. 1 может усиливать даже постоянное напряжение, т.е. минимальная частота составляет 0 Гц, схема легко пропускает самые низкие частоты (например, 16 Гц – рис. 4а).

Зарядка аккумулятора

К разъёму Хзар (рис. 1) ответным разъёмом (штекером 2,5 моно) подключается кабель, второй конец которого подключается к плате зарядного устройства на базе специализированной микросхемы TC4056A, оборудованной разъёмом USB Micro для подключения к ней устройства для зарядки телефона с выходным напряжением 5 В. Здесь следует заметить, что на плате с TC4056A по умолчанию установлено максимальное значение зарядного тока в 1 А. Такой ток обеспечивают далеко не все зарядные устройства для телефона. Кроме того, при токе 1 А плата с TC4056A достаточно сильно нагревается и может выйти из строя от перегрева. Поэтому, если использовать зарядку для телефона (или, например, для зарядки аккумуляторов IQOS), обеспечивающую ток 1 А (или более), то плату необходимо установить на

радиатор. Для этого автор использовал миниатюрный пластиковый корпус размером 45×30×16 мм, состоящий из двух половин, которые защёлкиваются между собой (рис. 5). В одну часть корпуса в качестве радиатора установлена медная пластина толщиной 2 мм и размером несколько большим, чем сама плата. Эта пластина прикручена к корпусу четырьмя винтами M2, для чего в ней просверлены отверстия и нарезана соответствующая резьба. Чтобы пластина не касалась корпуса, между ними в качестве толстых шайб установлены 4 гайки M3. Плата приклеена к пластине гибкой термопрокладкой с двусторонним липким слоем. К выходным контактам платы одним концом припаян двухпроводный кабель, который дополнительно укреплен каплей термоклея, а на другой его конец припаян аудиоразъём – штекер моно 2,5 мм, который подключается к ответному разъёму прибора (Хзар, рис. 1). Для разъёма USB Micro в верхней половине корпуса прорезано небольшое окно. Для доступа воздуха внутрь корпуса в обеих его половинах просверлены по 4 отверстия. Кроме того, для того чтобы наблюдать за процессом зарядки, на плате расположены два светодиода, красного и синего цветов, а в корпусе просверлены ещё 2 отверстия как раз над этими светодиодами, чтобы их можно было увидеть. Когда идёт процесс зарядки, горит красный светодиод (рис. 5а). По окончании зарядки красный светодиод гаснет и зажигается синий (рис. 5б). Зарядку аккумулятора необходимо производить при выключенном приборе.

Если же зарядка для телефона обеспечивает ток не более 0,5 А, то радиатор не нужен, так как в этом случае нагрев платы небольшой; правда, время зарядки аккумулятора будет существенно больше.

Если, например, активное сопротивление наушников составляет 50 Ом,

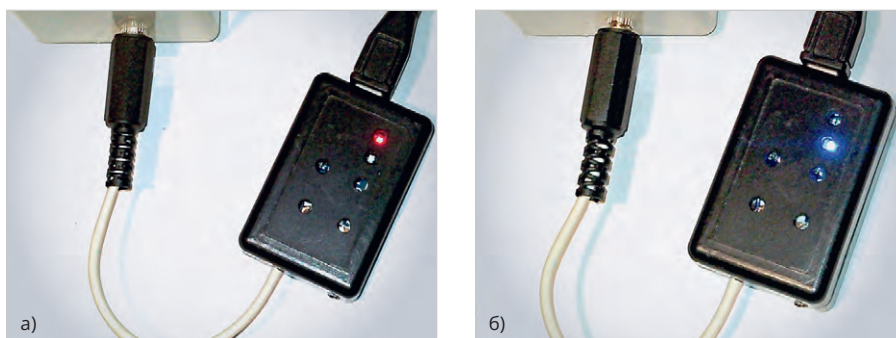


Рис. 5. Процесс зарядки аккумулятора (а) и окончание зарядки (б)



Рис. 6. Общий вид работающего усилителя, подключенного к телефону и наушникам при воспроизведении фонограммы («Something»)

то с учётом R4 и R8 по 15 Ом каждое (рис. 1) полное активное сопротивление нагрузки составит: $50 \text{ Ом} + 15 \text{ Ом} = 65 \text{ Ом}$. При максимальной амплитуде выходного сигнала в 1 В выходной ток составит: $1 \text{ В} / 65 \text{ Ом} \approx 15 \text{ мА}$, а для двух каналов около 30 мА.

Потребление тока микросхем и светодиода мало, и его можно не принимать в расчёт. Учитывая, что ёмкость аккумулятора составляет 3 А·ч, или 3000 мА·ч, время непрерывной работы прибора при полностью заряженном аккумуляторе составит: $3000 \text{ мА·ч} / 30 \text{ мА} \approx 100$ часов. О степени заряженности аккумулятора можно следить по яркости свечения светодиода прибора (рис. 3б). Если он светится недостаточно ярко, аккумулятор следует подзарядить.

Работа прибора с телефоном и наушниками

Напоследок автором приведена фотография усилителя, подключенного к телефону и наушникам при воспроизведении фонограммы (рис. 6). Автор прослушал несколько фонограмм и убедился в высоком качестве их звучания.

Заключение

Применение относительно мощных и скоростных ОУ AD8531 и AD8532 позволило сконструировать компактный недорогой усилитель для наушников высокого качества. Питание усилителя от аккумулятора 18650 сделало возможным его непрерывную работу до 100 часов. Кроме того, автономность усилителя позволяет брать его с собой и прослушивать фонограммы с телефона в дороге. Автор рекомендует это устройство для самостоятельного изготовления.

Литература

1. Кузьминов А. Генератор гармонических колебаний звукового диапазона на базе синтезатора частоты AD9837B, микроконтроллера EFM8SB10 и LCD Nokia-5110 с батарейным питанием // Современная электроника. 2023. № 6.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Первый в мире биологический кубит: учёные сконструировали квантовый бит на основе живого белка

Учёные из Чикагского университета и их коллеги создали первый оптически управляемый спиновый кубит на основе генетически кодируемого флуоресцентного белка EYFP – вместо традиционных твёрдых материалов, таких как алмаз или полупроводники. В этом белке им удалось сформировать двухуровневую квантовую систему, использующую долгоживущее триплетное состояние молекулы, где возможно управление спином электронов.

В работе применялся усовершенствованный вариант белка EYFP, широко используемого в клеточной биологии в качестве безопасной и яркой метки. Инициализация кубита выполнялась коротким синим лазерным импульсом, переводящим белок в возбуждённое синглетное состояние, после чего часть молекул переходила в триплетное состояние с определённой ориентацией спина.

Считывание информации производилось с помощью инфракрасного импульса (912 нм), который возвращал систему из триплетного состояния в основное. При этом возникал сигнал задержанной флуоресценции, чётко отделяемый по времени и интенсивности от фонового свечения, что позволяло точно определять спиновое состояние.

Управление спином осуществлялось последовательностью микроволновых сигна-

лов, меняющих конфигурацию состояния. Это подтвердило возможность контролируемого управления и считывания квантового состояния в белковой среде.

В экспериментах при температуре 80 К удалось достичь контраста сигнала между спиновыми уровнями до 20% по одному направлению и 10% – по другому. Время когерентности кубита, в течение которого сохраняется квантовая информация, достигло 16 микросекунд – в 15 раз больше, чем при базовых схемах управления. Время релаксации T1 составило 141 микросекунду. Эти результаты демонстрируют стабильность белкового кубита для практических квантовых операций.

Параметры расщепления спиновых уровней ($D = 2,356 \text{ ГГц}$, $E = 0,458 \text{ ГГц}$), измеренные методом ODMR-спектроскопии, совпали с результатами численного моделирования и характеризуют энергетическую структуру системы.

Важным достижением стала демонстрация работы кубита в биологической среде: в клетках человека (линия HEK 293T) и бактериях E. coli, в том числе при комнатной температуре. В клетках HEK с концентрацией EYFP около 11 мкМ сигналы магнитного резонанса регистрировались с контрастом до 8% даже на фоне сильной автофлуоресценции, что открывает возможности для диагностики in vivo.

Основные текущие ограничения технологии – чувствительность и количество регистрируемых фотонов на молекулу – пока



уступают параметрам алмазных сенсоров на NV-центрах. Однако ключевое преимущество белковых кубитов – возможность генетического внедрения в целевые клетки и точного нацеливания на конкретные биомолекулы.

Перспективы развития включают повышение яркости белка, усовершенствование оптических систем, увеличение числа детектируемых фотонов и оптимизацию белковой структуры методами направленной эволюции.

Впервые показана возможность использования генетически кодируемого белка в качестве полнофункционального кубита, управляемого светом непосредственно в живой клетке. Технология открывает путь к созданию наносенсоров для картирования магнитных и электрических полей на молекулярном уровне in vivo, что может революционизировать биофизику и биомедицинскую диагностику.



Примеры измерения импульсной компоненты электромагнитного поля ОНЧ-диапазона на фоне сейсмической активности

Алексей Галахов

В статье приводятся экспериментальные данные импульсной компоненты естественного электромагнитного поля ОНЧ-диапазона (И.К. Э-М. П.), зарегистрированного на авроральной обсерватории ПГИ Баренцбург (78,08°, 14,2°; арх. Шпицберген), магнитограмм геомагнитного поля Земли, полученных на норвежской авроральной станции LYR TGO (78,20°, 15,82°; арх. Шпицберген), и сейсмические данные норвежской сети NORSAR.

В качестве примера приведены синхронные записи двух массивов 01-10.11.2019 и 01-10.11.2021 экспериментальных данных И.К. Э-М. П., магнитограмм земного поля, которые сопоставляются во времени с моментами начала землетрясений.

Высказано предположение, что рассматриваемые импульсные излучения, которые значительно (в 3–9 раз) превосходят по амплитуде поле атмосфериков, являются результатом сейсмических событий (пьезоэлектрический эффект).

В качестве приёмно-регистрирующей аппаратуры использованы два приёмника ОНЧ-диапазона (400...7500 Гц) со взаимно ортогональным расположением приёмных рамочных антенн и последовательный анализатор спектра импульсных сигналов. Аппаратура была разработана в ПГИ (г. Апатиты), выполнена на основе программируемых аналоговых (AN221E04) и цифровых (PIC18F452) интегральных микросхем. Данная структура построения аппаратуры дала возможность реализовать режим динамической реконфигурации ПАИС, что позволило в реальном времени менять функциональную схему устройства и его технические характеристики, тем самым получать высокую точность и стабильность результатов обработки исследуемых сигналов.

Работа, основанная на результатах обработки архивных экспериментальных данных импульсной компоненты электромагнитного поля (И.К. Э-М. П.), полученных на авроральной обсерватории ПГИ Баренцбург (78,08°, 14,2°; арх. Шпицберген), магнитограммах норвежской станции LYR TGO (78,20°, 15,82°; арх. Шпицберген) и календаря сейсмических событий норвежской сети NORSAR [<https://www.norsar.no/extranet/bulletins/>] для района с координатами (68±10°, 14±10°), является продолжением тематики изучения влияния гелиогеофизических факторов на амплитудно-частотные характеристики естественного электромагнитного поля ОНЧ-диапазона.

Многие авторы рассматривают грозовой генератор основным источником естественного шумового элек-

тромагнитного поля в широком диапазоне частот: поля атмосфериков [1]. Поле атмосфериков – это сигнал, формируемый спектром излучаемых молнией электромагнитных волн, который имеет интерференционный характер, обусловленный суперпозицией прямой волны, распространяющейся вдоль поверхности Земли, и волн, отражённых от ионосферы.

Спектральные характеристики поля атмосфериков (П.А.) позволяют получать информацию как о свойствах распространения радиоволн, входящих в их спектр, так и о свойствах среды распространения сигнала, какой является волновод Земля – ионосфера [2].

Если в предыдущих работах [8–12] были представлены экспериментальные данные характеристик поля атмосфериков, подтверждающие

зависимость влияния таких факторов, как: солнечная активность (корональные выбросы, широкополосное электромагнитное излучение), галактические космические лучи, вариации магнитного поля Земли на АЧХ П.А., то в данной статье приведены примеры регистрации импульсных излучений ОНЧ-диапазона, значительно превосходящих по амплитуде (в 3–9 раз) поле атмосфериков. В качестве показателя, характеризующего геофизическую активность среды в точке приёма сигналов, использованы магнитограммы магнитного поля Земли.

Аппаратура

Для оценки пространственной избирательности сигнала приём осуществлялся на два приёмника ОНЧ-диапазона (400...7500 Гц) с ортогональных направлений Нх–Ну на магнитные рамочные антенны, включённые по схеме с симметричным входом в режиме преобразователя тока в напряжение [3, 4].

В качестве регистратора сигнала использован последовательный анализатор спектра импульсного сигнала ОНЧ-диапазона 400...3600 Гц [5, 6, 7].

Аппаратура была разработана в ПГИ (г. Апатиты) и выполнена на основе программируемых аналоговых (Anadigm, AN221E04) и цифровых (PIC18F452) интегральных микросхем, что позволило получить высокие технические характеристики и использовать режим динамической реконфигурации ПАИС для изменения структурной схемы последовательного анализатора спектра [6, 7].

Выбор ПАИС Anadigm обусловлен его высокими техническими характеристиками:

- низкий уровень собственных шумов ($U_{\text{шн}} = 0,13 \text{ мкВ}/\sqrt{\text{Гц}}$);
- высокая точность обработки аналогового сигнала, где, в отличие от

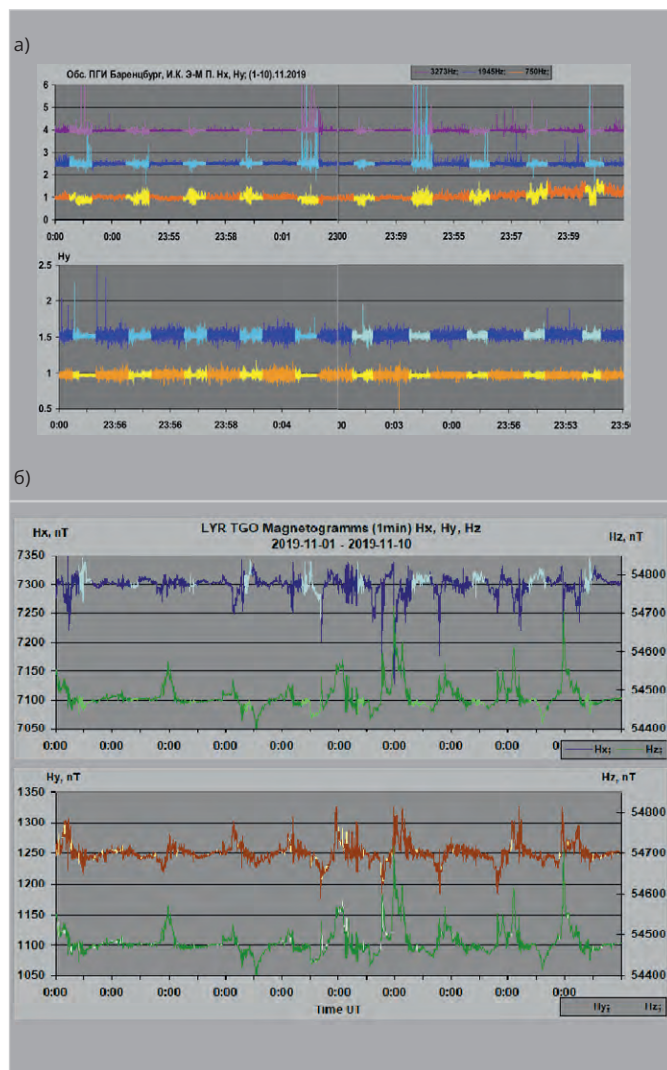


Рис. 1. Синхронная запись АЧХ И.К. Э-М. П. и магнитного поля Земли, период записи [01.11.2019–10.11.2019]: а) АЧХ И.К. Э-М. П. [Hx, Hy]; б) магнитограммы [Hx, Hy, Hz] поля Земли

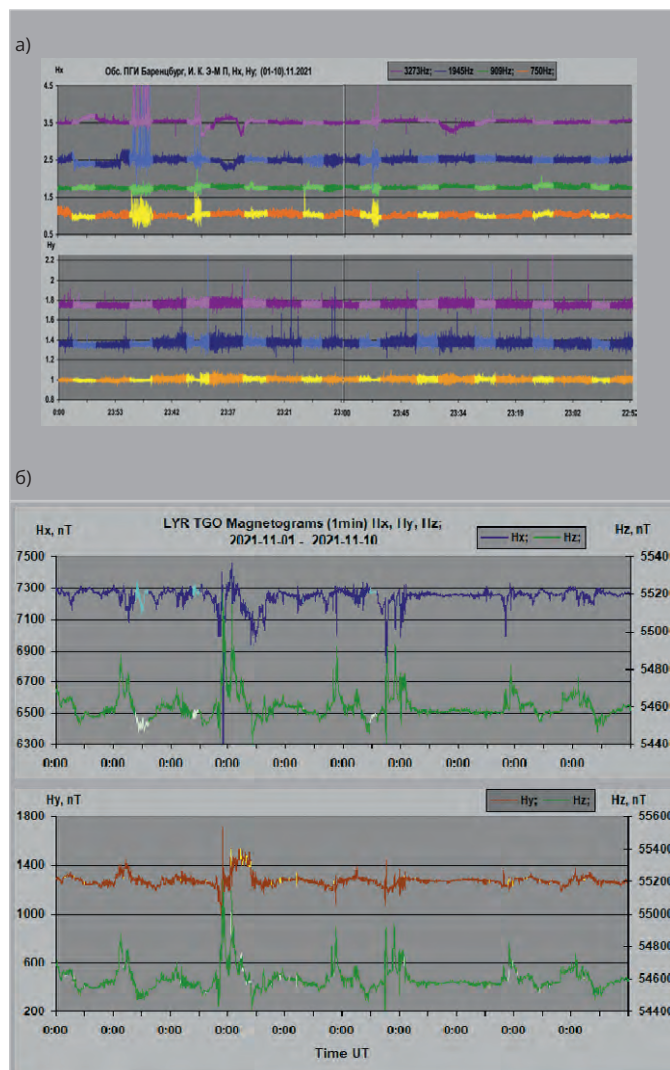


Рис. 2. Синхронная запись АЧХ И.К. Э-М. П. и магнитного поля Земли, период записи [01.11.2021–10.11.2021]: а) АЧХ И.К. Э-М. П. [Hx, Hy]; б) магнитограммы [Hx, Hy, Hz] поля Земли

цифровых систем, в дискретно-аналоговых системах сигнал дискретен только во времени;

- наличие на входах ПАИС anti-aliasing – фильтров, построенных на дискретных элементах, устраняет эффект паразитного наложения спектра.

Основные характеристики последовательного анализатора спектра:

- частотный диапазон анализа $\Delta F = 600...3600$ Гц;
- значения резонансных частот перестраиваемого фильтра в Гц: 613, 750, 909, 1050, 1204, 1350, 1500, 1650, 1795, 1945, 2091, 2200, 2386, 2682, 2978, 3273, 3601;
- полоса пропускания анализирующего фильтра выбрана с учётом средней длительности атмосфера (t ~ 5 мс) и составляет $2\Delta F_{0,7} = 200$ Гц;
- коэффициент прямоугольности АЧХ фильтра: $K_{0,1} = 2\Delta F_{0,7}/2\Delta F_{0,1} = 0,32$, $K_{0,01} = 2\Delta F_{0,7}/2\Delta F_{0,01} = 0,1$;

- длительность цикла последовательного анализа: $T_a = 25,5$ с.

Режим динамической реконфигурации, реализованный в ПАИС Anadigm, позволяет в реальном времени использовать подпрограмму «обнуления», чтобы уменьшить погрешность измерения амплитуды из-за эффекта «звона» фильтра при действии входного импульсного сигнала. В режиме «обнуления» после каждой записи спектральной составляющей сигнала входная цепь анализирующего фильтра отключается от входного сигнала и подключается к общей точке микросхемы на время $t \geq \tau_{CF}$ (τ_{CF} – постоянная времени фильтра).

Основные функции микроконтроллера PIC-18F452:

- формирование тактовой частоты 16 МГц для работы ПАИС;
- загрузка основной конфигурации (Primary Configurations) и динамической реконфигурации (Transition

Configurations) в ПАИС Anadigm через последовательный SPI-порт;

- преобразование аналогового сигнала в цифровую форму;
- реализация последовательного выходного порта USART для записи данных.

Экспериментальные данные

Для более точного сопоставления импульсных сигналов электромагнитного поля с вариациями магнитного поля Земли и началом сейсмических событий при анализе АЧХ и АВХ в работе приведены рисунки исследуемых процессов с различным временным разрешением.

На рис. 1, 2, 3, 4, 5, 6 представлены в различных временных масштабах синхронные записи АЧХ и АВХ импульсных компонент электромагнитного поля (И.К. Э-М. П.) ОНЧ-диапазона [613...3600 Гц, obs. ПГИ

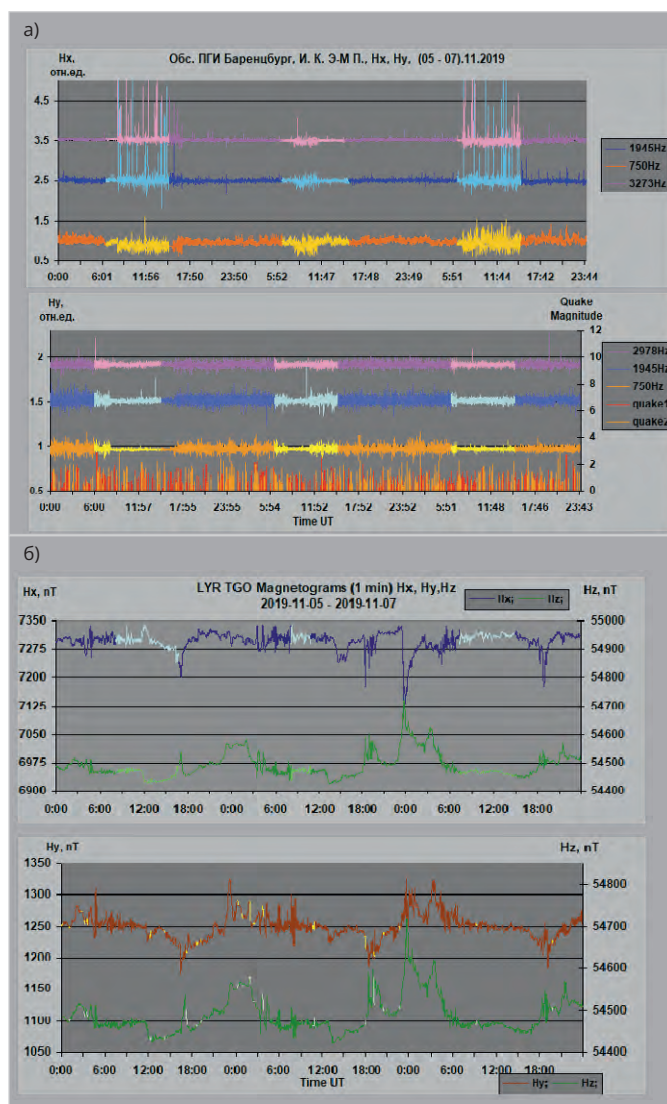


Рис. 3. Синхронная запись АЧХ И.К. Э-М. П., сейсмической активности и магнитного поля Земли, период записи [05.11.2019–07.11.2019]: а) АЧХ И.К. Э-М. П. [Hx, Hy] и сейсмическая активность (quake 1, quake 2); б) магнитограммы поля Земли [Hx, Hy, Hz]

Баренцбург; 78.08°, 14.2°], магнитограмм (1 мин) магнитного поля Земли (<https://space.fmi.fi/image/>), [обс. LYR TGO 78.20°, 15.82°] и календарь сейсмической активности (<https://www.norsar.no/extranet/>) района с географическими координатами (68±10°, 14±10°).

На рис. 1, 2 представлены два 10-суточных периода записи АЧХ И.К. Э-М. П. (Hx, Hy) и магнитного поля Земли (Hx, Hy, Hz): [01.11.2019–10.11.2019] и [01.11.2021–10.11.2021].

На рис. 3 представлен 3-суточный период записи АЧХ И.К. Э-М. П., сейсмической активности (quake 1, 2) и магнитного поля Земли: [05.11.2019–07.11.2019].

На рис. 4, 5 представлен суточный период записи АВХ И.К. Э-М. П. и сейсмической активности (quake 1, 2): [05.11.2019].

На рис. 6 приведены абсолютные значения импульсной компоненты электромагнитного поля.

Светлые оттенки участков приведённых графиков АЧХ И.К. Э-М. П. и компонент магнитного поля Земли отображают временные участки:

- когда область наблюдений И.К. Э-М. П. (D-слой нижней ионосферы Земли, $h < 100$ км) освещена Солнцем (рис. 1а, 2а, 3а);
- моменты наблюдений импульсных излучений э-м. поля (рис. 1б, 2б, 3б).

Календарь архивных сейсмических событий **quake 1, 2**, обозначенный различными цветовыми оттенками (рис. 3а, 4б, 4г), относится к районам, имеющим следующие географические координаты:

1. Quake 1 [(68...85)°, (10...20)°];
2. Quake 2 [(68...85)°, (05...25)°].

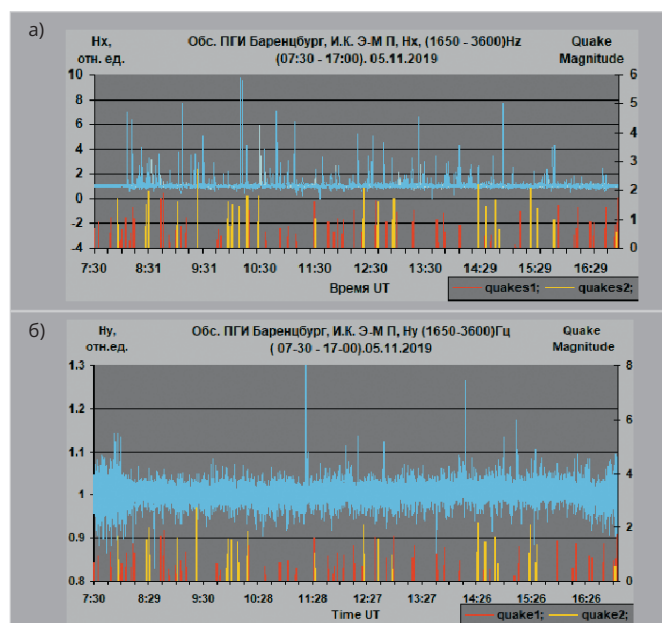


Рис. 5. Синхронная запись АВХ пьезоэлектромагнитного импульса П-Э-М.И. и сейсмической активности, период записи [(07:30–17:00) 05.11.2019]: а) синхронная запись АВХ П-Э-М.И. [Hx] и сейсмической активности (quakes 1, 2); б) синхронная запись АВХ П-Э-М.И. [Hy] и сейсмической активности (quakes 1, 2)

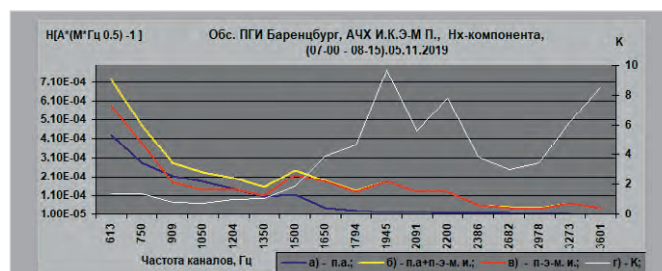


Рис. 6. АЧХ импульсной компоненты электромагнитного поля [Hx], $\Delta F = 613...3600$ Гц, период записи [(07:00–08:15) 05.11.2019]: а) поле атмосфериков; б) суперпозиция поля атмосфериков и пьезоэлектромагнитного импульса; в) пьезоэлектромагнитный импульс; г) $K = \text{П-Э-М.М./П.А.}$

Первичный анализ экспериментальных данных И.К. Э-М. П. за указанные периоды времени позволяет сделать ряд предварительных выводов.

1. Условия регистраций импульсных излучений для компонент Hx и Hy различны.

Компонента Hx:

- нижняя ионосфера освещена Солнцем (рис. 1а, 2а, 3а);
- значения компонент магнитного поля Земли $H_z < 54\,475$ нТл и $H_x < 7350$ нТл (рис. 1б, 2б, 3б).

Компонента Hy:

- значения компонент магнитного поля Земли $H_z < 55\,000$ нТл и $H_y < 1400$ нТл (рис. 1б, 2б, 3б).
2. Амплитуда пьезоэлектромагнитного импульса значительно превышает амплитуду поля атмосфериков (в 2–9 раз), коэффициент отношений ампли-

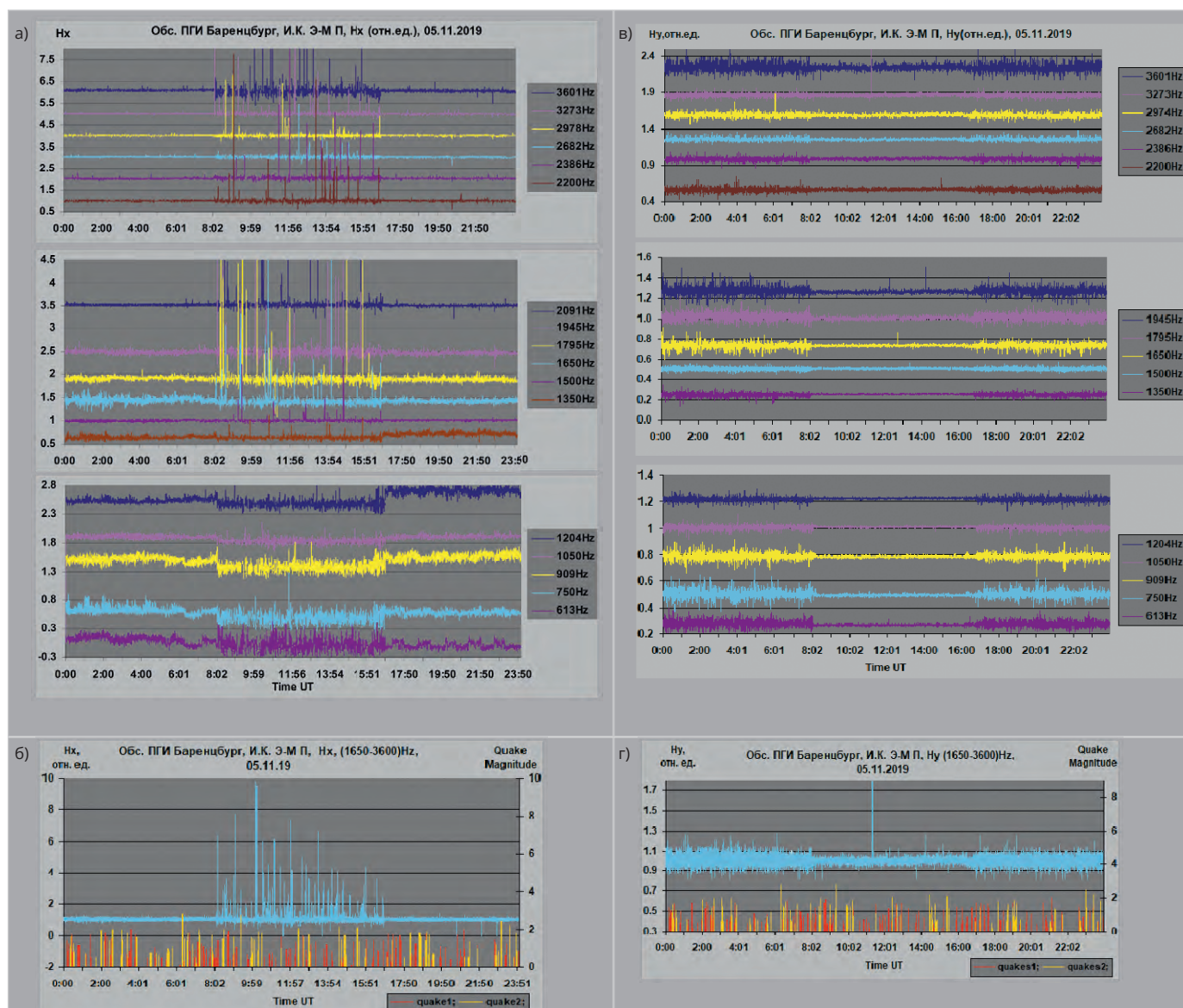


Рис. 4. Синхронная запись АЧХ И.К. Э-М. П. и сейсмической активности, период записи 05.11.2019: а) АЧХ И.К. Э-М. П. [Hx]; б) синхронная запись АВХ И.К. Э-М. П. [Hx] и сейсмической активности (quakes 1, 2); в) синхронная запись АВХ И.К. Э-М. П. [Hy] и сейсмической активности (quakes 1, 2)

туд этих излучений носит частотно-зависимый характер (рис. 6г). Абсолютные значения импульсной компоненты электромагнитного поля для промежутка времени записи [(07:00–08:15) 05.11.2019] приведены на рис. 6, где: а) поле атмосфериков [07:00]; б) суперпозиция поля атмосфериков и пьезоэлектромагнитного импульса [08:15]; в) пьезоэлектромагнитный импульс.

Амплитуда пьезоэлектромагнитного импульса для каждой частоты анализатора спектра была определена по формуле:

$$П\text{-}Э\text{-}М. \text{ И.} = \sqrt{(И.К. \text{ Э-М. П.})^2 - (П. \text{ А.})^2}.$$

3. Диапазон волн пьезоэлектромагнитного импульса включает в себя диапазон как поверхностных, так и пространственных волн волновода земля–ионосфера.

4. Временные характеристики между сейсмическими событиями, зарегистрированными станциями норвежской сети Norsar [https://www.norsar.no/extranet/bulletins/], и пьезоэлектромагнитными импульсами можно оценить по АЧХ импульсной компоненты электромагнитного поля (рис. 4б, 4г, 5а, 5б).

Хочется надеяться, что приведённые экспериментальные данные И.К. Э-М. П. заинтересуют исследователей, изучающих физические процессы, протекающие в нижней ионосфере Земли, и сейсмологов.

Литература

1. Ремизов Л.Т. Естественные радиопомехи. М.: Наука, 1985. С. 34.
2. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионо-

сфера. М.: Изд-во «Наука», 1972. С. 563.

3. Галахов А.А., Ахметов О.И. Комплекс аппаратуры для регистрации импульсной компоненты электромагнитного поля очень низкой частоты // Приборы и техника эксперимента. 2011. № 3. С. 136–142.
4. Галахов А.А., Ахметов О.И., Кириллов В.И. Регистрация ортогональных магнитных компонент импульсной составляющей электромагнитного поля ИНЧ/ОНЧ-диапазона на архипелаге Шпицберген // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 6. С. 69–73.
5. Галахов А.А., Ахметов О.И., Кириллов В.И. Аналоговый анализатор спектра атмосфериков КНЧ/ОНЧ-диапазонов на программируемых интегральных схемах // Приборы и

- техника эксперимента. 2015. № 1. С. 146–150.
6. Галахов А., Косолапенко В., Ларченко А., Пильгаев С. Анализатор спектра поля атмосфериков на реконфигурируемых ПАИС Anadigm // Современная электроника. 2019. № 7. С. 62–66.
7. Галахов А.А., Ахметов О.И., Кириллов В.И. Особенности применения анализатора спектра атмосфериков в КНЧ/ОНЧ-диапазонах для мониторинга состояния волновода земля-ионосфера // Приборы и техника эксперимента. 2016. № 3. С. 109–113.
8. Галахов А.А., Ахметов О.И. Поперечный резонанс в высокоширотной части волновода земля-ионосфера во время солнечного затмения 20.03.2015 // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 5. С. 664–669.
9. Галахов А. Анализатор спектра поля атмосфериков – инструмент изучения гелиогеофизической обстановки // Современная электроника. 2020. № 8. С. 30–34.
10. Галахов А. Влияние вспышки на Солнце на АЧХ поля атмосфериков (экспериментальные данные) // Современная электроника. 2021. № 6. С. 64–65.
11. Галахов А., Галкин А. Синхронная запись АЧХ поля атмосфериков на разнесённых по широте авроральных обсерваториях (экспериментальные данные) // Современная электроника. 2023. № 2. С. 60–63.
12. Галахов А. Поле атмосфериков на фоне сейсмической активности при различной геофизической обстановке (экспериментальные данные) // Современная электроника. 2024. № 5. С. 40–45.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Утверждён бюджет на разработку системы управления полётами дронов в едином воздушном пространстве

Росавиация согласовала финансирование первого этапа создания единой цифровой платформы для организации воздушного движения (ЕС ОрВД), которая будет учитывать как пилотируемые, так и беспилотные воздушные суда. На эти цели до конца 2027 года планируется выделить около 10,4 млрд рублей. Соответствующая информация содержится в письме руководителя Росавиации Дмитрия Ядрова, направленном в Минтранс, Минпромторг и вице-премьеру Виталию Савельеву 23 июня 2025 года. Копия документа имеется в распоряжении «Ведомостей», его подлинность подтвердил источник, близкий к авиационным регуляторам.

Основой ЕС ОрВД станет Единая интегрированная система планирования использования воздушного пространства (ЕИС ПИВП). Разработка системы предусмотрена федеральным проектом «Развитие инфраструктуры БАС» в рамках соответствующего нацпроекта. Однако в версии нацпроекта, имевшейся у «Ведомостей» на конец 2024 года, на создание системы было заложено лишь 4 млрд рублей до 2030 года, при этом финансирование должно было начаться только с 2027 года.

Техническое задание на первый этап – создание ЕИС ПИВП – было согласовано с ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», АО «Концерн ВКО „Алмаз-Антей“» и Росавиацией без замечаний. Реализация проекта запланирована в два этапа: первый продлится с 2025 по 2027 год, второй – с 2028 по 2030 год. Во II квартале 2025 года планировалось заключить контракт между Госкорпорацией по ОрВД и «Алмаз-Антей» как единственным исполнителем работ.



«В настоящий момент идут работы по заключению контракта. В ближайшее время он будет заключён», – сообщил «Ведомостям» заместитель генерального директора «Алмаз-Антея» Дмитрий Савицкий. Представитель Росавиации подтвердил, что ведомство и Госкорпорация по ОрВД продолжают работу над созданием ЕИС ПИВП, которая будет сопряжена с централизованной интегрированной базой данных ЕС ОрВД. По его словам, техническое задание уже согласовано, а до конца III квартала планируется подписать контракт с «Алмаз-Антей». Новая система позволит обеспечить бесконфликтное планирование полетов беспилотных и пилотируемых воздушных судов в едином воздушном пространстве, что повысит безопасность и расширит сферы применения беспилотников.

Представитель Минпромторга перенаправил запрос «Ведомостей» в Минтранс. Ведомство и Госкорпорация по ОрВД пока не предоставили комментарии.

Ранее, в мае 2025 года, «Ведомости» сообщали о создании в восьми регионах инфраструктуры для контроля за беспилотниками. По результатам проведённых закупок генподрядчиком во всех случаях выступил «Алмаз-Антей», а общая сумма контрактов

составила 642 млн рублей. Регионы закупали решения для системы автоматического наблюдения за воздушным пространством, чтобы сделать дроны видимыми для пилотов и диспетчеров.

Эксперты отмечают, что основная сложность создания ЕИС ПИВП заключается не в разработке IT-системы, а в интеграции разнородных баз данных, протоколов и регламентов использования воздушного пространства. Это требует обеспечения высокой надёжности, резервирования и информационной безопасности. По мнению специалистов, выделенное финансирование соответствует масштабу задачи, однако к 2027 году может потребоваться дополнительное бюджетное обеспечение в связи с растущими требованиями к беспилотной авиации.

Создание региональной инфраструктуры для контроля БПЛА является капиталоемким процессом, включающим не только закупку оборудования, но и строительство опорных сетей, каналов связи и центров обработки данных. В рамках бюджета ЕИС ПИВП эти работы могут занять до 30–40% средств на первом этапе. При масштабировании на все регионы страны расходы значительно возрастут.



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

Виктор Алексеев

В статье рассмотрены основные этапы биографии и научное наследие выдающегося советского физика-теоретика, лауреата Нобелевской премии Игоря Евгеньевича Тамма. Особое внимание уделено его ключевым научным достижениям, оказавшим фундаментальное влияние на развитие современной электроники.

Рассмотренные в этой статье работы Игоря Евгеньевича Тамма демонстрируют исключительную научную ценность, ставя его в один ряд с такими выдающимися физиками, как Альберт Эйнштейн, Нильс Бор, Пол Дирак. Показано, как теоретические концепции, предложенные Таммом почти столетие назад, стали основой многих современных электронных технологий. Работа базируется на анализе оригинальных трудов учёного и демонстрирует актуальность его научных идей для развития квантовой электроники, фотоники и нанотехнологий.

Факты биографии

Со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма (1895–1971) – выдающегося российского физика-теоретика, академика АН СССР, лауреата Нобелевской премии по физике 1958 года – исполнилось 130 лет. Он также был удостоен других многочисленных советских и зарубежных званий и наград (рис. 1).

Игорь Евгеньевич Тамм родился 8 июля (26 июня по старому стилю) 1895 года во Владивостоке.

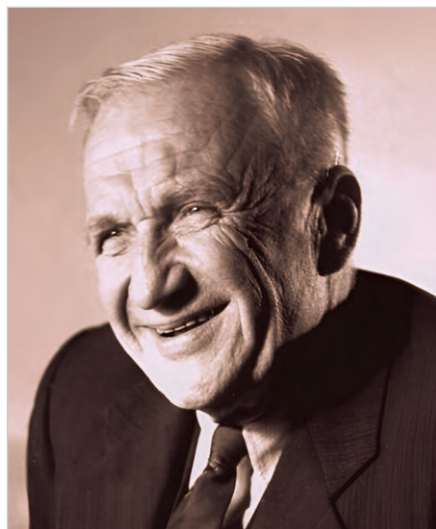


Рис. 1. Тамм Игорь Евгеньевич [1]

В 1898 году семья переехала в Елисаветград, где отец Евгений Фёдорович Тамм много лет проработал городским инженером [2].

После окончания Елисаветградской гимназии в 1913 году Игорь Тамм, в совершенстве владевший английским и немецким языками, поступил в Эдинбургский университет, где в течение года прослушал курс знаменитого английского учёного, основателя математической физики Эдмунда Уиттекера [3]. Общение с таким великим учёным дало Тамму понимание стандартов мировой науки. Этот год стал поворотным в биографии Тамма. Он увлёкся физикой, которой в дальнейшем посвятил всю свою жизнь. В связи с разразившейся Первой мировой войной Тамм возвращается в Россию, где продолжает обучение на физико-математическом факультете Московского университета.

Весной 1915 года Игорь Тамм добровольно отправился на фронт в качестве санитаря. В это время Тамм серьёзно увлёкся политикой. Он поддерживал умеренное крыло РСДРП и выступал за более умеренные методы борьбы за социализм, отдавая предпочтение парламентским и легаль-

ным методам. В 1917 году в качестве делегата от Елисаветградского исполкома Игорь Тамм участвовал в Первом Всероссийском съезде Советов рабочих и солдатских депутатов в Петрограде.

В 1918 году он защитил диплом по физике, посвящённый электродинамике и взаимодействию электромагнитного излучения с веществом и был оставлен при Московском университете для подготовки к профессорскому званию [4].

В конце 1919 года всех выпускников университета отправили преподавать в города, только что освобождённые Красной армией.

Игорь активно включился в процесс создания «нового справедливого социалистического общества». В мае 1919 года он был делегатом Всероссийского съезда по внешкольному обучению. Затем осенью 1919 года он переехал в Крым и стал преподавателем физики в новом Таврическом университете, организованном в 1918 году. Осенью 1920 года он переехал в Одессу и был принят на должность ассистента на кафедре физики Одесского политехнического института. Его руководителем стал выдающийся физик Леонид Исаакович Мандельштам (эффект комбинационного рассеяния света Мандельштама – Ландсберга) [5].

Именно в Одессе Игорь Тамм начал свою самостоятельную научную работу в области макроскопической электродинамики.

В 1922 году он вернулся в Москву, где в течение года читал лекции по физике в Коммунистическом университете имени Свердлова и в Институте инженеров путей сообщения. В 1923 году Тамм преподавал на факультете теоретической физики 2-го Московского университета.

В 1924 году Тамма пригласили на должность приват-доцента физического факультета МГУ. В 1925 году кафедру теоретической физики этого факультета возглавил Л.И. Мандельштам, который стал непосредственным научным руководителем Игоря Тамма.

В 1924 году Игорь Тамм познакомился с известным физиком Паулем Эренфестом, по рекомендации которого «Фонд Лоренца» в 1927 году предоставил молодому учёному Тамму стипендию для научной командировки в Германию и Нидерланды. Благодаря этому счастливому событию Игорь Тамм провёл около полугода в крупнейших физических лабораториях Нидерландов и Германии, где он работал вместе с ведущими физиками Европы: Кронигром, Бором, Шрёдингером, Дираком [6].

В 1930 году Тамм стал профессором и занял должность Леонида Исааковича Мандельштама в качестве заведующего кафедрой теоретической физики.

В 1931 году он побывал в командировках в Англии (Кембридж) и Германии. Прекрасно владея английским и немецким, Тамм имел возможность обсуждать последние открытия в физике непосредственно с их авторами [7].

В 1933 году Игорю Тамму без защиты, по совокупности работ, была присвоена степень доктора физико-математических наук. В этом же году он был избран членом-корреспондентом Академии наук СССР.

В 1934 Тамм стал заведующим сектором теоретической физики нового Физического института имени П.Н. Лебедева АН СССР (ФИАН) [8].

В 1946 году Игорь Тамм перешёл на работу в Московский механический институт (МИФИ в настоящее время), где возглавил кафедру теоретической ядерной физики. Он был первым заведующим этой кафедрой.

В эти годы И.Е. Тамм был привлечён к работам по созданию атомного оружия. Следует тем не менее подчеркнуть, что Тамм принимал лишь косвенное научно-консультативное участие в разработках первой советской атомной бомбы, которая была успешно испытана в 1949 году. Ключевую роль здесь играли другие учёные, такие, например, как И.В. Курчатов.

В том же году Тамм возвращается в МГУ на кафедру квантовой теории и электродинамики.

В 1950 году Тамм с группой сотрудников ФИАН, в которую вошли А.Д. Сахаров и В.Л. Гинзбург, был переведён в КБ-11 в Арзамас-16 (Саров) для работ по проекту термоядерного оружия. После успешного испытания первой советской водородной бомбы в 1953 году Игорь Евгеньевич Тамм стал академиком АН СССР по отделению физико-математических наук и получил Сталинскую премию. В 1954 году И.Е. Тамму было присвоено звание Героя Социалистического Труда с вручением ордена Ленина и золотой медали «Серп и Молот».

В начале 1954 года И.Е. Тамм вернулся в ФИАН, в котором работал до конца жизни.

Скончался И.Е. Тамм 12 апреля 1971 года, похоронен в Москве на Новодевичьем кладбище.

Более детальную информацию о биографии И.Е. Тамма можно найти в следующих статьях [9, 12].

Научное наследие Игоря Евгеньевича Тамма

Следует подчеркнуть, что И.Е. Тамм был прежде всего выдающимся физиком-теоретиком. Поэтому его труды в основном посвящены таким разделам теоретической физики, как: квантовая механика, классическая и квантовая электродинамика, теория твёрдого тела, теория элементарных частиц, квантовая оптика, проблемы термоядерного синтеза, другие прикладные задачи.

Хотя наибольшую известность ему принесла Нобелевская премия 1958 года за теоретическое объяснение эффекта Черенкова, его научное наследие выходит далеко за пределы этого открытия.

В данной статье рассмотрены только те направления работ Игоря Тамма, которые повлияли на развитие современной электроники.

Серьёзно заниматься научными поисками Игорь Тамм начал в 1922 году после встречи с Л.И. Мандельштамом, который рекомендовал ему заняться крайне популярными тогда вопросами электродинамики в приложениях общей теории относительности Эйнштейна (ОТО). Для понимания вопросов, которыми тогда занимался Тамм, нужно сказать бук-

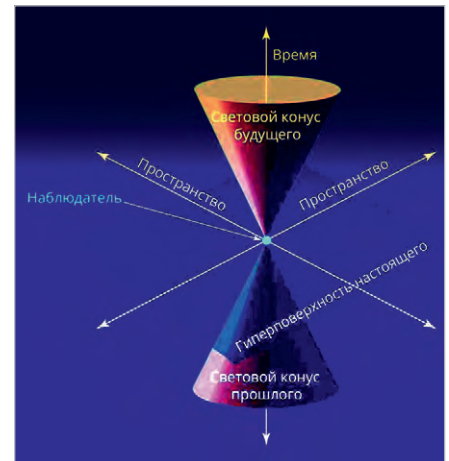


Рис. 2. Пространство Минковского рассматривает три координаты евклидова пространства и четвёртую как $C \times T$, где C – скорость света, T – время события

вально несколько слов о терминах, которые употребляются в его статьях.

Прежде всего, следует отметить Германа Минковского, одного из столпов немецкой школы математики и физики. Он был одним из учителей молодого Альберта Эйнштейна. Наиболее известен тем, что вслед за А. Пуанкаре развил идею объединения трёх измерений пространства и времени в одно четырёхмерное псевдоевклидово пространство, получившее название «Пространство Минковского» – ПМ. Это позволило ему разработать четырёхмерный математический аппарат специальной теории относительности (СТО).

Не вдаваясь в сложные математические рассуждения, отметим, что в случае с ПМ каждому событию соответствует точка пространства, три координаты которой представляют собой декартовы координаты трёхмерного евклидова пространства, а четвёртая координата определяется как $C \times T$, где C – скорость света, а T – время события. В пространстве Минковского световой конус разделяет пространство-время на области прошлого и будущего относительно заданного события. Он образован изотропными векторами и служит для определения причинно-следственных связей. Световые конусы определяют границы, отделяющие моменты, которые могут повлиять на заданное событие в прошлом, от моментов, на которые может повлиять заданное событие в будущем (рис. 2).

Такой подход позволяет избежать противоречий между классической

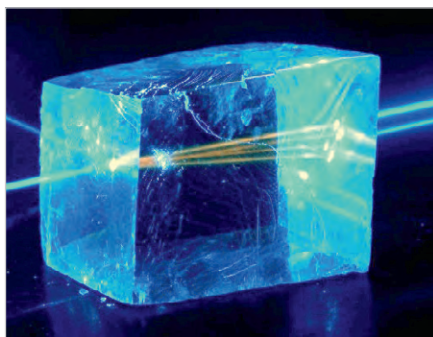


Рис. 3. В некоторых типах кристаллов существует эффект двойного лучепреломления

физикой и наблюдениями, связанными с относительной скоростью света.

В пространстве Минковского уравнения физических законов остаются неизменными (инвариантными) при преобразованиях Лоренца.

Исходные уравнения электродинамики движущихся сред, полученные Минковским, позволили получить полное описание электромагнитного поля в среде, движущейся равномерно и с произвольной скоростью.

Понятие ПМ дало возможность обосновать один из основных постулатов квантовой теории поля, гласящий, что пространство и время не являются независимыми величинами, а тесно связаны между собой, а их восприятие зависит от наблюдателя [13].

Первую статью на эту тему Игорь Тамм готовил почти два года (с 1922 по 1924 гг.). Статья «Электродинамика анизотропной среды в специальной теории относительности» была опубликована в старейшем российском научном периодическом издании «Журнал Русского физико-химического общества ЖРФХО», основанном в 1869 году [14].

В этой работе был дан вывод инвариантных уравнений электродинамики анизотропной среды. Фактически Игорь Тамм обобщил известные уравнения Минковского для случая движущейся анизотропной среды методом, предложенным Л.И. Мандельштамом. Для этого Тамм объединил описание электромагнитных свойств материала в единый математический объект: четырёхмерный тензор. Таким образом, электрическая (ϵ) и магнитная (μ) проницаемости были представлены не как скаляры в случае классической электродинамики, а как компоненты четырёхмерного тензора для релятивистского варианта. Это позволило получить точные уравнения для

любых скоростей движения, описывающие сложное поведение анизотропных материалов и автоматически учитывающие эффекты теории относительности Эйнштейна.

При выводе уравнений для случая анизотропных кристаллов (кроме моно- и триклинометрических) Игорь Тамм использовал упрощение, когда оси трёхмерных тензоров ϵ и μ совпадают между собой.

Кроме того, в статье был рассмотрен более общий случай для пространственного вращения исходных координатных осей, покоящихся относительно кристалла и параллельных его главным осям.

В целом эта работа Игоря Тамма дала способ теоретического описания электродинамики кристаллов и других анизотропных материалов в релятивистском контексте. Например, дальнейшие исследования показали, что в движущемся кристалле электрические и магнитные свойства могут смешиваться. При этом направления максимальной проводимости поворачиваются, что приводит к новым эффектам, которые не проявляются в неподвижном кристалле.

Данная работа Игоря Тамма стала одним из базовых методов теоретических описаний приложений релятивистской электродинамики сложных сред, что крайне важно для теории света в кристаллах, жидких кристаллах, а также для анализа различных анизотропных материалов.

Через год практически эта же статья с небольшими изменениями, но в соавторстве с Л.И. Мандельштамом, была опубликована в немецком журнале «Анналы математики» [15].

Работа получила широкую известность в мировом научном сообществе, и даже сам Альберт Эйнштейн дал ей высокую оценку.

Работы по квантовой электродинамике Тамм продолжил в Москве под руководством Мандельштама. В 1925 году была опубликована их совместная работа «Кристаллооптика теории относительности в связи с геометрией биквадратичной формы», в которой выведенные им инвариантные уравнения электродинамики анизотропной среды использовались для описания законов распространения света в кристаллах [16].

В обыденной жизни мы сталкиваемся с тем, что свет распространяется прямолинейно в одном направлении

по так называемым «нулевым линиям». Однако известно, что в некоторых типах кристаллов существует эффект, который получил название «двойное лучепреломление».

Это явление заключается в расщеплении проходящего света на два луча, распространяющихся по разным траекториям (рис. 3).

Причиной двойного лучепреломления является анизотропия, то есть зависимость показателя преломления от направления распространения в кристалле.

Анализируя полученные им ранее решения, Тамм обнаружил удивительную аналогию, заключающуюся в том, что уравнения для света в кристаллах математически похожи на уравнения распространения света в гравитационном поле Эйнштейна.

Тамм показал, что для объяснения этого явления нужна другая геометрия, отличная от Евклидовой. Используя пространство Минковского и описанные выше уравнения, Тамм предложил определять элемент длины в анизотропных средах биквадратичной формой в дифференциалах координат, а в вакууме и в изотропных средах в квадратичной форме. Таким образом, в анизотропных структурах следует использовать более общую геометрию биквадратичной формы вместо римановой геометрии квадратичной формы.

В натуральной (римановой) геометрии нормаль к лучевой поверхности совпадает с радиус-вектором, а нормаль к волновой поверхности совпадает с направлением потока энергии. Поэтому волна и луч описываются одним уравнением.

В случае неинвариантного описания контравариантные координаты требуют специальной интерпретации через волновые соотношения. Поэтому возникает различие между волной и лучом.

Важно то, что возникающая двойственность «волна-луч» не является фундаментальным свойством света, а возникает из-за выбора неинвариантной системы описания. В правильной геометрической формулировке (с инвариантным элементом длины) свет описывается единым образом.

В заключительной части статьи Тамм анализирует три фундаментальных тензора своей теории.

Для анизотропной среды:

- тензор s (IV ранга) описывает электромагнитные свойства среды;
- тензор h (IV ранга) определяет элемент длины ds ;
- тензор k (II ранга) обеспечивает связь между ко- и контравариантными представлениями.

В изотропных средах все три тензора s , h и k сводятся к одному тензору II ранга, аналогичному метрическому тензору g квадратичной геометрии.

Полученная Игорем Таммом формула для скорости луча точно совпадает с известными формулами кристаллооптики для магнитных кристаллов, что подтверждает правильность его подхода.

Результаты этой работы были использованы в дальнейшем для разработок таких приложений, как, например, гетерогенные транзисторные кристаллические структуры, оптические модуляторы, поляризационные устройства, а также другие компоненты оптоволоконной связи.

Свой преподавательский опыт Игорь Тамм обобщил в знаменитом фундаментальном курсе «Основы теории электричества», который был опубликован в 1929 году и впоследствии переиздавался более 10 раз на многих языках мира [17].

В предисловии к первому изданию учебника Тамм писал, что основной целью этого курса является объяснение физического смысла и содержания основных положений теории электричества. Нужно отметить, что Игорь Тамм великолепно владел высшей математикой. Тем не менее основная особенность методики преподавания Тамма заключалась в том, что понимание студентами физической сути явлений было важнее формального использования математического аппарата. Например, Тамм объяснял теорему Гаусса следующим образом. Электрические заряды создают воображаемые кривые в пространстве, которые показывают направление электрического поля. Их стали называть силовыми линиями. Положительные заряды являются источниками этих линий, а отрицательные – их стоками. Поток напряжённости электрического поля можно представить так: сколько линий вытекает из воображаемого мешочка, столько заряда в нём и содержится.

Последнее издание этого учебника, содержащее более шестисот страниц, используется в настоящее время во

многих университетах мира для изучения курса электродинамики.

Большинство наиболее значимых открытых научных работ И.Е. Тамма приходится на период с 1930 по 1939 годы.

Как физик-теоретик, Тамм старался дать объяснение наиболее интересным экспериментальным результатам, полученным физиками в разных лабораториях мира.

В письме, написанном в 1937 году своему другу Владимиру Фоку [18], Игорь Тамм выделяет некоторые собственные работы, которые он оценивал больше всего. Эти работы соответствуют таким основным направлениям исследований, как рассеяние света в твёрдых телах, взаимодействие свободных электронов с излучением, фотоэффект, связанные состояния электронов на поверхности кристаллов, термоэлектронная эмиссия, магнитный момент нейтрона, Черенковское излучение (ЧИ).

Статья И.Е. Тамма «О квантовой теории молекулярного рассеяния света в твёрдых телах» (1930) была опубликована в одном из наиболее авторитетных научных журналов того времени «Zeitschrift für Physik (Zs. f. Ph.)» [19]. В этой работе Тамм использовал появившуюся тогда теорию Дирака, описывающую поведение электрона с точки зрения релятивистской квантовой механики.

Он сопоставил теорию Дирака с формализмом квантования Гейзенберга – Паули и дал объяснение спинных свойств электрона. Основной идеей работы Игоря Тамма было квантово-механическое рассмотрение рассеяния излучения электронами, что имело крайне важное значение для подтверждения релятивистского волнового уравнения Дирака для электрона. Вычисленная Игорем Таммом в данной работе рассеивающая способность электрона значительно лучше соответствовала имевшимся экспериментальным данным, чем в классической теории.

В этой работе Тамм впервые ввёл понятие акустических квантов в твёрдом теле. Эти первые квазичастицы представляли собой квантованные вибрации ионов кристаллической решётки. В классической физике они соответствуют звуковым волнам в твёрдом теле. Тамм назвал их «квантами упругости – Elastischen Quanten» (современное

название – акустические кванты). Термин «фонон» позже предложил Я.И. Френкель в своей монографии «Волновая механика».

В отличие от упругого рассеяния, где энергия фотона не изменяется, при неупругом (комбинационном) взаимодействии энергия рассеянного фотона отличается от первоначальной благодаря влиянию собственных молекулярных колебаний кристаллической решётки.

В своей статье Тамм рассматривал квантованные звуковые волны аналогично фотонам, представляющим собой кванты световых волн.

Понятие фонона играет ключевую роль в современной теории конденсированных сред и позволяет представить слабо возбуждённое состояние системы взаимодействующих частиц в виде газа особых объектов на фоне её основного состояния.

Фактически Игорь Тамм разработал модель, в которой молекулы или атомы рассматриваются как квантовые осцилляторы, взаимодействующие с электромагнитным полем света. Это позволило описать рассеяние света как квантово-механический процесс, связанный с переходами между дискретными энергетическими уровнями.

Данная работа Игоря Тамма позволила создать теоретический фундамент эффекта неупругого рассеяния света в рамках квантового подхода, где свет и вещество рассматриваются как квантовые поля.

Предложенная Игорем Таммом теоретическая модель объясняла многие непонятные до того экспериментальные данные спектров рассеяния света, наблюдаемых в газах, жидкостях или твёрдых телах. Квантовая интерпретация рассеяния света, предложенная Таммом, стимулировала появление теории квантовой оптики, в которой свет рассматривается как поток фотонов, взаимодействующих с квантовыми системами. Это направление сегодня включает исследования квантовых компьютеров, квантовой криптографии и фотонных квантовых систем.

Кроме того, в этой работе были заложены основы молекулярной спектроскопии (Рамановская спектроскопия), которая в настоящее время широко используется во многих приложениях физики, химии, материаловедения, биологии и т.д.

Начиная со студенческих лет Тамм интересовался явлением фотоэффекта, открытым ещё в 1887 году Генрихом Герцем. В современной формулировке суть этого явления заключается в том, что свет или другое электромагнитное излучение, взаимодействуя с веществом, может передавать энергию фотонам электронам вещества. В результате возможны два варианта. Внешний фотоэффект характеризуется испусканием электронов веществом, а внутренний – перераспределением электронов внутри вещества.

В 1888–1890 годах Александр Столетов опубликовал шесть основополагающих работ на эту тему, в том числе и с формулировкой первого закона внешнего фотоэффекта.

В 1905 году Альберт Эйнштейн использовал квантовую теорию света, предложенную Максом Планком, для объяснения фотоэффекта. Именно за эти работы, а не за теорию относительности, он в 1921 году был удостоен Нобелевской премии.

В 1923 году Роберт Милликен получил Нобелевскую премию в области физики «за работы по определению элементарного электрического заряда и фотоэлектрического эффекта».

Вполне естественно, что Игорь Тамм интересовался вопросами, связанными с фотоэффектом. В 1931 году он вместе со своим аспирантом С. Шубиным разработал собственный вариант квантовой теории фотоэффекта в металлах [20]. Его статья начинается с вопроса: «Почему вообще возможно поглощение фотона свободным электроном в металле? По классическим законам сохранения энергии и импульса это должно быть запрещено!»

Для ответа на этот вопрос Тамм использовал квантово-механическое описание поведения электронов на границе металл-вакуум, что было новаторским подходом для 1931 года. Он нашёл решение уравнения Шрёдингера с учётом реальной структуры металла. В отличие от ранее использованных моделей, Тамм и Шубин учли такие важные факторы, как периодический потенциал кристаллической решётки, столкновения электронов с решёткой, влияние поверхностных состояний.

Крайне важным было доказательство того, что в первом варианте фотоэффекта свет (фотоны) передаёт

свою энергию электронам, которые «туннелируют» через потенциальный барьер в металле и таким образом вылетают из него.

Результаты расчётов Тамма показали наличие связи между поверхностными и объёмными состояниями при экспоненциальном затухании волновой функции в поверхностном слое твёрдого тела толщиной около 10^{-7} см.

Также Тамм впервые указал на то, что должен существовать второй фотоэлектрический порог объёмного эффекта в металле. Позже это явление, получившее название «красной границы фотоэффекта», было экспериментально подтверждено и объяснялось тем, что фотоэффект не наблюдается, если частота света меньше определённого граничного значения. Для возникновения первого варианта фотоэффекта, то есть выбивания электронов из металла, свет должен обладать достаточной частотой, чтобы преодолеть работу выхода электрона.

До этой работы Игоря Тамма фотоэффект рассматривался как единое явление. Тамм показал, что это два разных физических процесса с разными механизмами, спектральными характеристиками и практическими применениями. Во-первых, поверхностный эффект реализуется за счёт скачка потенциала на границе металл-вакуум, который обеспечивает сохранение импульса. Во-вторых, объёмный эффект объясняется передачей избыточного импульса кристаллической решётке.

Высказанные Таммом почти век назад идеи остаются актуальными и в настоящее время. Примером этому могут служить фотокатоды с квантовой эффективностью >40%, просветляющие оптические покрытия, гетероструктурные лазеры с инверсной накачкой, каскадные квантовые структуры, однофотонные детекторы, лавинные фотодиоды, квантовые точки.

В новой статье, опубликованной в 1932 году в журнале «Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion – PZ der Sowjetunion» (Физический журнал Советского Союза), Тамм анализирует возможные связанные состояния электронов на поверхности кристаллов [21].

Пользуясь случаем, нельзя не сказать несколько слов об этом журнале как об одном из начинаний Тамма. Журнал «Physikalische Zeitschrift

der Sowjetunion» (сокр. «PZ der Sowjetunion») был научным изданием, созданным в 1932 году по инициативе группы советских физиков, включая таких учёных, как И.Е. Тамм и Л.Д. Ландау при поддержке немецких коллег. Издателем выступало Общество физиков-теоретиков и математиков при Академии наук СССР совместно с немецким издательством.

Журнал был предназначен для публикации передовых исследований в таких областях, как квантовая механика, теория относительности и физика твёрдого тела. Статьи публиковались преимущественно на немецком языке.

Издание прекратилось в 1938 году из-за ухудшения мировой политической ситуации.

Однако основную ценность этой работы составили впервые предложенные Таммом связанные поверхностные электронные состояния на границе кристалла с вакуумом, получившие позже общепринятое название «уровни Тамма, или таммовские поверхностные состояния». Эта статья стала основополагающей для физики твёрдого тела и открыла новое направление: физику поверхностных состояний.

В качестве инструмента своего анализа Тамм использовал решения уравнения Шрёдингера для двух вариантов: одномерной и трёхмерной кристаллических решёток. Рассмотрев простой пример с бесконечно глубокой потенциальной ямой, Тамм перешёл к варианту, когда правая потенциальная стенка была заменена периодическим потенциальным полем $U(x)$. Это осциллирующее поле Тамм ассоциировал с колебаниями кристаллической решётки.

Даже в том случае, если максимальная величина потенциала этого поля меньше, чем энергия W связанного электрона, при определённых значениях W электронная волна может полностью отражаться от потенциальной решётки. При этом электрон оказывается запертым между потенциальной стенкой слева и потенциальной решёткой справа, волновая функция будет иметь максимальное значение на поверхности раздела и экспоненциально спадать по мере удаления в обе стороны от поверхности раздела.

При таком подходе он доказал, что должны существовать необыч-

ные состояния, которые возникают из-за взаимодействия электрона с осцилляциями кристалла, с одной стороны и потенциальным барьером внешней среды, с другой. Эти состояния – «уровни Тамма» возникают, когда электрон попадает в запрещённую зону кристалла, но его энергия остаётся ниже потенциального барьера внешней среды.

Таким образом, эти уровни характеризуются такими энергетическими состояниями, при которых электроны «застревают» у поверхности кристалла. Их волновая функция (решения уравнения Шрёдингера) быстро убывает как вглубь кристалла, так и наружу, то есть электроны локализуются вблизи поверхности.

Также в статье было показано, что электронная проводимость в диэлектриках может возникать только при возбуждении электронов внешним излучением, например светом. Этот процесс Тамм назвал «внутренним фотоэффектом».

В этой статье Игорь Тамм впервые показал, что сама поверхность кристалла является источником новых квантовых состояний, которые принципиально не могут существовать в бесконечном кристалле.

В современной теоретической физике различают собственные (таммовские) и несобственные поверхностные состояния. Собственные состояния связаны с самим обрывом решётки, а несобственные – с локальными дефектами на границе.

Задачи, связанные с таммовскими состояниями, возникают в самых неожиданных областях науки и техники. Так, например, исследования искусственных наноалмазов размером 2–5 нм, проведённые группой российских учёных, выявили поверхностные состояния Тамма, которые проявляются только на исключительно чистых образцах [22]. Было обнаружено, что в рамановском спектре появляются дополнительные линии, например, 1325, 1500, 1600 см^{-1} , которых нет в обычных алмазах. Эти линии связаны с поверхностными состояниями Тамма. В статье отмечается, что при использовании лазеров с разными длинами волн (от 257 до 1064 нм) интенсивность и положение Рамановских пиков меняются. С помощью компьютерного моделирования была рассчитана плотность фоновых состояний (PhDOS), кото-

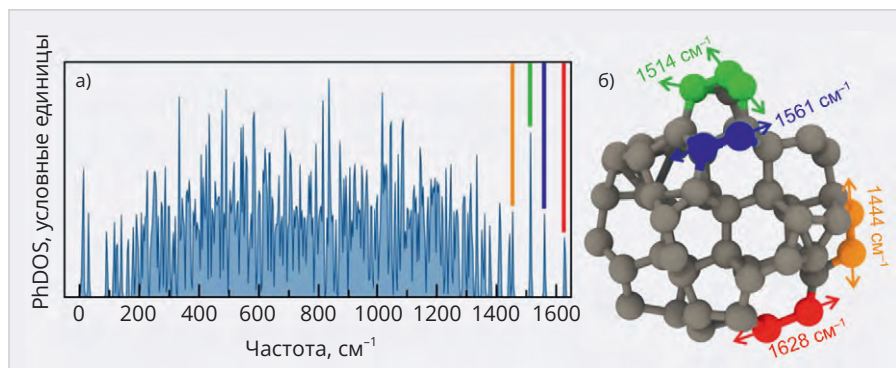


Рис. 4. Плотности фоновых состояний исследованных наноалмазов (а) и визуализация атомных колебаний, соответствующих высокочастотным фоновым модам (б)

рая показала, что высокочастотные колебания выше 1333 см^{-1} связаны с поверхностными атомами наноалмаза. Полученные значения плотности фоновых состояний исследованных наноалмазов показаны на рис. 4а. Упрощённая визуализация атомных колебаний, соответствующих высокочастотным фоновым модам, представлена на рис. 4б. Цветные полосы на рис. 4а соответствуют фоновым модам, показанным на рис. 4б. Стрелки указывают направление атомных колебаний.

Измерения, проведённые с помощью ядерного магнитного резонанса, показали, что эти линии не связаны с примесями или другими типами углерода, такими как, например, графит с sp^2 -связями. Наноалмазы обладают уникальными свойствами, такими как высокая твёрдость. Их модуль упругости 607 ГПа, что больше, чем у обычного алмаза (443 ГПа). Поверхностные состояния Тамма в наноалмазах вызывают особые оптические свойства, такие как резонансное рамановское рассеяние, зависящее от энергии возбуждения. Эти свойства делают наноалмазы перспективными для современных и будущих электронных компонентов.

Благодаря резонансному рассеянию наноалмазы могут использоваться в сенсорах для обнаружения света или химических веществ. Локализация света на поверхности наноалмазов может быть применена в фотонных чипах или для управления световыми сигналами в наноэлектронике. Оптические свойства, связанные с поверхностными состояниями, могут дополнить использование NV-центров (дефектов азота) в наноалмазах для квантовых компьютеров.

Детальный обзор проблем, связанных с таммовскими состояниями, можно найти в монографии С. Дэвисона и Дж. Левина «Поверхностные (таммовские) состояния» [23].

Предложенные Игорем Таммом концепции легли в основу так называемых таммовских плазмонов (Tamm Plasmon), с помощью которых описывается механизм поведения электронов на границе между металлом и специальным диэлектрическим материалом, называемым «распределённым брэгговским отражателем» (Distributed Bragg Reflector – DBR). Не погружаясь глубоко в сложную математику, можно простыми словами описать эти механизмы следующим образом.

С одной стороны, электроны могут свободно перемещаться внутри проводника. С другой – диэлектрик (DBR), состоящий, например, из чередующихся слоёв GaAs/AlAs, действует как зеркало для света, отражая его определённым образом. На границе, разделяющей эти две структуры, происходят сложные комбинированные процессы, в которых задействованы свет (фотоны) и поверхностные плазмонные волны – ПП (Surface Plasmon Polaritons – SPP), которые возникают в результате коллективных колебаний свободных электронов в металлах и полупроводниках. Они распространяются вдоль границы между металлом и диэлектриком, перенося энергию на большие расстояния. Можно сказать, что SPP похожи на волны, возникающие на поверхности воды под действием ветра и распространяющиеся вдоль реки, ограниченной берегами.

Значения волнового вектора у поверхностного плазмона SPP превосходят значения волнового векто-

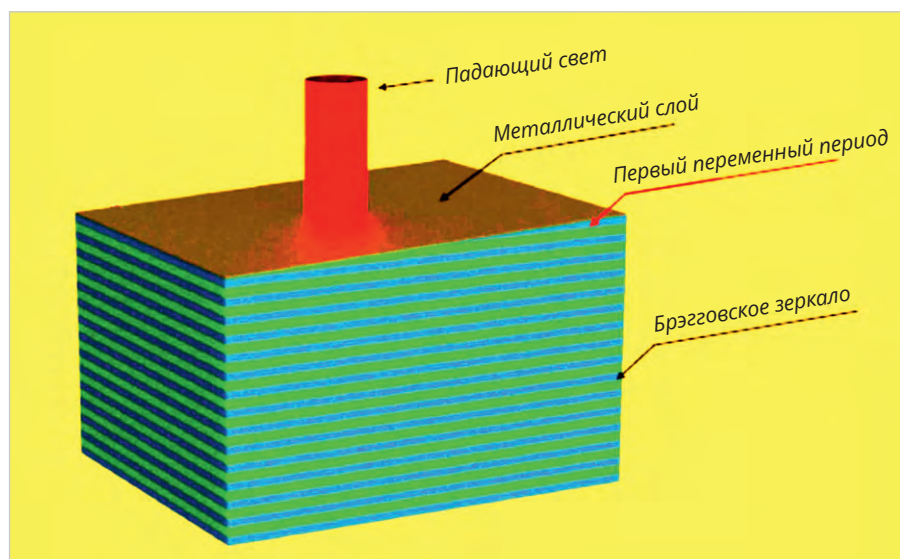


Рис. 5. Схематическое изображение структуры таммовского плазмон-поляритона на основе GaAs/AlAs и DBR из золотой плёнки

ра света в вакууме. Поэтому SPP не может быть возбуждён светом. Для возбуждения SPP нужны специальные методы, например призмы или особые наноструктуры. Таммовский плазмон, напротив, может быть возбуждён светом напрямую благодаря малым значениям волнового вектора. Для того чтобы различать эти два типа плазмонов, стали употреблять термин «таммовские плазмон-поляритоны».

В отличие от SPP, таммовские плазмон-поляритоны не распространяются вдоль границы кристалла, а локализованы в одной точке и образуют стоячую волну. Благодаря DBR свет как бы «запирается» в этой области, создавая узкую спектральную линию.

Поскольку таммовские плазмон-поляритоны (ТПП) обладают высокой чувствительностью к параметрам гибридных структур, в которых они возникают, они являются крайне перспективными для создания датчиков, способных точно измерять изменения показателя преломления, а также для разработки лазеров, оптических переключателей, фильтров и селективных излучателей света и тепла. Такие технологии находят применение в современной электронике, включая оптические сенсоры, фотонные устройства и энергоэффективные источники излучения.

Схематическое изображение структуры Тамма, состоящей из распределённого брэгговского отражателя (DBR) на основе GaAs/AlAs и золотой плёнки, показано на рис. 5.

Более подробно таммовские плазмон-поляритоны будут рассмотрены в следующей части статьи.

В 1933 году в том же журнале «Physik der Sowjetunion» Игорь Тамм опубликовал статью о работе выхода электронов из металла и термоэлектронной эмиссии, подготовленную совместно со своим аспирантом, а впоследствии сотрудником «первого созыва» Теоретического отдела Физического института Дмитрием Ивановичем Блохинцевым [24].

В 1933 году на момент опубликования статьи были известны эмпирические законы термоэлектронной эмиссии (уравнение Ричардсона) и основные принципы статистики Ферми – Дирака.

Однако единой теории, согласующей эти концепции с учётом квантово-механического рассмотрения потенциального барьера на поверхности металла, тогда ещё не было. В этой статье Тамм и Блохинцев объяснили природу термоэлектронной эмиссии в металлах (ТЭЭМ), основываясь на том, что в металле электроны распределены по энергиям согласно статистике Ферми – Дирака, а не классическому максвелловскому закону. При нагреве металла часть электронов приобретает достаточно высокую энергию, чтобы преодолеть потенциальный барьер на границе металл–вакуум, который определяется работой выхода электрона из металла. Именно эта группа электронов формирует термоэлектронный поток. Авторы рассмотрели механизм движения электронов, имеющий статистический

характер, с учётом вероятностей их прохождения через потенциальный барьер. В результате была получена формула тока эмиссии, по структуре напоминающая формулу Ричардсона, но включающая дополнительные экспоненциальные члены, учитывающие зависимость работы выхода от температуры. В предельном случае высоких температур формула эмиссионного тока сводится к уравнению Ричардсона. Однако для точного описания электронов, покидающих металл, необходимо учитывать статистику Ферми – Дирака и особенности потенциального барьера.

Работу выхода Тамм и Блохинцев интерпретировали как энергетический барьер, который должен преодолеть электрон, чтобы покинуть металл и перейти в вакуум. При таком подходе работа выхода определялась как разность между уровнем наибольшей энергии электрона при абсолютном нуле и внешним потенциалом, удерживающим электроны внутри металла. Под воздействием однородного электрического поля, направленного от поверхности металла, потенциальный барьер на границе металл–вакуум слегка понижается, что облегчает электронам преодоление этого барьера и эмиссию из металла. Это происходит потому, что потенциальная энергия электрона вблизи поверхности складывается из двух частей: электростатического взаимодействия с поверхностным зарядом («силы зеркального изображения») и энергии взаимодействия с внешним электрическим полем. В результате внешнее электростатическое поле изменяет профиль поверхности потенциального барьера, уменьшая эффективную работу выхода, что приводит к повышению термоэлектронной эмиссии.

Работу Игоря Тамма и Дмитрия Блохинцева [24] можно рассматривать как заключительный этап, который помог перейти от эмпирических и полуэмпирических моделей к детальной квантово-механической теории электро-эмиссионных процессов. Она оказала значительное влияние на развитие таких приложений современной электроники, как, например, холодные катоды с автоэлектронной эмиссией, фотоэлектрхимическая катализация, электронная микроскопия, а также на другие сферы современной электроники.

В середине 30-х годов И.Е. Тамм начал серьёзно заниматься проблемами ядерной физики. В этот период он публикует ряд работ по таким вопросам, как, например, релятивистское взаимодействие элементарных частиц (1934), магнитный момент нейтрона (1934), взаимодействие нейтронов и протонов (1934), бета-радиоактивность (1936), взаимодействие нейтронов с электронами (1938).

Значительный период (1939–1951) был посвящён ядерной физике. В 1939 году он опубликовал работу «О структуре ядер» (Physical Review), в 1940 году – серию работ о нейтрине и взаимодействии тяжёлых частиц.

Все эти работы представляют несомненный интерес с точки зрения ядерной физики. Их оригинальные тексты можно найти в «Собрании научных трудов И.Е. Тамма» [14].

В нашей статье остановимся на работе И.Е. Тамма и С.А. Алтшулера (1934), посвящённой магнитному моменту нейтрона. Кроме того, что эта работа описывает фундаментальные свойства нейтрона, повлиявшие на дальнейшее развитие ядерной физики, она имеет также большое прикладное значение, в том числе и для современной электроники [25].

Нейтрон был открыт в 1932 году английским физиком Джеймсом Чедвиком. В 1933 году Альфред Ланде опубликовал статью в журнале Physical Review, в которой он исследовал магнитный момент протона. То есть в это время было известно, что протоны имеют магнитный момент. Однако о нейтральных частицах ядра – нейтронах существовало ошибочное мнение, что они магнитными свойствами не обладают.

Игорь Тамм, интересовавшийся новыми открытиями в физике, поручил своему аспиранту Семёну Александровичу Алтшулеру всесторонне изучить эту тему. Крайне интересным в этой проблеме было то, что ядра с чётным числом протонов и нейтронов никак не проявляют магнитных свойств. В то же время, если в ядре наблюдается избыток или недостаток нейтронов, оно ведёт себя, как магнит. Отсюда они сделали гениальный вывод: раз добавление одного нейтрона делает ядро магнитным, значит, сам нейтрон должен обладать магнитным моментом. Революционность этой идеи заключалась в

том, что нейтральная частица может быть магнитом.

Тамм не стал углубляться в сложные квантово-механические расчёты. Вместо этого он использовал существующие экспериментальные данные по магнитным моментам различных ядер. Используя простую математическую модель, он оценил, каким должен быть магнитный момент нейтрона, чтобы объяснить наблюдаемые экспериментальные данные.

Авторы предсказали, что магнитный момент нейтрона составляет примерно половину ядерного магнетона и его направление противоположно механическому (спиновому) вращению.

Сама мысль о наличии магнитного момента у нейтрона и его составной структуре в то время встретила многочисленные возражения, в частности, со стороны Нильса Бора.

Несмотря на то что много позже экспериментально измеренный магнитный момент нейтрона оказался равен $-1,913042$ ядерного магнетона, эта работа Игоря Тамма имеет фундаментальное значение как для теоретических основ ядерной физики, так и для различных приложений, начиная от кубитов квантовых компьютеров и заканчивая установками термоядерного синтеза.

Эта статья является ярким доказательством таланта Игоря Евгеньевича Тамма, показывая способность физика-теоретика увидеть физический смысл нового явления, скрытый за математическими формулами.

Вывод Тамма о том, что магнитные свойства нейтрона – это не просто абстрактное явление, а реализация скрытой внутренней структуры частицы, был действительно провидческим. Он предположил, что магнитный момент возникает из-за движущихся внутри частицы зарядов или спинов, что связано с квантовыми свойствами самой частицы. Таким образом, магнитный момент нейтрона воспринимался как проявление квантово-механических свойств и внутренней динамики частиц, приводящей к взаимодействиям с внешними магнитными полями. Это гениальное предсказание Игоря Тамма подтвердилось в 1964 году, когда Мюррей Гелл-Манн и Джордж Цвейг независимо разработали теорию строения адронов,

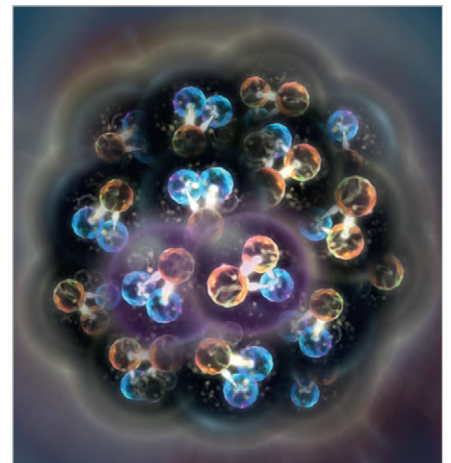


Рис. 6. Коррелированные пары протонов и нейтронов, выделенные фиолетовым цветом, взаимодействуют с кварками и глюонами [26]

утверждавшую, что протоны и нейтроны состоят из кварков. Экспериментальные доказательства существования кварков были получены в 1968 году в Стэнфордском центре линейных ускорителей (SLAC).

Авторам недавно опубликованной работы удалось показать корреляцию протон-нейтрон пар, основанную на взаимодействии с кварками и глюонами (рис. 6).

С точки зрения современной электроники понимание магнитных свойств нейтрона стало основой для развития технологий магнитной записи информации.

Точное знание магнитного момента нейтрона позволило создать сверхчувствительные магнитометры и другие измерительные приборы, используемые в современной электронике.

Эта работа заложила теоретические основы для развития ЯМР-технологий, которые сегодня используются не только в электронике для анализа материалов, но также и в медицине (МРТ).

Благодаря наличию магнитного момента у нейтрона дифракция нейтронов используется для изучения магнитных структур в кристаллах и сложных материалах. Это единственный инструмент, позволяющий напрямую исследовать магнитное упорядочение в магнетиках, что невозможно с помощью рентгеновских лучей. С помощью нейтронных методов удалось идентифицировать сложные спиральные и периодические магнитные структуры в новых материалах, что привело к созда-

нию новых магнитных сплавов и устройств.

Следующим «захватывающим увлечением» Игоря Тамма стало загадочное излучение, описанное Павлом Черенковым в статье, опубликованной в журнале «Доклады АН СССР» в 1934 году [27]. Эта статья была подготовлена по результатам аспирантской работы Черенкова, которая заключалась в изучении люминесценции различных растворов под действием γ -радиации. Научным руководителем был президент АН СССР Сергей Иванович Вавилов, крупнейший специалист в области люминесценции. В ходе своих экспериментов Черенков обнаружил непонятное слабое свечение в чистой воде при облучении воды препаратом радия. Вследствие незначительной яркости свечения для количественных измерений в большинстве случаев применялся метод визуальной фотометрии слабых свечений, разработанный С.И. Вавиловым.

Это свечение коренным образом отличалось от обычной флуоресценции. Этим результатам не поверил С.И. Вавилов, утверждавший, что вода светиться не может, и это просто ошибка эксперимента. Однако Павел Черенков продолжил исследования и после двух лет сложных дополнительных экспериментов не только подтвердил эффект свечения, возникающего в воде под действием гамма-излучения, но и определил его направленность [28].

Первым, кто попытался теоретически описать это явление, был сам С.И. Вавилов (ДАН СССР, 2, 457, 1934). Не вдаваясь в сложные детали, отметим только, что интерпретация Вавилова оказалась ошибочной.

Правильное теоретическое объяснение эффекта Черенкова впервые дали Игорь Тамм и Илья Франк в 1937 году [29].

В этой статье они показали, что оптически прозрачное вещество, в котором движется электрон, излучает когерентно, по крайней мере, на протяжении, сравнимом по своим размерам с длиной волны видимого света. Это свечение, получившее позднее название «Черенковское излучение» – ЧИ (Cherenkov Radiation), частично поляризовано, и вектор колебаний параллелен движению электрона. Характерным его свойством является резкая асимметрия в

распределении интенсивности, проявляющаяся в том, что в направлении движения электрона света излучается много больше, чем в противоположном направлении.

Таким образом, ЧИ не может быть вызвано ни рассеянием электронов на атомных ядрах, ни взаимодействием с отдельными атомами.

Тамму и Франку удалось создать строгую теоретическую модель, которая объяснила все наблюдаемые особенности ЧИ.

Характерной особенностью эффекта Черенкова является строгая направленность возникающего излучения. Свет распространяется только под определённым углом θ к направлению движения электрона: $\cos \theta = 1/(\beta n)$, где $\beta = v/c$. Это объясняет наблюдавшуюся Черенковым асимметрию свечения.

Результаты дополнительных экспериментов и их теоретическое описание были приведены в статье Игоря Тамма в соавторстве с Ильёй Франком и Павлом Черенковым, опубликованной в ДАН СССР в 1938 году [30]. Анализируя результаты возникновения свечения в чистых жидкостях под действием быстрых электронов, они показали, что в них возникает слабое видимое свечение, которое существенно отличается от каких-либо ранее известных видов люминесценции. Свечение не тушится ни изменением вязкости жидкостей при нагревании, ни растворением в них активных тушителей флуоресценции типа KI и AgNO_3 .

Степень поляризации возникающего свечения не меняется с изменением вязкости. Направление преимущественных колебаний электрического вектора во всех случаях совпадает с направлением оси первичного пучка. Спектр свечения непрерывный до 2200 \AA (для воды).

Для различных жидкостей угол, под которым наблюдается максимум излучения, возрастает с увеличением показателя преломления.

В 1939 году Игорь Тамм фактически завершил формирование теоретических основ эффекта Черенкова, обеспечив тем самым его использование в физике элементарных частиц. В статье, опубликованной в «Journal of Physics of the USSR» [31], он более подробно рассмотрел излучение равномерно движущегося заряда. В ней также обсуждаются условия, при

которых теория может быть применена к видимому излучению электронов с учётом того, что при прохождении через среду они отклоняются в результате соударений, постепенно теряют энергию на ионизацию и т.д.

Эта статья переносит акцент с конкретного экспериментального явления на общую физическую проблему излучения равномерно движущегося заряда в среде. Тамм формулирует это как фундаментальное исключение из классического правила об отсутствии излучения у равномерно движущихся зарядов.

Здесь приведён более строгий вывод основной формулы эффекта Черенкова и его центральной идеи, заключающейся в том, что заряд излучает электромагнитные волны при равномерном движении, если его скорость превышает фазовую скорость света в данной среде. При выводе основной формулы Тамм учёл такие важные моменты, как дисперсия среды, релятивистский анализ с точки зрения системы покоя электрона, конечное время движения.

Статья подчёркивает полное согласие теории Тамма – Франка с экспериментами Черенкова и независимыми исследованиями Коллинза и Рилинга [32], подтверждающими выводы об интенсивности и угловом распределении, поляризации излучения, зависимости от оптических свойств среды, энергетическом пороге.

Физический смысл теоретического объяснения эффекта Черенкова, которое дали Игорь Тамм и Илья Франк, можно понять на следующем простом и наглядном примере. Если представить себе движущееся судно на спокойной глади озера, то в случае, когда его скорость небольшая, вокруг него возникают лишь небольшие круговые волны. Однако если скорость судна превышает минимальную скорость волн на поверхности воды ($0,83 \text{ км/ч}$), судно будет непрерывно генерировать волнение даже в том случае, когда его скорость остаётся постоянной. При этом за судном потянется характерный V-образный след из волн. Это явление демонстрирует ударную волну на воде. Аналогичный эффект наблюдается, когда возникает звуковая ударная волна при превышении самолетом скорости звука.

Точно так же ведёт себя электрон, движущийся в оптически прозрачной

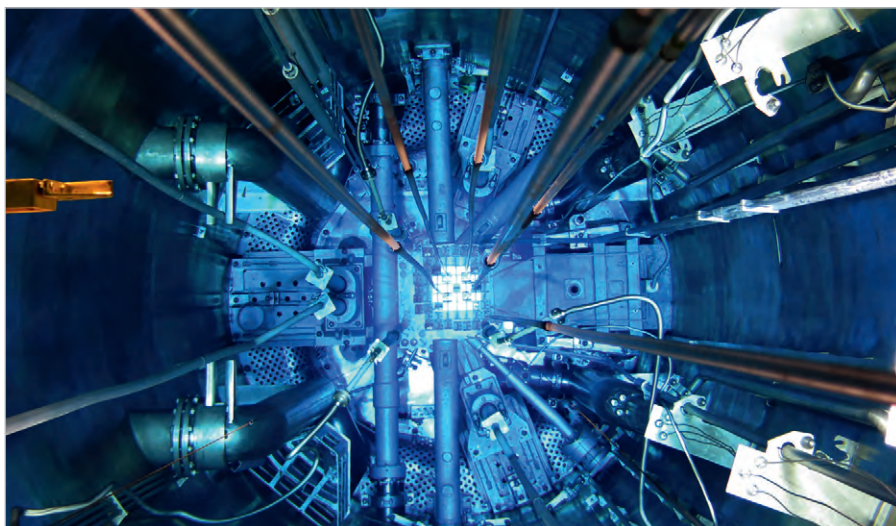


Рис. 7. Излучение Черенкова наблюдается в воде, окружающей топливо в ядерных реакторах



Рис. 8. За открытие черенковского излучения и разработку его теории Игорь Тамм, Илья Франк и Павел Черенков (трое в центре слева направо) получили в 1958 году Нобелевскую премию по физике

среде. Когда электрон летит через стекло или воду со скоростью, превышающей скорость света в этой среде, он создаёт световую ударную волну в виде голубоватого свечения, направленного вперёд по ходу движения электрона.

Хорошо известно, что излучение Черенкова наблюдается в воде, окружающей топливо в ядерных реакторах [33] (рис. 7).

Тамм объяснял это тем, что движущийся электрон, например, в воде непрерывно возмущает электрическое поле вокруг себя. Эти возмущения распространяются со скоростью света в воде, которая меньше скорости света в вакууме в n раз, где n – показатель преломления света в воде.

Если электрон движется медленно, каждое новое возмущение не успевает «догнать» предыдущие, поскольку они просто гасят друг друга, и свечения нет. Однако когда электрон обгоняет вызванные им световые возмущения, они начинают складываться в определённом направлении, создавая когерентное излучение. При этом излучение возникает только при выполнении простого условия: $v > c/n$, где v – скорость электрона, c – скорость света в вакууме, n – показатель преломления оптически прозрачной среды.

Так, например, для воды $n = 1,33$. Это означает, что для возникновения черенковского излучения элек-

трон должен иметь энергию больше 260 кэВ, что вполне реально в случае радиоактивного распада. В целом эта статья Игоря Тамма имеет фундаментальное значение, поднимая эффект Черенкова на уровень базового физического принципа и показывая его место в общей теории электромагнитного излучения. Таким образом, конкретное экспериментальное открытие перешло в разряд универсального физического закона.

Во время Великой Отечественной войны (1941–1945) Игорь Тамм занимался проблемами физики металлов, связанными с новыми типами оружия. В частности, он исследовал магнитные свойства различных сплавов. Это были закрытые для публикации работы.

В 1944 году Игорь Тамм и Илья Франк вновь вернулись к теме черенковского излучения [34]. Этому во многом способствовала опубликованная Э. Ферми статья, в которой он описал свою новую теорию ионизационных потерь электрона [35]. Для учёта влияния среды на поле движущегося электрона Ферми использовал метод, аналогичный тому, который был применён Игорем Таммом в теории эффекта Черенкова [30].

В этой статье Тамм отмечает, что результаты Ферми могли бы быть получены в более общем виде и простым способом, если воспользоваться расширенной теорией эффекта Черенкова. Для этого достаточно было учесть поглощение света в среде и считать показатель преломления величиной комплексной, а не действительной [34].

Кроме того, Тамм и Франк ещё раз показали в деталях, что ускорение электронов играет лишь второстепенную роль, а основной механизм связан с равномерным движением.

За открытие черенковского излучения Павел Черенков и разработку его теории Игорь Тамм и Илья Франк получили в 1958 году Нобелевскую премию по физике (рис. 8).

В своей речи Манне Сигбан из Шведской королевской академии наук отметил, что «открытие явления, ныне известного как эффект Черенкова, представляет собой яркий пример того, как относительно простое физическое наблюдение при правильном подходе может привести к важным открытиям и проложить новые пути для дальнейших исследований».

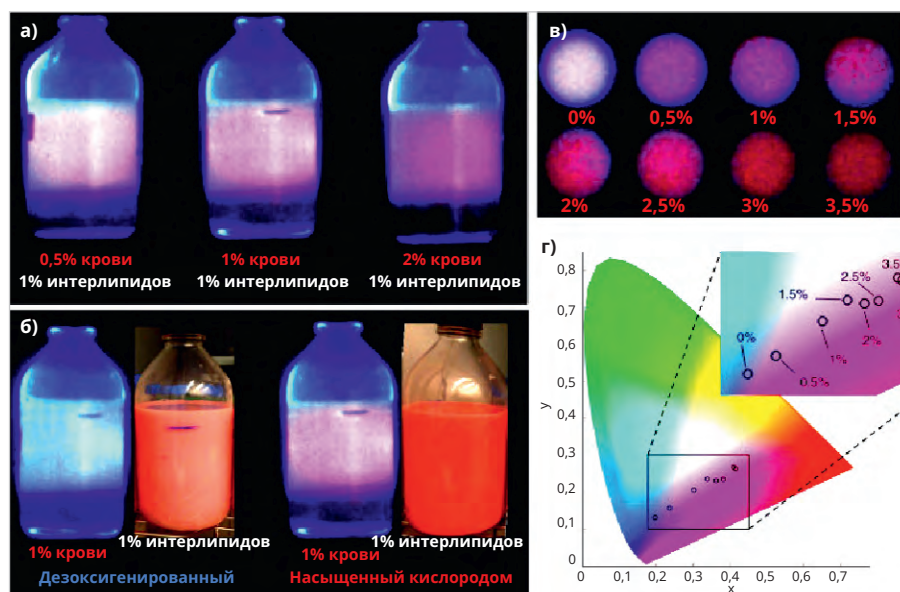


Рис. 9. Изменение цвета ЧИ для разных биологических образцов под действием импульсного рентгеновского излучения (пояснения приведены в тексте)

Действительно, рассмотренные выше работы этих нобелевских лауреатов оказали заметное влияние на самые разнообразные направления науки и техники.

Идеи Игоря Тамма продолжают стимулировать научный поиск и в наше время. В 2025 году 85-летний юбилей со дня опубликования легендарной статьи Тамма научный коллектив физиков российского Университета ИТМО (СПб.) отметил новой работой, описывающей аттосекундные явления в эффекте Черенкова [36]. В этой теоретической работе получены параметры, определяющие конечную длину формирования и время распространения фотона, которое становится отрицательным вблизи угла Черенкова. Показано, что конечная длительность вспышки, связанная с размером электронного пакета, а также сдвиг времени прибытия фотона имеют аттосекундные масштабы (аттосекунда равна одной квинтиллионной доле секунды (10^{-18} секунды)). Необычно то, что временной сдвиг фотона может быть как положительным, так и отрицательным.

Идеи Игоря Тамма нашли применение при разработке нового медицинского оборудования, анализирующего спектр ЧИ, возникающего под действием импульсного рентгеновского излучения (4 мкс), вырабатываемого стандартной терапевтической рентгеновской трубкой с напряжением 6 МВ. Благодаря разному коэффициенту преломления органы с различным содержанием крови испускают

ЧИ разного цвета [37]. Изменение цвета ЧИ для разных биологических образцов под действием импульсного рентгеновского излучения (4 мкс) показано на рис. 9.

Изменение концентрации крови в водных растворах, содержащих 1% интралипида для имитации тканевого рассеяния, влияет на цвет черенковского излучения образцов, показанных на рис. 9а. Повышенная оксигенация увеличивает сигнал в красном канале черенковских изображений (рис. 9б) и наблюдается благодаря уменьшению поглощения красного света оксигемоглобином по сравнению с дезоксигемоглобином.

Систематическое изменение концентрации крови в небольших образцах 1% раствора интралипида (рис. 9в) демонстрирует почти монотонное распределение цветов по оси от красного к синему.

Изображение наложено на диаграмму цветности CIE в цветовом пространстве $x-y$ (рис. 9г).

На самом деле это достаточно сложный технический эксперимент, использующий уникальное электронное оборудование, позволяющее регистрировать крайне слабое по интенсивности импульсное (4 мкс) ЧИ на уровне существующего фотонного фона. К деталям этого эксперимента мы вернёмся в следующей части статьи.

В качестве другого примера влияния работ Игоря Тамма на современную электронику можно привести научное приборостроение.

Черенковские детекторы, являющиеся одними из основных инструментов ядерной физики, позволяют регистрировать быстрые частицы с высокой эффективностью, измерять скорость частиц и идентифицировать их по порогам возникновения излучения. Достаточно отметить, что детекторы элементарных частиц (Ring Imaging Cherenkov – RICH) используются в Большом адронном коллайдере.

В астрофизике черенковские телескопы для регистрации широких атмосферных ливней (ШАЛ) позволяют регистрировать вторичные продукты галактических космических лучей.

Состав галактических космических лучей (ГКЛ) представляют большей частью протоны (около 90%). Считается, что основным источником ГКЛ являются взрывы сверхновых звезд в нашей галактике. Эти взрывы создают ударные волны, которые ускоряют частицы до гигантских энергий (10^{21} эВ), позволяющих этим частицам распространяться по галактике и достигать Земли. В результате взаимодействия с земной атмосферой образуются каскады новых ядер и гамма-квантов, вызывающих ШАЛ, шириной десятки километров, в которых задействованы миллиарды частиц.

Этих частиц настолько много, а вспышки ЧИ столь короткие (5–20 наносекунд), что необходимо регистрировать отдельные фотоны на уровне солнечного света.

В качестве примера такого типа черенковских телескопов ШАЛ можно привести IACT – Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope. Принцип действия этого телескопа проиллюстрирован схемой на рис. 10.

Общая площадь поверхности, освещённая этой вспышкой, составляет многие сотни квадратных метров.

Поэтому такие телескопы объединяются в сеть, состоящую из отдельных устройств, распределённых по высоте и ширине, обычно в горной местности. На рис. 10 показана структурная схема черенковского телескопа, предназначенного для регистрации ШАЛ [38].

Такой телескоп в общем случае представляет собой большое сегментированное зеркало, которое отражает черенковское излучение на массив фотоумножителей. Фотоумножите-

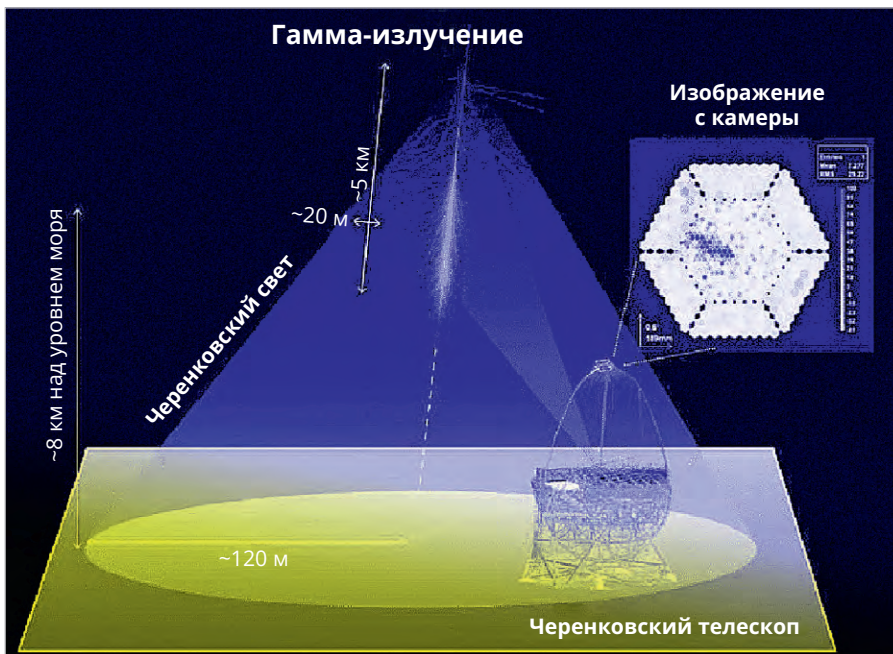


Рис. 10. Структурная схема черенковского телескопа для регистрации ШАЛ



Рис. 11. Оптический модуль нейтринного телескопа Baikal-GVD

ли соединены с быстродействующей электроникой, которая усиливает, оцифровывает и регистрирует картину или изображение ливня. Наиболее эффективным режимом работы является использование массива таких телескопов, которые обычно могут быть расположены на расстоянии от 70 до 120 метров друг от друга. В современных моделях подобных устройств в качестве детекторов используется новый тип фотоумножителей, так называемые SiPM – Silicon Photomultiplier – твердотельные детекторы, чувствительные к отдельным фотонам. Они представляют собой матрицу микроячеек с лавинными фотодиодами, работающими в гейгеровском режиме.

Для регистрации нейтрино существуют другой тип телескопов, измеряющих «прямое» ЧИ. В них используются в качестве тормозящей среды огромные количества воды или льда. Например, российский нейтринный телескоп Baikal-GVD представляет собой кластерную структуру из измерительных блоков, расположенных на дне озера Байкал. Тормозящей средой служит вода озера. Этот телескоп Baikal-GVD входит в Глобальную нейтринную сеть (Global Neutrino Network – GNN) наряду с телескопами IceCube на Южном полюсе и KM3NeT в Средиземном море [39].

Нейтринный телескоп Baikal-GVD состоит из гирлянд оптических модулей (рис. 11).

Каждый из четырнадцати кластеров содержит 8 гирлянд по 36 модулей. Гирлянды заякорены на дне. Главная гирлянда располагается в центре кластера, а остальные в радиусе 60 метров вокруг неё.

Следующая значимая статья Игоря Тамма была написана в соавторстве с Л.И. Мандельштамом. В 1945 году они опубликовали одну из наиболее интересных своих работ, касающуюся основного закона сохранения энергии в квантовой механике [40]. Известно, что полная энергия замкнутой квантово-механической системы не имеет одного определённого, постоянного во времени значения. Однако здесь постоянной остаётся вероятность измерить каждое из возможных значений энергии системы.

Они предложили строгое математическое обоснование соотношения неопределённости для энергии и времени, опираясь на уравнение Шрёдингера. Их идея: если энергия системы имеет разброс (ΔH), то это связано с тем, как быстро изменяются другие физические величины системы, такие, например, как координаты или импульсы. Это значит, что для того, чтобы точно измерить энергию системы, необходимо затратить больше времени. С другой стороны, за короткое время энергия будет определена с меньшей точностью.

В качестве иллюстрации к своей теории авторы рассмотрели, как соотношение работает при столкновении двух частиц. Если энергия системы имеет малый разброс, процесс изменения скорости одной из частиц занимает больше времени.

Если состояние системы (например, атома) нестабильно и быстро распадается (короткое время жизни τ), то энергия этого состояния имеет большой разброс (ΔH). Это объясняет, почему спектральные линии атомов не являются идеальными, а имеют определённый разброс ширины.

Современная электроника всё больше переходит на квантовый уровень. Поэтому чисто теоретическая работа Тамма и Мандельштама позволяет понять, как фундаментальные принципы квантовой механики применяются к реальным системам при разработках новых технологий. Так, в туннельных диодах, квантовых точках или атомных часах электроны переходят между состояниями с разной энергией за определённое вре-

мя. Точное управление квантовыми состояниями требует учёта соотношения неопределённости, полученного Игорем Таммом.

Формула, полученная для соотношения неопределённости энергии и времени, объясняет ширину спектральных линий, что важно при проектировании лазеров для конкретных приложений. Короткое время жизни состояния атома определяет большой разброс энергии, что приводит к более широким спектральным линиям. Это, в свою очередь, влияет на точность и стабильность лазеров.

В наноразмерных устройствах, таких как одноэлектронные транзисторы, соотношение неопределённости Тамма помогает оценить, как быстро можно переключать состояния в таких устройствах, что важно для их скорости и энергоэффективности.

Многие из написанных Игорем Таммом работ базируются на математическом аппарате, объединяющем квантовую механику и специальную теорию относительности. Эти идеи легли в основу нового научного направления, получившего позже название «квантовая теория поля» (КТП), которая является обобщением квантовой механики на случай взаимопревращения частиц при высоких энергиях и околосветовых скоростях.

В 1945 году Игорь Тамм опубликовал статью, посвящённую изучению взаимодействий элементарных частиц с учётом релятивистских эффектов, то есть высоких скоростей, близких к скорости света. В этой статье он предложил математический метод для решения некоторых задач КТП [41].

Основная особенность теории Тамма заключалась в том, что он рассматривал частицы (например, электроны) и поле их взаимодействия (электромагнитное или мезонное) как квантованные системы. Это значит, что поле состоит из «порций» энергии – квантов, таких как фотоны (для электромагнитного поля) или мезоны (для ядерных взаимодействий). Для этого Тамм использовал гамильтониан, который состоял из двух частей: энергии свободных частиц и энергии их взаимодействия. Это позволило ему математически описать процесс взаимодействия между частицами, обменивающимися между собой квантами поля.

Анализируя модельные расчёты для случаев, когда частицы образуют устойчивые системы, например атомы или ядра, где их энергия меньше суммы энергий покоя отдельных частиц, он показал, что можно значительно упростить модель. Для этого можно в первом приближении упростить уравнения, отбросив малозначимые члены за счёт замены полной энергии системы на сумму энергий покоя. Также можно не учитывать процессы аннигиляции и образования пар.

Кроме того, Тамм рассмотрел особый случай взаимодействия частиц с целым спином, опосредованного мезонами с малой массой покоя. Это было крайне важно для понимания ядерных сил, которые связывают протоны и нейтроны в ядре.

К таким же выводам спустя пять лет пришёл американский физик Сидни Данков (Sidney Michael Dancoff) [42]. Он усовершенствовал метод Тамма, решив задачу взаимодействия нуклонов с учётом отдачи нуклонов при испускании и поглощении мезонов для случая нейтрального скалярного мезонного поля.

Эти две независимые работы Игоря Тамма и Сидни Данкова сформировали универсальный метод расчётов, позволяющий в пределах заданной точности отбрасывать определённые члены уравнения. Этот метод, первоначально использованный в квантовой теории поля, позже получил название «Тамма – Данкова».

К вопросу об унификации уравнений для квантовой теории поля Игорь Тамм вернулся в середине 1950-х. К этому времени появились новые результаты исследований как в ядерной физике, так и в КТП. Метод Тамма – Данкова требовал доработок и уточнений. Поэтому в 1955 году И.Е. Тамм вместе с В.П. Силиным и В.Я. Файнбергом опубликовали статью, посвящённую усовершенствованному методу Тамма – Данкова с описанием его применения к рассеянию мезонов нуклонами [43]. Эта большая и сложная работа в основном состоит из математических формул. Не вдаваясь в детали, отметим, что авторы учли такие важные моменты, как устранение расходимостей, адаптированное под задачи для ядерной физики, а также динамика мезонов и нуклонов с учётом их спинов.

Позже этот метод получил международное признание и общепринятое название «Tamm Dancoff Approximation» – TDA.

Разработанный более восьми десятков лет назад TDA продолжает использоваться в современной физике, особенно в квантовой теории поля и квантовой химии.

Этот метод полезен для расчёта энергетических уровней и других физических величин в сложных квантовых системах, где другие методы могут быть неприменимы или менее точны.

Так, например, в работе [44] надёжность приближения TDA для прогнозирования колебательно-разрешённых спектров поглощения и испускания нескольких прототипических сопряжённых молекул была проверена путём проведения серии тщательных теоретических расчётов в сравнении с экспериментальными результатами как для формы полос, так и для энергий 0-0. Они показали, что метод TDA может воспроизводить экспериментальные формы полос вместе с положениями пиков поглощения и испускания. Что касается «Time-Dependent Density Functional Theory» – TDDFT, TDA приводит к занижению относительных интенсивностей в большинстве случаев, но не изменяет никакие другие характеристики спектров.

В недавно опубликованной работе [45] рассмотрен вопрос о том, насколько TDA влияет на точность расчётов спектров рентгеновского поглощения (XAS) и рентгеновской эмиссии (XES).

Обобщённые результаты исследований этих спектров, показанные на рис. 12, говорят о том, что для простых систем, таких, например, как отдельные молекулы воды в газовой фазе, метод TDA даёт результаты, близкие к полным расчётам TDDFT.

В более сложных системах, таких как молекулярные кластеры, TDA может давать менее точные результаты из-за сильных межэлектронных взаимодействий. Модифицированная версия TDA (CVS-TDA) учитывает только переходы, связанные с ядрами атомов, которые являются источником XES.

В правой части рис. 12 показаны символьные изображения матриц вторых частных производных функции, так называемых гессианов (Hessians), которые представляют

собой математические матрицы. Гессиан характеризует кривизну функции. В квантовой химии он используется для описания поведения электронов в молекуле при расчёте спектров с помощью методов TDDFT и TDA. Например, гессиан справа вверху (TDDFT) – это большая матрица размером 80×80 , учитывающая все возможные переходы между 5 занятыми и 8 виртуальными орбиталями. Для CVS-TDA используются уменьшенные матрицы (16×16 и 8×8). Более подробно об этом будет сказано во второй части статьи.

В 1948–1949 годах Тамм возвращается к идее рассеяния элементарных частиц с точки зрения теории соударений в пространстве импульсов, предложенной Дираком. Эта теория рассматривает столкновения частиц не в координатном (реальном) пространстве, а в пространстве импульсов. Такой подход позволяет учитывать законы сохранения импульса и энергии при столкновениях, что существенно при переходе к квантовым и релятивистским системам. Дирак использовал приближение Бора, в рамках которого разрешены были только определённые квантованные орбиты (дискретный энергетический спектр).

В статьях [46, 47] Игорь Тамм рассмотрел вариант теории рассеяния в импульсном пространстве с непрерывным спектром энергий. Поскольку в то время не существовало общих методов решения подобных задач (сингулярные интегральные уравнения), то необходимо было разработать соответствующий метод. В работе [46] Тамм модернизировал способ нахождения приближительного решения краевых вариационных задач (метод Ритца). Он предложил оптимизированный алгоритм, позволяющий оценивать собственные функции задач рассеяния элементарных частиц с непрерывным энергетическим спектром в импульсном пространстве. Однако в этой работе при определённых условиях собственные функции обращались в бесконечность. Поэтому во второй части статьи, опубликованной через год, Тамм исправил эти недостатки, введя новую математическую формулировку с комплексными функциями [47].

Идеи Тамма, изложенные в этих двух статьях, легли в основу современных численных методов, исполь-

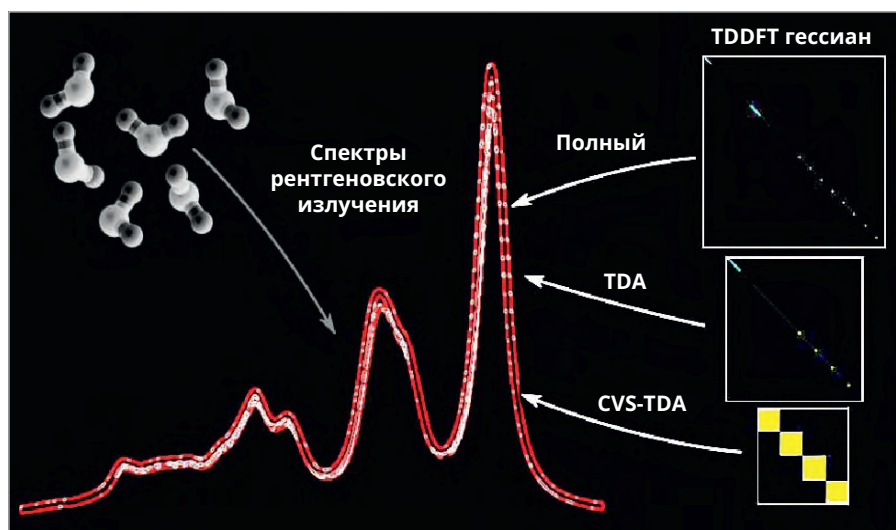


Рис. 12. Влияние TDA на точность расчётов спектров рентгеновской эмиссии (XES)

зуемых в программах моделирования электронных устройств (SPICE, TCAD).

Принципы, заложенные в работах Тамма, применяются в современных моделях подвижности носителей заряда в полупроводниках. При этом учитываются такие основные механизмы, исследованные Игорем Таммом, как рассеяние на акустических фоновых, рассеяние на оптических фоновых, рассеяние на заряженных центрах и рассеяние на нейтральных центрах.

Современная теория квантового транспорта в наноразмерных устройствах использует методы функций Грина (NEGF – Non-Equilibrium Green's Functions), которые являются прямым развитием вариационных подходов, предложенных Таммом. Кроме того, подобные методы применяются при решении оптимизационных задач с помощью квантовых компьютеров с отжигом.

В 1948 году правительство СССР поручило Игорю Тамму разработку вопросов, связанных с термоядерным оружием. Поэтому большинство его работ периода 1950-х было секретным. В эти годы он организовал и возглавил теоретическую группу, занимавшуюся разработкой термоядерного оружия. Под его руководством совместно с Андреем Сахаровым и Виталием Гинзбургом были сформулированы ключевые идеи, позволившие создать первую советскую водородную бомбу (РДС-6с), испытанную в 1953 году [48]. За свою роль в создании термоядерного оружия Игорь Евгеньевич Тамм был удостоен звания Героя Социалистического Труда, стал лауреатом Сталинской

премии и был избран академиком АН СССР.

Из открытых публикаций, не вошедших в этот обзор, можно дополнительно отметить ещё несколько работ, которые прямо или косвенно имели значение для развития специальных разделов электроники.

Например, цикл работ, выполненных совместно с С.З. Беленьким, был связан с каскадной теорией ливней и характеристиками мягкой компоненты космических лучей на уровне Земли. Данные исследования позволили Игорю Тамму разобраться позже в вопросах взаимодействия элементарных частиц с земной атмосферой [48]. Результаты этих работ во многом послужили развитию детекторов излучения и систем регистрации радиоактивных элементов в воздухе [49–51].

Дальнейшая научная деятельность Игоря Евгеньевича Тамма связана с вопросами физики атомного ядра, которые хорошо известны у нас и за границей. Все эти работы можно найти в свободном доступе на сайте «И.Е. Тамм, Собрание научных трудов в двух томах» [52, 53].

Особый интерес представляют работы Тамма, связанные с теорией магнитного удержания плазмы, которые легли в основу концепции управляемого термоядерного синтеза.

Игорь Тамм и Андрей Сахаров предложили идею термоизоляции горячей плазмы сильным магнитным полем, формирующим тороидальную структуру, так называемый токамак. Данный подход лежит в основе конструкций нового поколения термоядерных

установок, включая международный проект ITER [54, 55].

Рассмотренные в этом разделе работы Игоря Евгеньевича Тамма демонстрируют исключительную научную ценность, ставя его в один ряд с такими выдающимися физиками, как Альберт Эйнштейн, Нильс Бор, Пол Дирак. Выдвинутые почти век назад идеи Игоря Тамма не только сохранили свою значимость, но и стали фундаментом для революционных технологий XXI века.

Во второй части статьи будут рассмотрены примеры конкретных современных устройств, в которых воплотились идеи Игоря Тамма.

В заключение этой части статьи необходимо отметить созданную Игорем Евгеньевичем Таммом научную школу, воспитавшую таких выдающихся учёных, как, например:

- Моисей Александрович Марков (1908–1994) – академик-секретарь Отделения ядерной физики АН СССР, основатель нейтринной астрофизики;
- Илья Михайлович Франк (1908–1990) – соавтор теории эффекта Черенкова, Нобелевская премия 1958, академик АН СССР, лауреат двух Сталинских премий (скорее соратник, чем ученик);
- Евгений Львович Фейнберг (1912–2005) – известный физик-теоретик, ученик Тамма, академик РАН, соавтор работ по физике высоких энергий и космическим лучам;
- Виталий Лазаревич Гинзбург (1916–2009) – Нобелевская премия 2003;
- Андрей Дмитриевич Сахаров (1921–1989) – Нобелевская премия 1975;
- Леонид Вениаминович Келдыш (1931–2016) – академик РАН, создатель теории полупроводников;
- Дмитрий Иванович Блохинцев (1908–1979) – известный физик-теоретик, член-корреспондент АН СССР, соавтор работ по термоэлектронной эмиссии, создатель квантовой механики ансамблей частиц;
- Семён Александрович Альтшулер (1911–1983) – советский физик, член-корреспондент АН СССР, соавтор работ о магнитном моменте нейтрона;
- Виктор Павлович Силин (1926–2019) – советский и российский физик-теоретик, член-корреспондент РАН, соавтор работ по теории взаимодействия нуклонов;
- Семён Захарович Бельский (1916–1956) – лауреат Сталинской премии,

участник проекта РДС-6с, соавтор работ по лавинным процессам в космических лучах;

- Семён Петрович Шубин (1908–1938), известный физик-теоретик, д.ф.м.н., соавтор работ по физике твёрдого тела;
- Игорь Юрьевич Кобзарев (1932–1991) – советский физик-теоретик, соавтор работ по физике странных частиц;
- другие ученики, а также ученики учеников, развивающие идеи Игоря Евгеньевича Тамма.

Литература

1. История РФ. Тамм Игорь Евгеньевич. URL: <https://histrf.ru/read/biographies/igor-evgenevich-tamm>.
2. Тамм Игорь Евгеньевич. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тамм,_Игорь_Евгеньевич.
3. Sir Edmund Taylor Whittaker. URL: <https://www.britannica.com/biography/Edmund-Taylor-Whittaker>.
4. Портрет: И.Е. Тамм. Летопись Московского университета. URL: <https://letopis.msu.ru/peoples/7233>.
5. Мандельштам Леонид Исаакович. URL: https://ru.m.wikipedia.org/wiki/Мандельштам,_Леонид_Исаакович.
6. Сибирь. Реалии. URL: <https://www.sibreal.org/a/sudba-nobelevskogo-laureata-i-sozdatelya-vodorodnoy-bomby-igorya-tamma/30532655.html>.
7. «Выведешь формулу – не расстреляю». URL: <https://strana-rosatom.ru/2020/07/10/26182/>.
8. 100 знаменитых учёных. Тамм Игорь Евгеньевич. URL: <https://history.wikireading.ru/176866>.
9. Воспоминания о И.Е. Тамме: К 100-летию со дня рождения / РАН. Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева / отв. ред. Е.Л. Фейнберг. 3-е изд., доп. М.: ИздАТ, 1995. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/vospominaniya-o-tamme_1995/p0/.
10. Романов Ю.А. Воспоминания об учителе // Люди «Объекта». Саров-Москва: ИНФО, Человеческое Ко, 1996. С. 212–215. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/lyudi-obekta_1996/p212/.
11. Гинзбург В.Л. Долгая, разнообразная и нелёгкая жизнь (к 100-летию со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма). М.: Физматлит, 2001. С. 255–267. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/ginzburg_o-nauke-o-sebe_2001/p255/.
12. Тамм И.Е. // Физики о себе / отв. ред. В.Я. Френкель. Л.: Наука, 1990. С. 214–217. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/fiziki-o-sebe_1990/214/.
13. Пространство Минковского. URL: <https://bit.ly/4nSR8LT>.
14. Электродинамика анизотропной среды в специальной теории относительности / Журнал Русского физико-химического общества, т. 56, вып. 2–3, 1924. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p19/.
15. Mandelstam L., Tamm I. Elektrodynamik der anisotropen Medien und der speziellen Relativitätstheorie, Math. Ann. 95 (1925) 154–160. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p62/.
16. Тамм И., Мандельштам Л. Кристаллооптика теории относительности в связи с геометрией биквадратичной формы // Журнал Русского физико-химического общества, т. 56, вып. 2–3, 1924. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p33/.
17. Тамм И.Е. Основы теории электричества. М., 2003. URL: http://tevza.org/home/course/ECM2012/books/Tamm_Electromagnetism.pdf.
18. К 100-летию Игоря Евгеньевича Тамма // Специальный выпуск журнала «Природа». 1995. № 7 (1959). 194 с. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/priroda_1995_07/p108/.
19. Tamm I. Über die Quantentheorie der molekularen Lichtstreuung in festen Körpern Zeitschrift für Physik (Zs. f. Ph.). 60, 345, 1930). URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p168/.
20. Тамм И.Е., Шубин С.П. К теории фотоэффекта в металлах. Zeitschrift für Physik, Bd. 68, Heft 3/4. 1931. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p196/.
21. Tamm I.E. On the possible bound states of electrons on a crystal surface. Zeitschrift für Physik der Sowjetunion, 1932, 1, 733. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p216/.
22. Mikhail Popov et al. Surface Tamm States of 2–5 nm Nanodiamond via Raman Spectroscopy. Nanomaterials 2023, 13(4), 696. URL: <https://doi.org/10.3390/nano13040696>.

23. Дэвисон С., Левин Дж. Поверхностные (таммовские) состояния. М.: Мир, 1973. URL: https://korobkaknig.ru/nauka_i_tehnika1/fizika/poverhnostnye-tammovskie-sostoyaniya-57152.html.
24. Тамм И.Е., Блохинцев Д.И. О работе выхода электронов из металла. *Physik der Sowjetunion*, 1933, 3, 170. URL: https://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Tamm_t1_1975ru.pdf (с. 227).
25. Тамм И.Е., Альтшулер С.А. Магнитный момент нейтрона. *ДАН СССР*, 1934, 1, 455. URL: https://ikfia.ysn.ru/wp-content/uploads/2018/01/Tamm_t1_1975ru.pdf (с. 283).
26. First coherent picture of an atomic nucleus made of quarks and gluons. *Phys.org* 2003–2025 powered by Science X Network. URL: <https://phys.org/news/2024-10-coherent-picture-atomic-nucleus-quarks.html>.
27. Черенков П.А. Видимое свечение чистых жидкостей под действием γ -радиации. *ДАН СССР*, 1934, т. 2, № 8. С. 451–457. URL: <https://ufn.ru/ru/articles/1967/10/n/>.
28. Черенков П.А. Влияние магнитного поля на видимое свечение жидкостей, вызываемое γ -лучами // Доклады Академии наук СССР. 1936. Т. 3. С. 414. URL: <https://elib.gstu.by/bitstream/handle/220612/30035/107-112.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
29. Тамм И.Е., Франк И.М. Когерентное излучение быстрого электрона в среде. *ДАН СССР*, 1937. Т. XIV. № 3. С. 107. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p68/.
30. Тамм И.Е., Франк И.М., Черенков П.А. Свечение чистых жидкостей под действием быстрых электронов // Известия АН СССР. 1938. № 1–2, 29. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p75/.
31. Тамм И.Е. Излучение, вызываемое равномерно движущимися электронами // *J. Phys. USSR*, 1, № 5–6, 439, 1939. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p77/.
32. Collins G.B., Reiling V.G. *Phys. Rev.*, 1938, 54, 499. URL: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1958/cherenkov/lecture/>.
33. What is Cherenkov Radiation? IAEA. URL: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-cherenkov-radiation>.
34. Тамм И.Е., Франк И.М. Излучение электрона при равномерном движении в преломляющей среде // Труды ФИАН СССР, 2, вып. 4, 63, 1944. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p113/.
35. Fermi E. *Phys. Rev.*, 1940, 57, 485. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.57.485>.
36. Dmitry Karlovets et. al. Attosecond physics hidden in Cherenkov radiation. *Communications physics*, Nature Portfolio journal, (2025) 8:192. URL: <https://www.nature.com/articles/s42005-025-02108-y.pdf>.
37. Daniel A. et al. Color Cherenkov imaging of clinical radiation therapy. *Light Sci Appl*, 2021, Nov 4; 10(1):226. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34737264/>.
38. Alicia López Oramas. URL: https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-the-IACT-technique-The-g-ray-shower-axis-is-aligned-with-the-axis-of-the_fig5_275329291.
39. Baikal Deep Underwater Neutrino Telescope. URL: <https://baikalgvd.jinr.ru>.
40. Тамм И.Е., Мандельштам Л.И. Соотношение неопределённости энергия – время в нерелятивистской квантовой механике // Известия АН СССР, серия физическая, 1945, 9, № 1–2, 122. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p258/.
41. Igor Tamm. Relativistic Interaction of Elementary Particles // *Journal of Physics (USSR)*, 1945, том 9, № 6, с. 449–460. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p100/.
42. Dancoff S.M. Non-adiabatic meson theory of nuclear forces *Phys. Rev.*, 1950, 78, 382. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.78.382>.
43. Тамм И.Е., Силин В.П., Файнберг В.Я. Метод усечённых уравнений поля и его применение к рассеянию мезонов нуклонами // *ЖЭТФ*, 1955, 29, 6. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p158/.
44. Is the Tamm-Dancoff Approximation Reliable for the Calculation of Absorption and Fluorescence Band Shapes? *Journal of Chemical Theory and Computation*, 2013. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ct400597f>.
45. Evaluating the Impact of the Tamm–Dancoff Approximation on X-ray Spectrum Calculations. *J. Chem. Theory Comput.* 2024, 20, 2181–2191. URL: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.jctc.3c01341?ref=article_openPDF.
46. Тамм И.Е. О некоторых математических методах теории рассеяния частиц, ч. I // *ЖЭТФ*, 1948, 18, вып. 4, 337. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p266/.
47. Тамм И.Е. О некоторых математических методах теории рассеяния частиц, ч. II // *ЖЭТФ*, 1949, 19, вып. 1, 74. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p279/.
48. Атомный проект СССР. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomny-proekt-sssr_t2_kn2_2000/p0_o/.
49. Тамм И.Е., Бельский С.З. О мягкой компоненте космических лучей на уровне моря. 1939 (т. 2, с. 61). URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p61/.
50. Тамм И.Е., Бельский С.З. Энергетический спектр каскадных электронов, т. 2, с. 116. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p116/.
51. Бельский С.З. Лавинные процессы в космических лучах. М., 1946. 230 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01011204424>.
52. Тамм И.Е. Собрание научных трудов в двух томах. Т. 1. М.: Издательство «Наука», 1975. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p0/.
53. Тамм И.Е. Собрание научных трудов в двух томах. Т. 2. М.: Издательство «Наука», 1975. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p0/.
54. Теория магнитного термоядерного реактора, I // *Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций*, т. 1. М., 1958. С. 3. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p363/.
55. Теория магнитного термоядерного реактора. III // *Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций*, т. 1. М., 1958. С. 31. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t2_1975/p380/.



Китайский подвижный электронный нейтрализатор

Вано Мизандари

В сети можно найти немало сведений о подвижных наземных роботах, роботах-собаках, помощниках для лиц с ограниченными возможностями здоровья, беспилотных системах и аппаратах, но такого мира ещё не видел: китайская компания Logon Technology разработала устойчивую к атмосферным воздействиям и ударопрочную движущуюся установку с видеокамерами и несколькими функциями поражения спецсредствами, в том числе яркими вспышками света, поражающими на время зрение, звуковым шокowym «ударом» мощностью более 300 дБ, а также электротоком – специально для полицейских и антитеррористических служб. Корпус устройства настолько крепкий, что его можно применять как разгонный таран для проникновения в запертые помещения. Максимальная скорость движения составляет 38 км/ч. В статье разберёмся и с другими функциональными особенностями устройства Rotunbot RT-G, уже запущенного в серию.

Особенности конструкции

«Колобок» из пластика и металла, насыщенный электронной начинкой, управляемый с помощью искусственного интеллекта и вооружённый мультинабором спецсредств, представлен на рис. 1.

Устройство позиционируется как средство борьбы с правонарушителями [2]. Rotunbot RT-G представляет собой устойчивый ударопрочный шар диаметром около 80 см и весом 125 кг, стремительно перекатывающийся, способный догнать человека и обездвигнуть его с помощью непосредственного контакта и (или) специальных средств. Электронная начинка робота защищена от внешних воздействий полимерным корпусом, армированным стекловолокном. Такое конструктивное решение не только обеспечивает антивандальное исполнение, но и защищает полицейского помощника от мороза: устройство бесперебойно может работать в диапазоне температур от -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Встроенные специальные средства нейтрализации

Из-за наличия специальных средств задержания и обездвигивания преступников устройство получило неофициальное название «нейтрализатор».

Полицейский электронный робот может выстреливать обездвигивающей правонарушителя сетью из расположенной на боку «пушки», распылить слезоточивый газ из встроенных баллонов направленного действия,

выбросить активируемые дымовые шашки. Также устройство оборудовано акустическими средствами (СГУ и др.) для разгона толпы.

Масса в 125 кг обеспечивает «боевому колобку» возможность сбить правонарушителя с ног или пробить баррикаду во время митинга.

Подвижный робот также может преодолевать небольшие препятствия (подпрыгивать) на высоту до 30 см и перемещается по пересечённой местности. Но опция помогает и в условиях городской застройки, где улицы ограничены бордюрами: проезжая часть разделена с пешеходной и велосипедной дорожкой, находящейся на небольшом возвышении (рис. 2).

Разработка проекта велась с 2017 года. Изначально устройство разрабатывалось в научных целях: для изучения поверхности Меркурия. Базовая платформа устройства приспособлена к работе в суровых условиях, поскольку самая близкая к Солнцу планета в звёздной системе известна экстремальными температурами. Но после дискуссии в кругах разработчиков было решено вести два проекта: и для космических, и для более утилитарных полицейских, военных целей. Так, в июле 2024 года Rotunbot R прошёл испытания в полицейских патрулях китайского городского округа Вэньчжоу (рис. 3).

Кроме того, новому полицейскому робо-ассистенту не страшны удары с помощью спортивной биты для игры в городки. Краш-тест проведён и зафиксиро-

ван на видео, которое завирусилось в глобальной сети [3]. Поэтому армированный стекловолокном полимерный корпус надёжно защищает электронные модели робота от ударов, воды и мороза.

Внутреннее строение

Корпус робота состоит из трёх частей. Центральная секция соприкасается с землёй и работает в режиме моноколеса. Две боковые части, скреплённые друг с другом и с внутренней рамой, не движутся. Несмотря на необычный внешний вид, моноколесо устойчиво и не может перевернуться. В этой части конструкцию робота-полицейского стабилизирует зафиксированный на внутренней раме относительно тяжёлый груз-маятник. В результате такого конструктивного решения достигается эффект неваляшки. Изменение положения маятника смещает центр массы машины, за счёт чего устройство обретает высокую устойчивость как в статике, так и в динамике.

В движении устройство отклоняется в двух направлениях под действием электромоторов, то есть обеспечивается и реверсивное движение. На рис. 4 представлена конструкция устройства Rotunbot RT-G в разрезе. На рис. 5 – упрощённая блок-схема расположения основных частей устройства.

Зелёным цветом обозначены электромоторы, красным – инерциальный измерительный модуль для отслеживания в реальном времени углового ускорения и контроля поворота корпуса, голубым – видеокамеры.

На рис. 6 наглядно показаны особенности армированного корпуса Rotunbot RT-G.

На открытой местности Rotunbot RT-G может двигаться по заданному программой или управляемому оператором маршруту. Встроенные в электронный аппарат алгоритмы с ИИ позволяют уверенно перемещаться в разных условиях. При этом тряска и вибрация, неизбежные на бездорожье, не мешают оператору видеть картину окружающего мира стабилизированной: за это отвечает соответствующий электронный модуль. Примеры электронной стаби-



Рис. 1. Устройство Rotunbot RT-G, внешний вид



Рис. 2. Зафиксированный момент подпрыгивания устройства



Рис. 3. Апробирование автономного полицейского робота патрулями в Вэньчжоу

лизации изображений с видеокамер, позволяющей избежать искажений из-за естественной вибрации в движении, показаны на рис. 7. Слева – оригинальные кадры, справа – изображения после обработки встроенным ПО с ИИ, окончательно записываемые в электронную память устройства.

В этой части отметим, что с помощью шести постоянно включённых в разных ракурсах съёмки видеокамер «робокон» выполняет роль и видеорегистратора, совмещённого с модулем электронной памяти ёмкостью 1 Тбайт. При этом кроме фиксации всего происходящего в SSD внутренней памяти картинка в реальном времени передаётся по каналам связи LTE со скоростью 5G. Такие скорости передачи данных уже несколько лет обеспечены в крупных городах КНР.

Для ориентации на местности Rotunbot RT-G использует GPS-навигацию, лидары (приборы для определения расстояния до объектов с помощью лазерного луча) и ультразвуковые датчики, позволяющие успешно объезжать людей, животных, автомобили на городских улицах, мусорные урны и иные препятствия. Таким образом, представленный робот не врежется в закрытые стеклянные двери первого этажа бизнес-центра, магазина или кафе, шокируя посетителей и испортив им аппетит. С помощью специальных электронных датчиков, которых в представленной модели более 40, Rotunbot RT-G оценивает угловое ускорение, повороты корпуса, пройденное расстояние, уровень связи GSM и LTE, уровень зарядки батареи и иные параметры, обеспечивающие устройству функционирование.

Кроме того, устройство обладает хорошей энергоэффективностью в сравнении с уже созданными шагающими роботами: на одном заряде встроенной АКБ работает 10 часов без перерыва и может преодолеть расстояние до 120 км. Это значительный ресурс для такой конструкции. Подзарядить устройство можно от электрического ЗУ в стационарных условиях: от розетки осветительной сети 230–240 В или на уличных ЭЗС (станциях зарядки для электромобилей).

Китайский робот-нейтрализатор для нужд полиции обладает высокой прочностью. Не страшны падения с высоты до 0,8 метра (испытано в условиях падения на асфальт) и внешние воздействия давлением общей силой до 4 т.

Rotunbot RT-G может без повреждений и потери функционала скатывать-

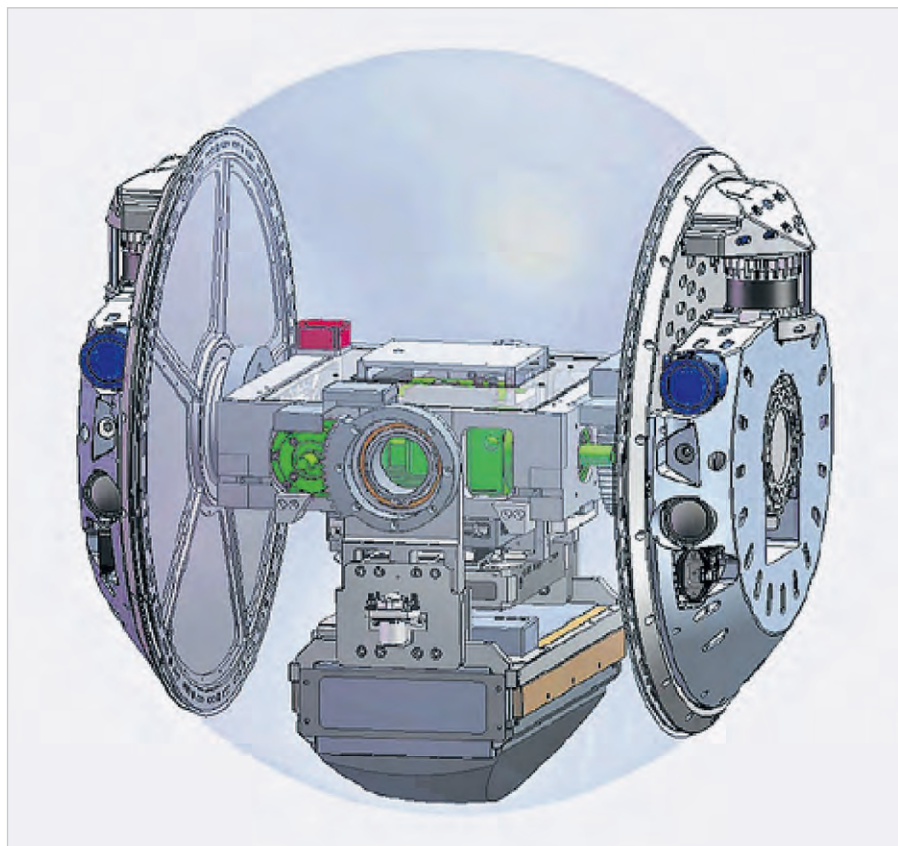


Рис. 4. Конструкция Rotunbot RT-G в разрезе

ся с лестниц, преодолевать небольшие уступы. Не помеха ему и грязь, слякоть, лёгкое бездорожье – главное, избегать загрязнения камер и датчиков. При перемещении в сливных желобах Rotunbot RT-G доказал свою стабильность и способность уверенно двигаться. Но что касается более глубоких уклонов, канав или рвов, в частности, в условиях типичного загородного ландшафта и особенно на мягких почвах со значительным содержанием песка, такое моноколесо пока эффективно двигаться не может. Это один из его зафиксированных за полгода и признанных недостатков. О них дополнительно поговорим в отдельном разделе.

Особенности управления

С помощью ИИ и интегративно взаимодействующих электронных датчиков устройство может двигаться автономно, к примеру, по сигналу от пирозлектрического детектора («датчика движения»), микроволнового датчика и др., полностью дистанционно, получая команды управления по сети LTE (сотовой связи), а также локально дистанционно – с помощью пульта дистанционного управления (ПДУ) с расстояния до 500 метров. На рис. 3 (выше) у сотрудника полиции, замыкающего шествие патруля, в руках именно ПДУ.

Благодаря двум электрическим двигателям бесщёточной конструкции (так же, как в современных БПЛА на электротяге) Rotunbot RT-G может развивать скорость до 38 км/ч, а разгоняется до 30 км/ч всего за 2,5 с. Предполагается, что таким образом он может преследовать убегающих правонарушителей и настигать их на открытой местности без преград, ибо скорость бега человека в среднем 10–12 км/ч. Устройство может менять направление движения за счёт асинхронного вращения двигателей по тому же принципу, как разворачиваются транспортные установки на гусеничном шасси или тележки-транспортёры.

Особенные возможности

Rotunbot RT-G приспособлен для ближнего и контактного действия, включая контртеррористические операции. Для внешних аудио и световых эффектов аппарат дополнен проблесковыми маячками и сиреной, СГУ (громкоговорителем-мегафоном мощностью 500 Вт в азиатском стандарте РМРО или примерно 80 Вт по российскому стандарту, что соответствует громкоговорящим устройствам, устанавливаемым на автомобилях ГИБДД) – этого достаточно для уличного применения.

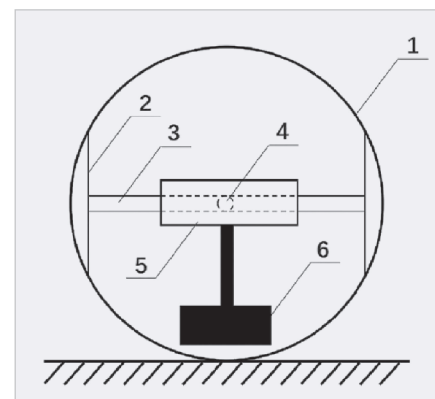


Рис. 5. Блок-схема основных частей устройства: 1 – корпус, 2 – фланец, 3 – главная ось, 4 – дополнительная ось, 5 – рама, 6 – маятник



Рис. 6. Особенности армированного корпуса устройства

Собственный шум при движении моноколеса оценивается экспертами на уровне 15–25 дБ, что по нижней границе примерно соответствует шуму от комнатного электрического кондиционера (сплит-системы) и по верхней границе максимального уровня – движению типичного современного уличного электросамоката. В любом случае, это крайне небольшие значения шума.

Стоимость производства одного экземпляра устройства (в зависимости от комплектации, опций) в пересчёте с китайских юаней на российские рубли составляет 4,6–6,08 млн. Сейчас разработка проходит испытания: полицейские знакомятся с потенциальным роботом-напарником, испытывают его на прочность и имитируют различные сценарии с участием «колобка», проверяя, как он поведёт себя в тех или иных ситуациях, например, при задержании преступников. Отмечается, что к этой технологии уже проявили интерес представители стран Ближнего Востока.

Средства защиты робота Rotunbot RT-G

Действительно, представленный робот с учётом своей конструкции может переплывать небольшие речки и пруды без погружения, когда движение на поверхности воды длится несколько



Рис. 7. Примеры электронной стабилизации изображений с видеокамер, позволяющей избежать искажений из-за естественной вибрации в движении. Слева – оригинальные кадры, справа – изображения после обработки встроенным ПО с ИИ, окончательно записываемые в электронную память устройства



Рис. 8. Скрин элемента видеопрезентации китайского роботизированного полицейского в открытом доступе

минут, то есть с шириной водной преграды или акватории 5–50 метров. Точные данные об устойчивости устройства на воде и под водой пока не получены, хотя наш корреспондент запросил по электронной почте производителя о подробностях конструкции. Пока известно только о том, что класс влагозащиты устройства 8, пылезащиты – 6, то есть IP68 по международной классификации Ingress Protection Rating (степень защиты от проникновения внешних воздействий). В России обозначение степеней защиты нормируется ГОСТ14254-2015 «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками» (IEC 60529:2013). Под «оболочкой» подразумевается элемент, обеспечивающий защиту оборудования от внешних контактов и воздействий. Записывается как IPXY, где X – степень защиты от пыли и твердых предметов: 0–6, а Y – степень защиты от влаги: 0–9.

На своём презентационном видеоролике производитель показывает, что устройство «движется в воде» (рис. 8).

Условные недостатки

Эффективно и даже быстро колесо в воде двигаться не может, если даже увеличить скорость его вращения в десятки раз: оно «взбивает» воду, не погружаясь, но и не двигаясь вперед. В конструкции Rotunbot RT-G имеются два винта, благодаря которым устройство способно пересекать небольшие водные препятствия. Но также необходимы дополнительные (и обираемые) лопатки на поверхности колеса (на манер рёбер на различных транспортёрах) или хотя бы подкрылки к моноколесу. В этом смысле к производителю остаётся много вопросов, тем не менее факт создания и апробации устройства Rotunbot RT-G со всеми его анонсированными возможностями более не подлежит сомнению.

Подвижный робот может закатываться на возвышения и преодолевать небольшие уступы, приспособлен для перемещения по грязи, слякоти и лёгкому бездорожью, главное, избегать загрязнения датчиков и камер.

Этим недостатком страдают почти все системы визуального наблюдения с электронной начинкой. Решают проблему загрязнения оптических поверхностей и увеличительных линз-коллиматоров по-разному: с помощью специальных покрытий и материалов, «растворяющих» элементы осадков природного происхождения, песка и пыли, защитных экранов (даже с применением напыляемой плёнки из реагентов), специальных форсунок с автоматическим распыливанием чистящего состава (как во взрыво- и пожарозащищённых и антивандалных устройствах – об этом мы писали в [1]) с применением фильтров, специально рассчитанных по спектральному анализу, и, кое-где ещё по старинке, вручную с помощью лестницы и человека, очищающего объектив камеры.

Эти известные способы хороши для применения на стационарных видеокамерах наблюдения и даже уличных светофорах. Но что касается видеокамер, фиксирующих происходящее, установленных на подвижных устройствах, тут пока остаётся огромный потенциал для совершенствования защитных методов оборудования и конструкторских инноваций. В представленном робо-ассистенте видеокамеры защищены экраном из пуленепробиваемого стекла, который можно периодически протирать от накопившихся брызг и загрязнений.

Из-за условной тяжести (125 кг) и особенностей конструкции рассматриваемое моноколесо вряд ли сможет преодолеть крутой подъём, уклон выше 7° или самостоятельно взобрать-

ся на лестницу. Однако конструкторы работают над решением этих проблем.

Выводы и перспективы

Борьба с правонарушителями – не единственная область, где будет востребована разработка. Благодаря высокой прочности устройство Rotunbot RT-G уже позиционируется как элемент военной тактики, перспективный беспилотный помощник для служб охраны.

Косвенно распространение «самодвижущегося полицейского помощника» позволит исключить человеческий фактор в простых и прогнозируемых служебных обстоятельствах, то есть со временем, во-первых, сэкономить на сотрудниках, работающих на должностях без высокой квалификации, и в целом привести к экономии бюджетных или коммерческих средств. Во-вторых, не за горами то время, когда вокруг нас будут нести службу целые подразделения подобных охранных роботов.

В этой области надо отметить огромные перспективы применения в различных силовых службах, в пенитенциарной системе, в пограничной службе и многих других случаях, все из которых не перечислить. Вполне возможно, что в перспективе фактор моноколеса будет изменён, чтобы соответствовать тем или иным задачам. Также будет усовершенствован и дополнен функционал устройства.

К примеру, технически электронную систему дополняют беспроводной связью со стационарным удалённым сервером, способностью самостоятельно обнаруживать правонарушителей по полученному с видеокамер изображению с помощью встроенной системы распознавания лиц. В случае необходимости робо-ассистенты смогут кооперироваться друг с другом в процессе преследования, погони, патрульного

наблюдения или задержания разыскиваемых лиц.

При этом общее управление роботами может осуществляться с единого поста всего одним или несколькими сменными операторами. Такими операторами могут быть даже не аттестованные сотрудники полиции, а лишь те, кто и сейчас обеспечивает контроль в службе мониторинга: анализирует информацию с тысяч видеокамер, установленных в крупных городах для обзора каждого перекрёстка, каждого подъезда многоквартирного дома. Сами патрули, состоящие из роботов-полицейских, можно будет запускать дистанционно по управляемому маршруту.

Огромные перспективы видятся также в спасательных работах, радиационном мониторинге, оценке загрязнения воды, обезвреживании взрывных устройств. В быту на базе шаровидного робота можно создавать управляемые детские игрушки-конструкторы для сборки домашних роботов модульным способом.


Благодаря развитой технологии беспроводной связи в реальном времени собранная подвижным роботом информация будет оперативно переда-

ваться оператору на терминал управления, а умение действовать в разных средах (к примеру, на воде) добавит возможностей для того, чтобы задействовать усовершенствованные прототипы Rotunbot RT-G для патрулирования не только улиц, но и акваторий, а также взрыво-, химико-, агрессивных и пожароопасных сред. Разумеется, для этого будет усовершенствована и правовая база. Так что граждан ждёт множество изменений в рассматриваемой сфере в ближайшие 10–20 лет.

Строго говоря, мировой и стремительно развивающийся рынок робототехники представлен не только полицейскими роботами (этот пример скорее специфический), и не только в КНР. Много научных институтов и небольших компаний-разработчиков работают в сфере робототехники. Также и в России есть достойные, правда, пока только «выставочные» и не массовые примеры перспективных моделей – результатов роботостроения, в частности, такие презентации новинок регулярно проводит Сбербанк. Но если сравнивать развитие рынка робототехники в мировых странах, наибольших успехов продолжают добиваться именно в Поднебесной.

Массовое производство ИИ-роботов с большим функционалом также запустили в китайском стартапе Agibot. Китайская компания DEEP Robotics представила новинку в линейке разработанных роботов Luyx: среднеразмерного робота-собаку с колёсами. В лаборатории Robotics X Lab разработали прототипы ходяче-колёсных роботов Tencent и Olli, разработанных для помощи обездвиженным или пожилым людям и пациентам с ОВЗ. Человекоподобные роботы типа GR-1 производственной компании Fourier Intelligence тоже позиционируются как роботы-помощники в быту и медицинской сфере.

Литература

1. *Кашикаров А.* Конструктивные особенности антивандального и взрывозащитного оборудования // СТА. 2024. № 2. URL: <https://www.cta.ru/articles/cta/obzory/179886/>.
2. Последнее дело «знатоков» – тайны песни «Незримый бой». URL: <https://dzen.ru/a/Xd1FODESq2DHNZKQ>.
3. Rotunbot RT-G: The Robotic Ball Chasing Criminals on Land and Water / Китайское видео и краш-тест. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=PTg-mzgXST4>. 

НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

IBM и AMD сотрудничают для разработки новой архитектуры, объединяющей квантовые вычисления и технологии суперкомпьютеров

В августе 2025 года руководители компаний объявили о сотрудничестве, направленном на создание квантово-ориентированных суперкомпьютеров следующего поколения, которые интегрируют квантовые вычисления с высокопроизводительными системами (HPC).

Инженеры планируют исследовать возможности интеграции квантовых технологий IBM с процессорами, графическими ускорителями и программируемыми вентильными матрицами (FPGA) AMD. Также будет изучена роль открытых экосистем, таких как Qiskit, в разработке новых алгоритмов, использующих преимущества квантово-ориентированных вычислений. Речь идёт о создании масштабируемых открытых платформ, способных, по утверждению разработчиков, переопределить будущее вычислительных технологий.

Совместная ИТ-инфраструктура IBM и AMD ускорит исследования в фармацевти-

ке, материаловедении, оптимизации и логистике. Первые результаты проекта планируются представить уже в 2025 году.

Генеральный директор IBM Арвинд Кришна отметил: «Квантовые вычисления открывают новые возможности для моделирования природных процессов и хранения информации. Объединение квантовых компьютеров IBM с передовыми технологиями AMD создаёт гибридную ИТ-модель, способную преодолеть ограничения классических вычислений».

Глава AMD Лиза Су подчеркнула: «Высокопроизводительные вычисления лежат в основе решения ключевых глобальных задач. Сотрудничество с IBM и исследование интеграции HPC-систем с квантовыми технологиями открывают огромные возможности для ускорения научных открытий».

В июне 2025 года IBM и японская национальная исследовательская лаборатория RIKEN представили первую за пределами США систему IBM Quantum System Two, подключённую непосредственно к суперкомпьютеру Fugaku. Система использует 156-кубитный процессор Heron, который превосходит предыдущее поколение по частоте ошибок и скорости, выполняя операции в 10 раз быстрее.



Эта интеграция позволяет разрабатывать гибридные квантово-классические рабочие процессы для решения задач, недоступных отдельно квантовым или классическим компьютерам. Инженеры IBM отмечают, что их цель – создание практических гибридных решений для научного и промышленного применения.

Директор Quantum-HPC RIKEN Мицухиса Сато пояснил, что тесная интеграция систем позволяет разрабатывать параллельные рабочие нагрузки, протоколы связи с минимальной задержкой, а также передовые процессы компиляции. Это обеспечивает эффективное распределение вычислений между квантовыми и классическими компонентами в зависимости от их преимуществ для конкретных частей алгоритма.





Медиапортал СЭТА

Современная Электроника и Технологии Автоматизации



ТОВАРИЩ!
БИЗНЕС РОСТ ЗАМЕДЛИЛ?

РАНО ВПАДАТЬ В СТУПОР!

НУЖНО КРИЧАТЬ О СЕБЕ НЕМЕДЛЯ,

А МЫ

ОБЕСПЕЧИМ РУПОР!



Журналы

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



Видеоканалы

YouTube, RuTube, VK – предоставляют вам возможность интересно рассказать о себе



Медиапортал

Это ваши новости и статьи, оперативно доставленные по адресу



Конференции

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



Дизайн-студия

Дизайнеры и верстальщики сделают для вас эффективную рекламу, баннер, ролик



СОВРЕМЕННАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА

Издательство «СТА-ПРЕСС» +7 (968) 567-30-06 / shop@cta.ru / www.cta.ru

Приглашаем вас к сотрудничеству!



Специализированные конференции

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ 2025-2026

Промышленная автоматизация

Цифровизация производства

Интернет вещей и большие данные

Искусственный интеллект

Информационная безопасность

Автоматизация зданий и инженерных систем

2025

24.09

4-я специализированная конференция

ПТА – ЧЕЛЯБИНСК

29.10

15-я специализированная конференция

ПТА – НОВОСИБИРСК

2026

11.02

21-я специализированная конференция

ПТА – ЕКАТЕРИНБУРГ

24.03

7-я специализированная конференция

ПТА – КАЗАНЬ

26–27.05

17-я специализированная конференция

ПТА – САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

22.09

5-я специализированная конференция

ПТА – УФА

27.10

16-я специализированная конференция

ПТА – НОВОСИБИРСК

www.pta-expo.ru