WWW.CTA.RU

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

2
2025

Электронная версия этого журнала

МНЕ СВЕРХУ ВИДНО ВСЁ:
видео с FPV-дрона в реальном времени

В НОМЕРЕ:

О БИЗНЕС-ПРОЦЕССЕ ЗАМОЛВИТЕ СЛОВО:
электроника мирового уровня в России

ПОСЧИТАЕМСЯ:
нейросети VS квантовые вычисления – союз или конкуренция?

Медиапортал СЭТА

Современная Электроника и Технологии Автоматизации

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

СТА Современная Электроника

Издательство «СТА-ПРЕСС» +7 (968) 567-30-06 / shop@cta.ru / www.cta.ru

Приглашаем вас к сотрудничеству!

2231 десятилетие науки и технологий

22—25 апреля 2025

СВЯЗЬ

37-я Международная выставка «Информационные и коммуникационные технологии»

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

www.sviaz-expo.ru

Россия, Москва, ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»

12+
Реклама

Организатор

ЭКСПОЦЕНТР

Под патронатом

ТПП РФ

В рамках

Российская неделя высоких технологий РНВТ

Здравствуйте, уважаемые друзья!

В этом выпуске журнала мы продолжаем повествование о научном наследии Жореса Алфёрова. Читайте о полупроводниковых лазерах на базе массивов квантовых точек – одной из самых перспективных технологий, которую начиная с 70-х годов прошлого века развивал Алфёров.

Хотим представить вашему вниманию свежую книгу Евгения Липкина «Производство мирового уровня. Путь к эффективности российского приборостроения». Эта книга – плод многолетней практической деятельности автора по организации эффективного производства в сфере радиоэлектроники. Она полна ценных идей и поможет вам совершить меньше ошибок на тернистом пути оптимизации вашего бизнеса.

О Семёне Моисеевиче Айзенштейне известно гораздо меньше, чем о выдающемся изобретателе радио Попове, тем не менее Айзенштейн успел внести значительный вклад в индустрию развития радио в молодой Стране Советов. Читайте очерк о нашем выдающемся соотечественнике.

Оптимальный выбор видеопередатчика для FPV-дрона – задача не такая тривиальная, как может показаться на первый взгляд. Представляем вашему вниманию формализованный подход, приводящий к хорошим результатам.

Читайте в этом журнале дискуссионную статью о сравнительной перспективности нейросетевых и квантовых технологий, материал об интересной и легко реализуемой системе интеллектуального освещения, об усовершенствовании магнитотерапевтической установки на базе программируемого реле, а также о многом другом.

Посетите наш обновлённый информационный портал www.cta.ru, подписывайтесь на наши каналы в Телеграм, ВК, на RuTube, YouTube и на Дзене!

Спасибо, что остаётесь с нами, читайте с удовольствием.
Всего вам доброго!

Юрий Широков, главный редактор

Мы в соцсетях!

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
Обложка Д. В. Юсим
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

СОДЕРЖАНИЕ 2/2025

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

Выставка «СВЯЗЬ-2025» 1

Остек-СМТ 4

Эркон 51

ФОРМУЛА УСПЕХА

4 Эффективное производство: а что, так можно было?

Евгений Липкин

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

6 Жорес Алфёров – учёный, благодаря которому работает большинство современных полупроводниковых лазеров. Часть 4. Полупроводниковые лазеры на базе массивов квантовых точек

Виктор Алексеев

18 Семён Айзенштейн в истории радио и электроники

Андрей Кашкаров

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

22 Методика рационального выбора видеопередатчика для БПЛА FPV-типа

Александр Ананьев, Наиль Кузияров, Сергей Пилкин

КОМПЕТЕНТНОЕ МНЕНИЕ

28 Съест ли ИИ квантовый компьютер на обед

Эдд Гент

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

34 РЭА особого назначения: системы электронного мониторинга подконтрольных лиц (СЭМПЛ)

Ухум Исыкуев

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

46 Магнитотерапевтическая установка на базе промышленного программируемого реле

Сергей Шишкин

52 Интеллектуальное освещение

Олег Вальпа

На правах рекламы

Эффективное производство: а что, так можно было?

«Я написал эту книгу ради того же, ради чего я работаю, – чтобы помочь российским компаниям из сферы приборостроения в сложившихся непростых условиях проложить правильный путь к светлому будущему. Надеюсь, она станет вашим помощником, подручным инструментом и путеводной звездой на пути к большим переменам, которые происходят уже сейчас или с которыми ещё предстоит столкнуться. Я искренне верю, что российское приборостроение может занять значимое место на мировом рынке».

Евгений Липкин

Последние несколько лет по понятным причинам в РФ можно наблюдать взрывной рост объёмов импортозамещения. Скептическое отношение ко всему отечественному постепенно сменяется энтузиазмом и верой в себя, обусловленными несомненными успехами на этом поприще. Однако в эйфории успеха отечественные компании часто недооценивают значимость анализа уязвимостей своего бизнеса. К счастью, если есть общие проблемы, появляются и пути их решения. Специалисты из многих отраслей, в том числе и сферы радиоэлектроники, делятся своим опытом в попытке помочь российским производствам в сложившейся обстановке.

Так, в конце прошлого года на отечественных площадках появилась новая книга Евгения Липкина «Производство мирового уровня. Путь к эффективности российского приборостроения», посвящённая созданию современных передовых производств в сфере радиоэлектронной аппаратуры (рисунок).

Сам термин «производство мирового уровня» укоренился в отечественном лексиконе относительно недавно, и его смысл ранее был неочевиден. Его можно интерпретировать как «производство, которое может производить продукцию по техническим и потребительским свойствам, уровню качества и стоимости сопоставимые с продукцией ведущих мировых игроков в конкретном своём сегменте».

Об этом пойдёт речь, но сначала пара слов о самом авторе: Евгений Липкин – эксперт с более чем двадцатилетним опытом работы в области промышленных технологий и автоматизации производства. Упомянутая книга – не первая работа Евгения. Его «Индустрия 4.0: Умные технологии – ключевой элемент в промышленной конкуренции» была издана ещё в 2017 году. Новая работа стала итогом многолетнего практического опыта по организации производственных процессов на основе анализа отечественного и мирового рынков. В первую очередь, в ней нашли отражение актуальные и острые проблемы отечественной сферы приборостроения.

Книга является попыткой проанализировать состояние российской радиоэлектроники, а также обозначить ключевые факторы успеха ведущих мировых игроков на глобальных рынках. На основе этого анализа автор стремится выработать оптимальную стратегию, которая поможет нашим предприятиям приблизиться к мировым показателям конкурентоспособности. Автор затрагивает множество аспектов деятельности отечественных компаний. Как следствие, работа состоит из нескольких разделов, рассматривающих производство как часть бизнеса, исходные позиции (особенности российского и мирового производства), наш путь и обзор домашнего рынка, Индустрию 4.0 и её реализацию в РФ, управление качеством, экономику производства мирового уровня и кадровый вопрос.

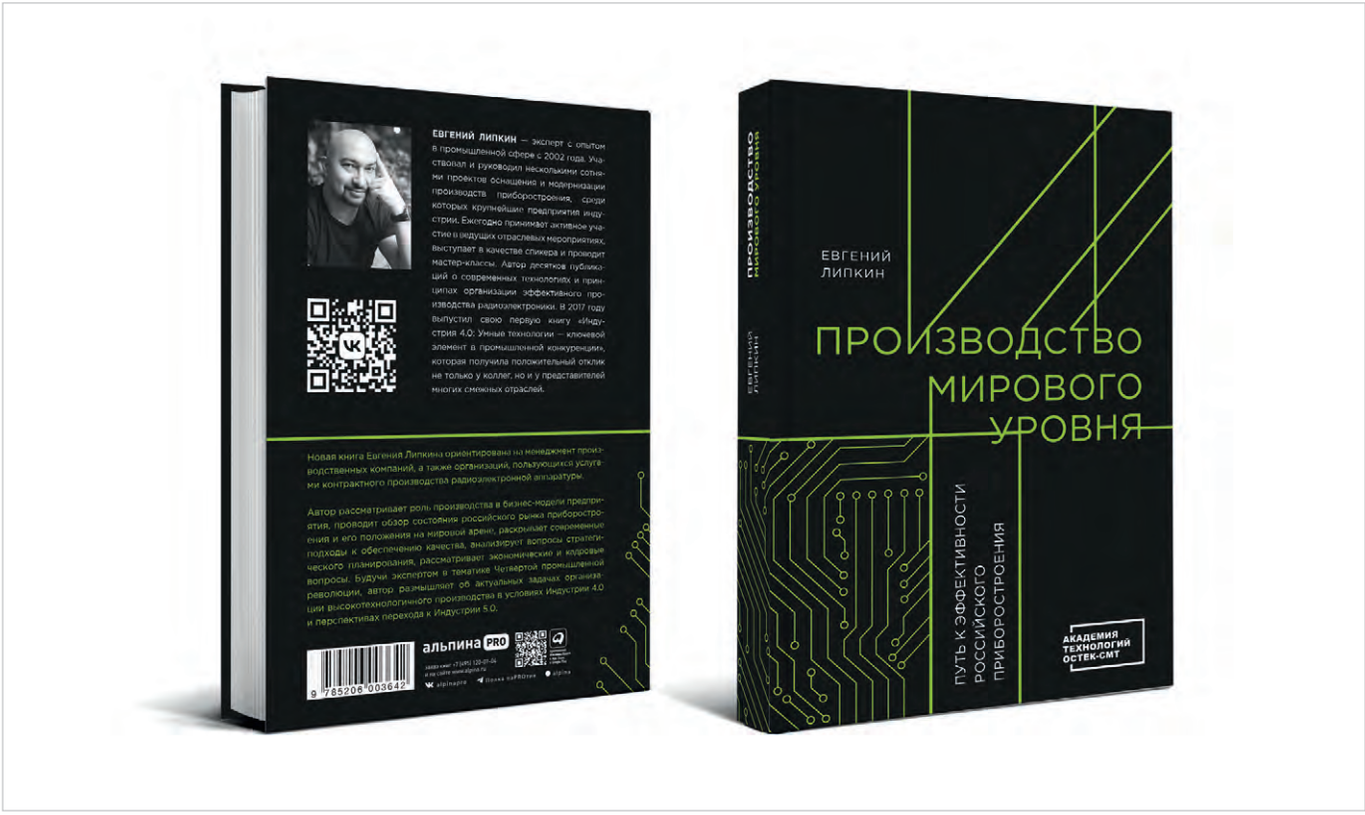
Каждый из разделов книги раскрывает особенности создания «производства мирового уровня», намечает подходы к его практической реализации. Но представим, что вы освоили лучшие иностранные практики, – а что дальше? Поможет ли это каждому участнику рынка в отдельности удерживаться на должном уровне, не сдавая позиции? Или достижение успеха – задача, которую можно осилить лишь сообща? Предлагая строить передовые производства совместными отраслевыми усилиями, автор книги пытается наметить ключевые аспекты для такого строительства.

Мировой уровень как цель

Но прежде чем озадачиваться вопросами достижения конкурентоспособности, стоит задуматься – а всегда ли целесообразно развивать собственное производство? В современных реалиях, когда производителю приходится рассчитывать только на себя, очень важно чётко понимать, что и зачем он делает, как он планирует развивать бизнес и к чему в итоге хочет прийти. Разумеется, на этом пути важно оценивать потенциальных конкурентов и понимать, с кем из них и за что придётся бороться на рынке. В книге подробно рассматривается и мировой опыт крупных зарубежных компаний: ведь так или иначе представители отечественной сферы приборостроения равняются на успешных иностранных коллег. Вы узнаете, насколько полезно сравнивать себя с мировыми игроками и как чужой опыт может помочь компаниям в их работе.

Особенности домашнего рынка

Бизнес меняется, развивается, учитывая рыночные тренды, но предстоит ещё большая работа по наращиванию конкурентоспособности, которую отечественным компаниям придётся пройти в первую очередь в плане самоорганизации. Разумеется, российское приборостроение имеет свои особенности, сформировавшиеся за многие годы. Строя производство мирового уровня, способное конкурировать с ведущими мировыми игроками рынка, об этих особенностях забывать нельзя. Как выглядит «наш путь» и какие подводные камни могут встретиться отечественным специалистам – всё это также нашло отражение в книге.



Индустрия 4.0 и далее

Являясь экспертом по теме Индустрии 4.0 и беря за основу предыдущий опыт, в своей новой работе автор уделил внимание размышлениям об актуальных проблемах цифровизации приборостроительного производства и перспективах перехода к Индустрии 5.0, которая (при правильном подходе) позволит повысить гибкость производства, скорость процессов, качество результатов. Однако далеко не всегда руководители производств понимают, зачем реально необходим переход к цифровизации и как с выгодой воспользоваться её преимуществами – превратить цифры и данные в реальные инструменты повышения гибкости, качества и производительности труда, экономической эффективности и уровня клиентского сервиса. Без внедрения принципов, лежащих в основе Индустрии 4.0 и грядущей Индустрии 5.0, системные вопросы эффективности решить невозможно.

Качество – залог успеха

Теме качества в книге уделено особое внимание, поскольку именно итоговое качество продукта или услуги является индикатором правильности выбранного подхода к организации бизнеса. Качество должно быть прогнозируемым. Многие мировые производители используют подходы, помогающие управлять жизненным циклом продукции. Это позволяет стимулировать рыночный спрос и повышать технический уровень и технологичность своего предложения. Важно также применять маркетинговый подход и анализ рынка с выявлением уровня соотношения необходимых клиентам цены/качества, учитывающих в том числе и экономику всего процесса, потому как качество бесплатно не даётся.

Комплекс управления качеством должен быть выстроен с учётом текущих мировых тенденций, технологий и лучших практик ведущих игроков. В книге подробно рассмотрен подход к управлению качеством продукции, технологическим контролем, а также пути обнаружения брака с работой над ошибками и анализом данных.

Производство делают люди

Работа с кадрами является важным аспектом на пути к передовому производству мирового уровня. Не секрет, что в отрасли радиоэлектроники, как и во многих смежных отраслях, стоит проблема дефицита кадров. Нехватка специалистов с каждым годом становится острее, а фундаментальное решение проблемы не может быть быстрым: для этого должна быть проведена масштабная работа в рамках всей отрасли. Автор рассматривает особенности работы с персоналом в России, необходимость и способы привлечения молодых специалистов, стратегии и общее влияние технологий на рынок труда.

Заключение

В заключение скажем, что эта книга, по утверждению самого автора, – не «сборник советов», а помощник-путеводитель для российских компаний из сферы приборостроения на пути к светлому будущему. Это не готовый рецепт, но попытка помочь идеей, направить, подсказать. Конечно, каждой компании предстоит проделать свой уникальный путь к построению передового производства. Сейчас мы находимся в активной фазе технологического суверенитета. Чтобы стать конкурентоспособными в будущем, надо выйти на показатели качества, надёжности, рентабельности, сопоставимые с лучшими мировыми игроками. Ведь рано или поздно границы вновь станут прозрачными, и все ли отечественные предприятия выстоят тогда в условиях обострившейся конкуренции? Сейчас самое время подготовиться к этому вызову.

Книга Евгения Липкина «Производство мирового уровня. Путь к эффективности российского приборостроения» доступна в электронной версии в книжных онлайн-магазинах.

Жорес Алфёров – учёный, благодаря которому работает большинство современных полупроводниковых лазеров

Часть 4. Полупроводниковые лазеры на базе массивов квантовых точек

Виктор Алексеев

В марте 2025 года исполняется 95 лет со дня рождения выдающегося российского учёного Жореса Ивановича Алфёрова. Разработанные им полупроводниковые инжекционные лазеры на основе гетероструктур с квантоворазмерными эффектами занимают сегодня первое место среди всех типов лазеров по количеству используемых в различных отраслях науки, техники и промышленности.
Жорес Алфёров – автор более 500 научных работ, рассмотреть и обобщить которые не представляется возможным на страницах этого журнала. Мы постарались в цикле статей, посвящённых этому легендарному физику, отметить те научные достижения, за которые он в 2000 году был удостоен высшей награды в области естественных наук – Нобелевской премии. Основные факты биографии и предпосылки научной деятельности Алфёрова приведены в СОЭЛ № 8, 2024. Разработкам полупроводниковых инжекционных ДГС-лазеров, а также лазеров на основе квантовых плоскостей и квантовых проволок посвящены статьи в номерах журнала № 9, 2024 и № 1, 2025.
В этой, заключительной части рассматриваются разработки лазеров на основе массивов квантовых точек, выполненные Жоресом Алфёровым за период 1970–2000 гг. Этот краткий обзор заканчивается статьёй 2000 года, последней, которая была принята во внимание Нобелевским комитетом при рассмотрении кандидатов на премию по физике 2000 года. Жорес Иванович Алфёров ушёл из жизни в 2019 году. За это время он успел сделать ещё очень много интересных научных работ, рассмотрение которых выходит за рамки данной публикации.

Полупроводниковые гетероструктуры на основе массивов квантовых точек

Как отмечалось выше, в 1981 году Алексей Екимов с коллегами в «ГОИ им. С.И. Вавилова» впервые в мире получили локализованные в стекле микрокристаллы CuCl (10–100 Å), показавшие устойчивый квантово-размерный эффект с нулевым показателем (0-DOF). Позже эти нанокристаллы получили название «квантовые точки» (Quantum Dots – QD) [1].

Через год Луис Брюс (Louis Brus), используя синтез и осаждение из коллоидных растворов, получил в своей лаборатории (AT&T Bell Laboratories) обособленные твёрдые химически стабильные микрокристаллы сульфида кадмия размером около 3–4 нм. Эти нанокристаллы проявляли устойчивый повторяющийся квантово-размерный эффект (0-DOF) [2].

Основная заслуга группы Луиса Брюса заключалась в том, что им удалось найти способ, с помощью которого можно было получать в виде чистого сухого порошка полупроводниковые обособленные квантовые точки, покрытые химически связанными органическими лигандами. Эти нанокристаллы позже получили название «коллоидные квантовые точки» [3–5].

В начале 1990-х Мунги Бавенди (Moungi Gabriel Bawendi) со своими коллегами из MIT (Massachusetts Institute of Technology) разработали технологию массового синтеза квантовых точек, которая была названа «высокотемпературный металлоорганический синтез с использованием горячего впрыска» (Organometallic Chemical Hot Injection) [6].

Алексей Екимов, Луис Брюс и Мунги Бавенди получили в 2023 году Нобелевскую премию за открытие и разработку квантовых точек.

Более подробно эти вопросы рассмотрены в предыдущих номерах журнала (СОЭЛ № 2, 4, 5, 2024) [7].

Необходимо чётко различать три термина «квантовые точки» (Quantum Dots), используемые в литературе. Идеальные квантовые точки (ИКТ) – это теоретическая абстракция, которая используется для моделирования и рассматривается как абсолютно однородная наноструктура с квантовым ограничением по всем трём направлениям. Именно «идеальная квантовая точка» подразумевается, когда говорят об «искусственном атоме». Поэтому ИКТ имеют строго линейчатый дискретный энергетический спектр, аналогичный спектру одиночного атома.

Квантовые точки, открытые Луисом Брюсом и представляющие собой отдельные полупроводниковые нанокристаллы с размерами 5–10 нм, покрытые защитной оболочкой, правильнее было бы называть «коллоидные ККТ» (Colloidal Quantum Dots – CQD). Следует подчеркнуть, что в одной обособленной коллоидной квантовой точке могут содержаться сотни тысяч атомов вещества полупроводника.

Одним из уникальных свойств CQD является квантово-размерная фотолюминесценция (КРФЛ). Благодаря этому свойству CQD в ответ на ультрафиолетовое излучение испускает свет, длина волны которого зависит от размера самой квантовой точки. Это свойство широко используется в таких компонентах современной электроники, как, например, светодиоды, матрицы и экраны на основе ККТ.

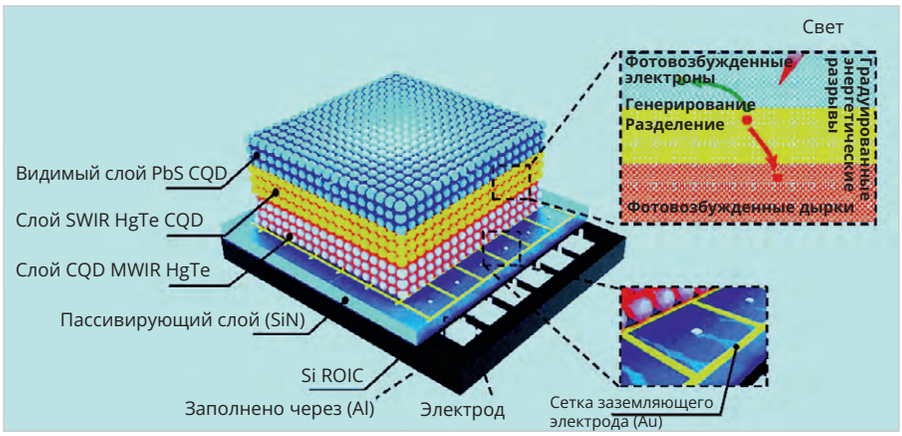


Рис. 1. Структурная схема сверхчувствительного тепловизора с конструкцией фотодетектора, в которой слои коллоидных квантовых точек вмонтированы в специальную интегральную схему

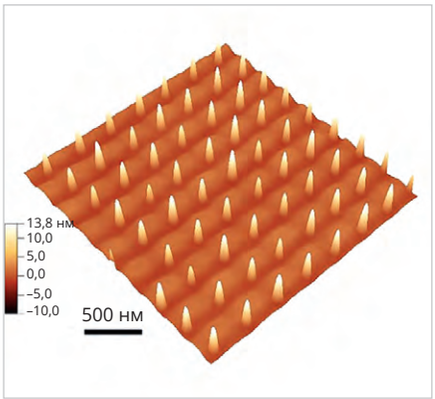


Рис. 2. Микрофотография, полученная с помощью 3D атомно-силового микроскопа (АСМ) для структурированного массива самоорганизующихся квантовых точек InAs, выращенных на подложке GaAs методом MBE-DLIP

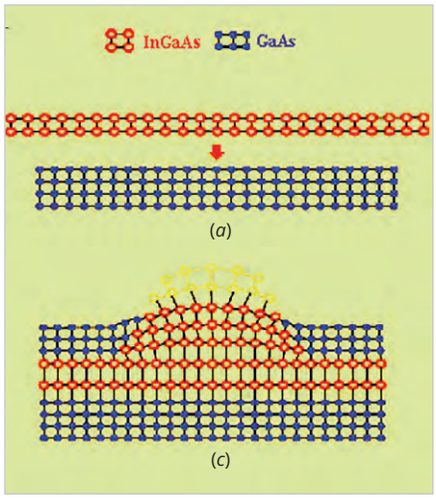


Рис. 3. Этапы морфологических изменений плёнки InGaAs при нанесении на подложку GaAs методом «Странски–Краштанова»

В настоящее время существуют технологии нанесения коллоидных квантовых точек (CQD) на слои подложек толщиной до 1 мкм. Подобные методы позволяют интегрировать коллоидные квантовые точечные фотодиоды непосредственно в полупроводниковые металл-оксидные интегральные схемы. На рис. 1 показана структурная схема сверхчувствительного тепловизора, способного обрабатывать инфракрасный образ объектов, излучающих в диапазоне 400–1300 нм с разрешением 640×512 пикселей (40 пар линий на миллиметр) при передаточной функции модуляции 50%. Такие фантастические характеристики получены благодаря конструкции фотодетектора, включающей слои CQD, вмонтированные непосредственно в специально разработанную интегральную схему [8].

К другому классу устройств на основе КТ можно отнести массивы полупроводниковых КРЭ-нанокристаллов, включённых в монокристаллическую объёмную матрицу другого полупроводника. Такие гетероструктуры содержат квантовые точки с узкой запрещённой зоной, выращенные на подложке из полупроводника с широкой запрещённой зоной.

Обычно такие гетероструктуры содержат чередующиеся слои квантовых точек, разделённые слоями буферного полупроводника.

В качестве примера на рис. 2 показана микрофотография, полученная на 3D атомно-силовом микроскопе (АСМ) для структурированного массива самоорганизующихся квантовых точек InAs, выращенных на подложке GaAs. Эта гетероструктура на основе КТ была создана с помощью современного метода «молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием прямого лазерного интерференционного формирования структуры» (Molecular Beam Epitaxy Assisted by Direct Laser Interference Patterning MBE-DLIP). Подобные матричные КРЭ-гетероструктуры содержат миллионы одиночных пирамидообразных квантовых точек [9].

Именно эти гетероструктуры на основе квантовых точек используются в полупроводниковых инжекционных лазерах, разработкам которых посвятил свою жизнь Жорес Алфёров.

Необходимо подчеркнуть, что для использования в полупроводниковых лазерах необходимы гетероструктуры, содержащие огромное количество однородных квантовых точек с размерами меньше длины волны де Бройля, плотно упакованных в кристаллическую полупроводниковую матрицу. Достаточно успешно, однако далеко не полностью на 100%, эту проблему удалось решить только в наши дни (рис. 2). На это потребовалось около тридцати лет напряжённых поисков и неудачных попыток.

Попытки изготовления таких структур регулярно предпринимались с начала 1990-х годов, однако ни одна из известных в то время технологий не позволяла изготовить CQD с параметрами, близкими к идеальной квантовой точке. Массивы квантовых точек получались неоднородными, а энергетические спектры были размыты [10].

Ситуация резко изменилась после «реинкарнации» процесса роста монослойных плёнок на подложках.

В очередной раз подтвердилась истинность формулы научного поиска: «новое – это хорошо забытое старое».

В 1938 году болгарские физики из «Университета Софии» Иван Странский (Иван Николов Странски) и Любомир Краштанов (Любомир Кръстанов) предложили технологию двухэтапного процесса эпитаксиального выращивания тонких плёнок на поверхности кристаллов. Технология получила название по именам авторов «Stranski–Krastanov Growth – SK growth» (Странски–Краштанов, СК) [11].

Эта технология включает два основных этапа (рис. 3).

Сначала на подложку тем или иным способом наносится первый слой целевого вещества (InGaAs). При этом образуется тонкая плёнка

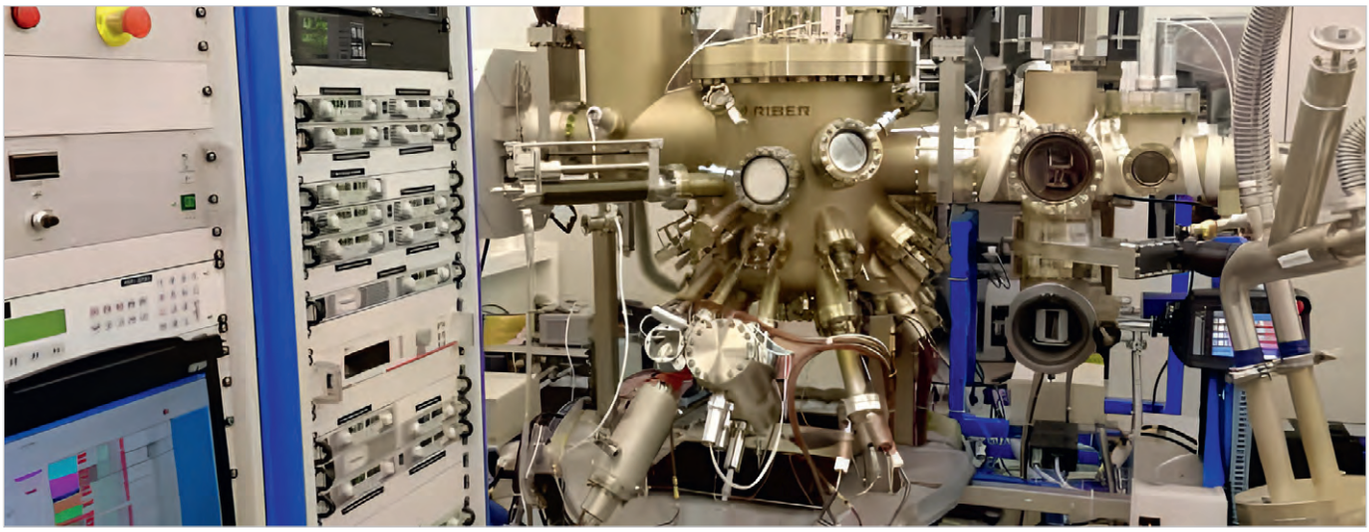


Рис. 4. Современный вариант установки для синтеза полупроводниковых соединений типа A3B5 методом молекулярно-пучковой эпитаксии [12]

на поверхности подложки, получившая название «смачивающий слой» (Wetting Layer). Из-за несоответствия постоянных решёток арсенида галлия и индий-галлий арсенида на поверхности смачивающего слоя образуются дефекты кристаллической структуры.

Далее плёнка наносимого вещества может нарастать, формируя последовательно мономолекулярные слои. Вместе с количеством слоёв накапливаются и напряжения, связанные с дефектами, заложенными в «смачивающем слое». При достижении некоторой «критической толщины слоя», которая зависит от деформации и химического потенциала осаждённой пленки, напряжённые участки плёнки разрушаются, и в этих местах образуются «островки» осаждаемого материала.

Эти островки позднее стали называть «самоорганизующиеся квантовые точки» (Self-Organized Quantum Dots).

Непрерывное продолжение этого процесса приводит к тому, что островки просто поглощаются следующим нарастающим мономолекулярным слоем. Однако было обнаружено, что если процесс прерывался при формировании «зародышей КТ», то островки сохранялись в виде обособленных кристаллических структур с размерами единиц до нескольких десятков нанометров.

Эта схема описывает саму идею метода СК. На практике технология тех времен давала возможность получать только толстые плёнки, содержащие хаотически разбросанные по неравномерной поверхности островки самых разных форм и размеров.

Только с развитием методов «молекулярно-пучковой эпитаксии МПЭ» и «молекулярно-лучевой эпитаксии» стало возможным использование технологии «Странски–Крастанова» для выращивания эффективных КРЭ-гетероструктур. Идея метода МПЭ заключается в том, что в специальном источнике целевое вещество полупроводника испаряется до уровня молекул, которые затем осаждаются на кристаллическую решетку подложки. В процессе МПЭ молекулы или атомы материалов, необходимые для роста, подаются на подложку в виде молекулярных пучков. Это позволяет контролировать состав и толщину слоёв с высокой точностью и выращивать гетероструктуры с моноатомно гладкими границами, заданными профилем легирования.

Необходимо отметить, что реализация данной технологии требует чрезвычайно сложных технических решений, таких, например, как:

- сверхвысокий вакуум в рабочей камере (около 10^{-8} Па);
- процентное содержание целевого полупроводника в напыляемом молекулярном потоке не менее 99,999999%;
- способность молекулярного источника испарять тугоплавкие вещества с возможностью регулировки плотности потока вещества;
- прецизионный контроль скорости роста молекулярной плёнки (±0,2 нм/с).

Современный вариант установки для синтеза полупроводниковых соединений типа A3B5 методом МПЭ показан на рис. 4.

В тех случаях, когда речь идёт о послойном напылении молекулярного слоя полупроводника на подложку, достаточно часто используются в качестве взаимозаменяемых два термина: «молекулярно-пучковая эпитаксия МПЭ» и «молекулярно-лучевая эпитаксия МЛЭ». Однако эти технологические варианты могут иметь некоторые нюансы в определённых приложениях.

В некоторых источниках МЛЭ рассматривается как более широкий термин, включающий различные техники и подходы к эпитаксии, тогда как МПЭ может быть более специфичным методом внутри этого диапазона.

Технология молекулярно-лучевой эпитаксии, так же как и МПЭ, относится к процессу, использующему взаимодействие молекулярных пучков наносимого вещества с подложкой. Однако в технологии МЛЭ подразумевается использование различных источников для испарения материалов, включая твёрдые и газовые источники.

Появление доступных методов МЛЭ и МПЭ в совокупности с модернизированными методиками «SK growth» стимулировало разработки КРЭ-гетероструктур во всём мире.

Первые попытки роста микрокристаллов группы A^3B^5 с использованием этих технологий были начаты в середине 1980-х. Так, в 1985 году в работе [13] были описаны мономолекулярные слои InAs, которые выращивались на подложках GaAs. Французские физики из группы CNET показали, что

сначала рост происходит в плоском режиме с образованием «смачивающего» слоя. При некоторой критической толщине этот планарный рост прерывается, и на поверхности образуются трёхмерные наноразмерные островки InAs.

Прямое экспериментальное подтверждение возможности формирования квантово-размерных микрокристаллов из однородных когерентных островков InGaAs на поверхностях GaAs было получено в 1993 году группой Леонарда Девина [14].

Исследование процесса роста InGaAs на подложке GaAs показало, что, когда рост InGaAs прерывался точно при достижении критической толщины, образовывались квантовые точки InGaAs со средними размерами в районе 30 нм. Плотность точек на поверхности варьировалась примерно от 109 до 1011 единиц на квадратный сантиметр.

В следующей работе (1994 г.) эти же авторы установили, что в результате осаждения InAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии на грани {100} кристалла GaAs самоорганизующиеся когерентные квантовые точки арсенида индия практически одного размера наблюдались только на начальном этапе перехода через критическую толщину, равную 1,50 ML [15].

Напомним, что «monolayer – ML» является наиболее распространённой единицей измерения в этой области и означает один атомный слой материала. Согласно современным уточнённым данным для GaAs 1 ML соответствует приблизительно 3,03 Å (ангстрем).

В настоящей статье невозможно дать даже беглый обзор истории развития гетерогенных структур и инжекционных лазеров на основе массивов квантовых точек. Эти вопросы можно посмотреть, например, в подробной публикации, посвящённой 85-летию Арта Госсарда (Art Gossard), одного из создателей и разработчиков технологий на базе молекулярно-лучевой эпитаксии [16].

В этот период под руководством Жореса Алфёрова и Николая Леденцова были проведены основные экспериментальные и теоретические исследования массивов КТ, использованные в дальнейшем для создания отечественных лазеров на квантовых точках.

За годы своей научной деятельности Жорес Алфёров вместе со своими учениками написали более тысячи научных работ. Рассмотреть все эти публикации не представляется возможным. Ниже кратко отмечены только те статьи группы Алфёрова, которые легли в основу конструкции инжекционного лазера на квантовых точках и являются необходимыми для понимания того вклада, который внёс Жорес Алфёров в развитие и становление этой отдельной бурно развивающейся отрасли.

Использование модернизированной методики МПЭ, разработанной в ФТИ им. Иоффе, позволило сотрудникам группы Алфёрова получить квантово-размерные AlGaAs/GaAs – гетероструктуры со 100% квантовым выходом излучательной рекомбинации. Результаты измерений фотолюминесценции показали, что внутренний квантовый выход (ВКВ) этих КРЭ-гетероструктур сильно зависит от толщины активной области. Так, в структурах с толщиной более 100 Å при комнатной температуре ВКВ приближается к 100%, а при уменьшении толщины активной области до 50 Å ВКВ падает до 40%. Такую зависимость ВКВ от толщины активного слоя можно было объяснить термическим выбросом носителей и последующей рекомбинацией в волноводных слоях. Верхний предел пороговой плотности излучения в исследованных образцах соответствовал плотности тока 250 А/см^2 [17].

В ходе выполнения исследований массивов КТ, проведённых в ФТИ им. Иоффе в 1990-е годы, например, было доказано, что, контролируя толщину смачивающего слоя и регулируя параметры прерывания процесса роста массивов КТ, можно получать узкое распределение островков «зародышей» КТ по размерам [18].

Квантовые точки InAs в матрице GaAs, полученные методом молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием самоорганизующегося механизма, продемонстрировали узкое распределение размеров отдельных точек пирамидальной формы с основанием 12 ±1 нм и высотой 4–6 нм [19].

В работе [20] массивы квантовых точек InAs/GaAs исследовались с помощью метода катодной люминесценции. Изображения катодолюминесценции позволили напрямую визуализировать отдельные положения точек и рекомбинацию из одной точки. Плотный массив точек (около 10^{11} точек/см^2) показал наличие отчётливого пика поглощения, который практически совпадал с максимумом люминесценции. Полученные результаты показали, что распределение линий катодолюминесценции отдельных квантовых точек InAs в матрице GaAs при температурах около 50К позволяет аппроксимировать плотность электронных состояний с помощью функции, характерной для идеальных квантовых точек [21].

Температурная зависимость морфологических изменений слоёв InAs и $In_{0,5}Ga_{0,5}As$, выращенных методом МЛЭ, рассмотрена в работе [22].

Осаждение при температуре 450–480°C слоёв InAs толщиной от 3 до 7 ML и $In_xGa_{1-x}As$ толщиной от 5 до 10 ML продемонстрировало самообразование хорошо развитых пирамидальных КТ с основанием около 12 нм, которые выстраивались в двумерной квадратной решётке вдоль направления {100}. При температуре осаждения около 320°C самообразующиеся КТ выстраивались преимущественно в направлении {110}.

В работе [23] приведены результаты исследований зависимости пороговой плотности тока от температуры в лазерах на основе КТ (InGa)As/(AlGa)As. Обнаруженный диапазон так называемых «отрицательных характеристических температур» являлся следствием термического выброса носителей из состояний КТ в матрицу и смачивающий слой.

Влияние высокотемпературного отжига (High Temperature Annealing – HTA) на структурные и оптические свойства квантовых точек InAs–GaAs было рассмотрено в [24].

В системе островков, которые являются «зародышами» квантовых точек, имеются два источника упругих напряжений, зависящих от температурных режимов синтеза: напряжение на поверхности, обусловленное рассогласованием параметров решеток, и сильный градиент поверхностного натяжения на рёбрах островков.

Отжиг при более высокой температуре (700°C) структур с двумерными и трёхмерными массивами в квантовых точках (КТ) InAs–GaAs приводит к увеличению размера и соответствующему уменьшению содержания индия в КТ. Соответствующее уменьшение энергии локализации КТ приводит к эффективному испарению носителей из КТ при комнатной температуре.

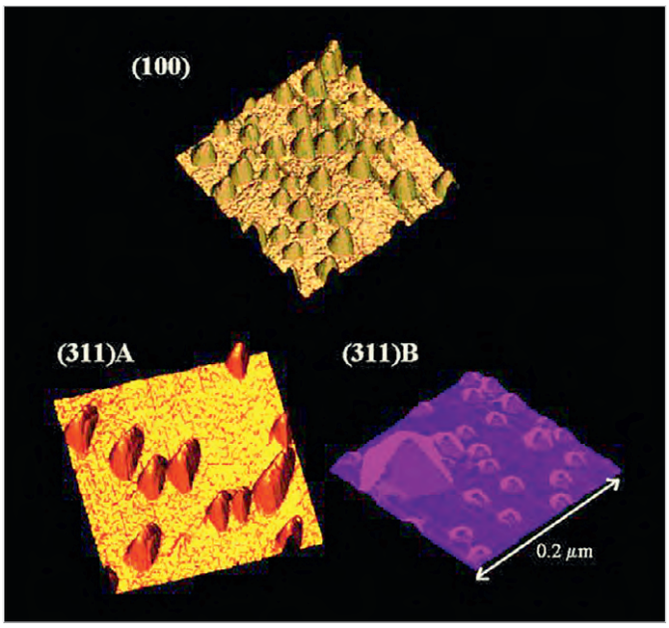


Рис. 5. Снимки сканирующим туннельным микроскопом (200×200 нм) InAs/GaAs КТ, выращенных методом МЛЭ на подложках GaAs {100}, {311A} и {311B}

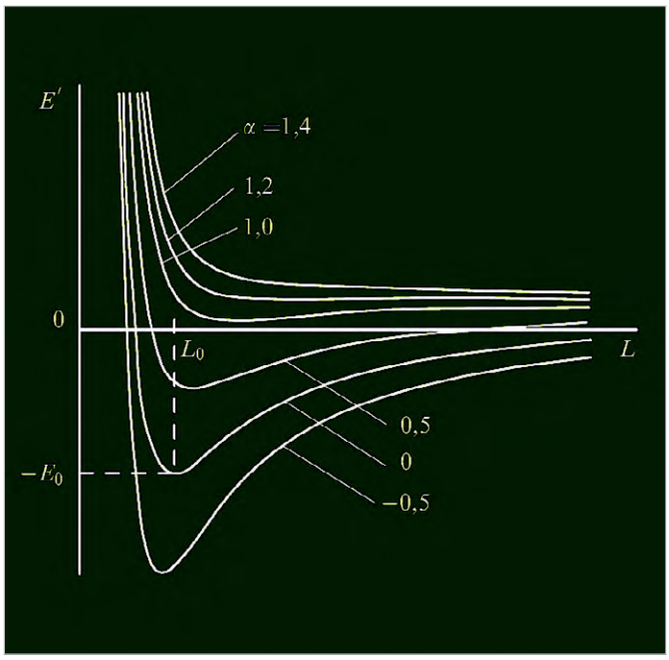


Рис. 6. Зависимость энергии хаотического массива 3D напряжённых островков от размера

В публикации [25] был предложен новый метод, позволяющий создавать напряжённые гетероструктуры на основе InAs/GaAs. Идея этого метода, названного авторами «субмонослойной эпитаксией», заключалась в оптимальном выборе соответствующей грани кристалла подложки таким образом, чтобы получить конечные массивы квантовых точек с заданными параметрами. Было выяснено, что при последовательном нанесении с помощью МПЭ монослоёв InAs и GaAs на подложку GaAs с индексами Миллера {100} и {311} на начальной стадии роста (толщина слоя 1–3 ML) формировались псевдопериодические массивы «квантовых проводов» арсенида индия. Увеличение времени прерывания после каждого цикла роста (2 ML) приводит к образованию квантовых точек, расположенных в двумерной квадратной решётке [26].

Следует подчеркнуть, что правильный выбор грани кристалла во многом определяет качество конечной гетероструктуры массива квантовых точек. В качестве иллюстрации зависимости структуры КТ от ориентации граней подложки на рис. 5 показаны формы самоорганизованных КТ InAs, полученные на разных кристаллографических гранях [27].

Квантовые точки, выращенные на гранях GaAs {100}, имели куполообразную форму. При этом КТ, выращенные на гранях {311A} и {311B}, выглядели в форме наконечника стрелы и пирамиды соответственно.

В статье [28] проанализирована энергетика массива трёхмерных когерентных напряжённых островов на подложке с несоответствующей кристаллической решеткой. Авторы показали, что на поверхности {001} кубического кристалла полная энергия минимальна для 2D периодической квадратной решётки с примитивными векторами решётки вдоль «мягких» направлений {100} и {010}. Подчёркивается тот факт, что эти свойства характерны для устойчивых массивов островков.

В работе [29] показано, что энергия 3D массива когерентных напряжённых островков, образовавшихся на несогласованной решётке кристалла подложки, обусловлена суммой следующих энергетических фрагментов: объёмная упругая энергия релаксации; изменение энергии системы, вызванное образованием островков; дополнительная энергия, инициированная деформацией поверхности кристалла; влияние граней островков на изменение упругой энергии релаксации; энергия упругого взаимодействия между соседними островками. Такой подход позволяет установить зависимость размеров островков от вклада каждой из составляющих, которые, в свою очередь, определяются условиями синтеза массива квантовых точек. При этом характерный размер островков является функцией, определяемой минимумом полной энергии массива 3D островков.

На рис. 6 показана зависимость энергии хаотического массива 3D напряжённых островков от их размера. На этом рисунке параметр α определяет отношение поверхностной энергии к энергии, обусловленной краевыми эффектами на границе КТ. Если поверхностная составляющая энергии больше энергии краевых эффектов, формирующих КТ (параметр α > 1), то вся система, следуя законам термодинамики, стремится к сращиванию островков. Когда α < 1, формируются островки оптимальной с энергетической точки зрения формы и размеров. При этом отмеченная выше энергетическая компонента, определяющая взаимодействие островков с кристаллической структурой подложки, стимулирует образование квадратной решётки массива КТ.

Следует отметить, что большинство упрощённых теоретических моделей рассматривают массивы КТ как однородную среду, в которой операция усиления определяется обобщённой «материальной КТ», а также такими факторами, как заполнение и захват носителей. При этом не учитываются электромагнитные взаимодействия между отдельными КТ. Более общий подход описывает массивы КТ как композит квантовых точек. В таких моделях взаимодействие электромагнитных полей с анизотропными КТ или анизотропными решётка-

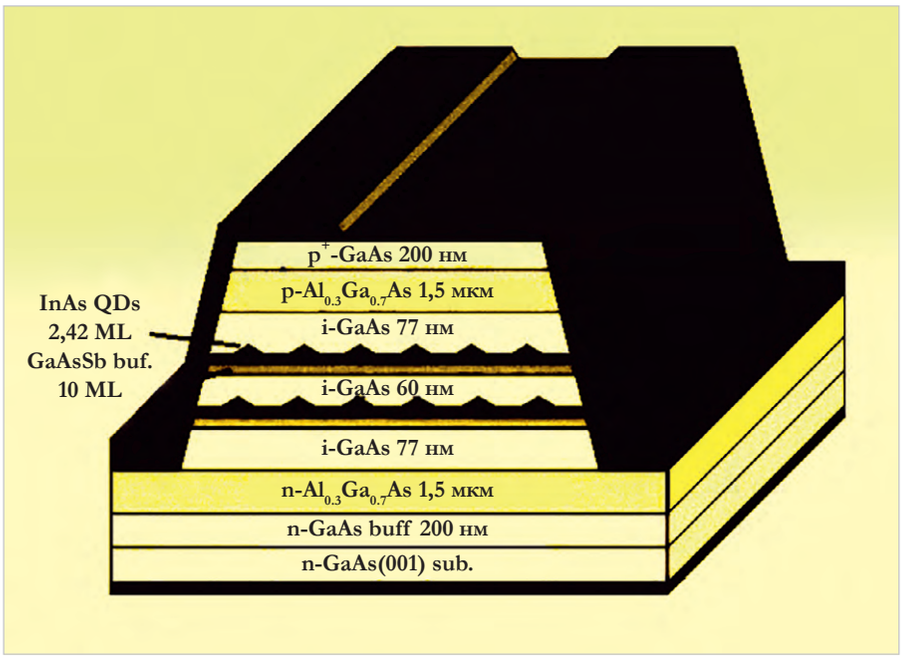


Рис. 7. Обобщённая схема гетероструктуры на основе вертикального массива квантовых точек InGaAs

ми КТ вызывает такие процессы, как, например, расщепление мод для одного и того же экситонного перехода КТ. Наряду с этим максимальное усиление в основном зависит от относительного расположения квантовых точек в массиве в сравнении с параметрами световой волны в кристалле [30].

Детальный разбор этих моделей с погружением в сложнейшую интерпретационную математику, используемую в квантовой механике, выходит за рамки этой статьи. Выделим только один из наиболее важных выводов, вытекающих из этих работ. Было доказано, что с теоретической точки зрения нет никаких препятствий для создания полупроводникового инжекционного лазера на квантовых точках (Quantum Dot's Laser – QDL). Поскольку волновая функция основного состояния полностью локализована внутри самой квантовой точки, то теоретически возможной становится реализация на практике инжекционного лазера QDL со сверхвысокими значениями «удельного усиления».

Инжекционные лазеры с вертикально связанными квантовыми точками – VCQD

Предварительные лабораторные исследования группы Алфёрова показали, что лазерам на квантовых точках (QDL) свойственна низкая, но при этом крайне стабильная пороговая плотность тока – около 40 А/см^2 при криогенных температурах и примерно 62 А/см^2 при комнатной температуре. Для QDL характерны большие значения внутренней квантовой эффективности (80%), а также параметры удельного и дифференциального усиления, значительно превышающие аналогичные цифры для лазеров на квантовых ямах [31, 32].

В работе [33] было показано, что для лазеров на основе квантовых точек InAs/GaAs коэффициент усиления может достигать исключительно больших значений, вплоть до $6{,}8\times10^4$ см$^{-1}$ при плотности тока 80 А/см^2 (77К). Наряду с этим максимальное значение дифференциального усиления составило 2×10^{-12} см^2 при 20 А/см^2 (77К). Таким образом, дифференциальное усиление лазеров на квантовых точках может быть на 3 порядка выше по сравнению с лазерами на квантовых ямах.

Однако эксперименты показали, что в реальных образцах массивов гетероструктур на квантовых точках существовала сильная температурная зависимость пороговой плотности тока при комнатных температурах. В дополнение к этому выяснилось, что при температурах выше 150К наблюдалось заметное снижение усиления.

Решить эти проблемы удалось за счёт использования объёмных гетероструктур с вертикально связанными квантовыми точками (Vertically Coupled Quantum Dots – VCQD) [34, 35].

К концу 1990-х сложилась общепризнанная схема изготовления массивов вертикально связанных квантовых точек, которая представляла собой примерно одинаковые технологические последовательности операций, отличающиеся специфическими особенностями, обусловленными назначением конечных изделий. Обобщённая схема гетероструктуры на основе вертикального массива квантовых точек InGaAs показана на рис. 7 [36].

Ниже описана стандартная процедура получения массива квантовых точек InGaAs с помощью модифицированного метода «MBE – Stranski – Krastanow». Кроме того, используется метод «химического осаждения из паровой фазы металлоорганических соединений MOCVD», в котором рост кристаллов осуществляется не в высоком вакууме, как в MBE, а из парогазовой смеси пониженного или атмосферного давления (от 2 до 101 кПа).

На первом этапе на подложке GaAs формируется тонкий (1–2 ML) смачивающий слой InGaAs (Wetting Layer – WL). Процесс MBE проводится при больших температурах (400–600°C) в условиях сверхвысокого вакуума (вплоть до 10^{-8} Па).

По мере образования на подложке дополнительных слоёв мономолекулярных плёнок InGaAs благодаря несогласованным параметрам решёток нарастает деформация, что приводит к образованию островков нестабильности на поверхности смачивающего слоя (WL).

Обычно при толщине WL от 1,5 до 1,7 ML из-за релаксации деформации запускается механизм формирования 3D островков. В это же самое время атомы InAs стараются занять место на подложке, которое соответствует минимальным значениям поверхностной энергии в новой кристаллической решётке, образованной на границе контакта InGaAs/GaAs. При этом образовавшийся WL-слой остаётся под квантовыми точками после их формирования и может действовать в дальнейшем в качестве канала для доставки носителей заряда непосредственно в квантовые точки. Поскольку слишком большое значение может привести к плохому формированию точек, а слишком малое не обеспечивает адекватный транспорт носителей, на этом этапе необходим тщательный контроль за толщиной WL-слоя.

Дальнейший рост кристаллических структур может реализовываться за счёт следующих основных механизмов: поверхностная диффузия адсорбированных на поверхности кристалла атомов (адатомов); прямое осаждение и оствальдовское созревание. В то же время происходит формирование формы микрокристаллов. В итоге в случае InGaAs обычно образуются пирамидообразные квантовые точки с размерами основания около 10–15 нм и высотой примерно 4–8 нм. Параметры роста КТ можно контролировать с помощью температуры. Более высокие температуры увеличивают подвижность поверхности, что влияет на конечную форму, размер КТ и их расположение в кристаллической структуре. Помимо того, часто применяется контроль скорости осаждения. Более низкие скорости дают крупные и однородные квантовые точки. В то же время высокие скорости вызывают рост преимущественно мелких и многочисленных КТ. Также используются специальные дополнительные методы контроля роста КТ, такие как, например: изменение скорости напыляемого потока; соотношение ингредиентов (As/In); искусственные островки деформации; поверхностно-активные вещества; прерывание роста.

Прерывание процесса роста при достижении критической толщины формирует массив однородных квантовых точек InGaAs на подложке GaAs. Завершается процесс формирования КТ нанесением на них буферного барьерного слоя (Barrier Layers – BL). В качестве барьерного слоя, как правило, использовались либо GaAs, либо AlGaAs.

Так образуется первый слой квантовых точек InGaAs в виде усечённых пирамидообразных структур, окружённых общим барьерным слоем AlGaAs. Этот барьерный слой (Barrier Layers – BL) предназначен для нескольких целей. Во-первых, пара InGaAs-AlGaAs образует гетероструктуру двух полупроводников с разными запрещёнными зонами, которые для GaAs и AlAs составляют соответственно 1,42 эВ и 2,16 эВ.

Во-вторых, барьерный слой AlGaAs выполняет ряд важных служебных действий, таких, например, как:

- компенсирует несоответствие кристаллических решеток КТ и подложки;
- снимает и перераспределяет деформацию вокруг КТ;
- согласует рост нескольких слоёв квантовых точек и реализует вертикальную связь между ними;
- контролирует размер и форму точек, а также влияет на плотность и расположение КТ;
- создаёт тепловые барьеры и управляет теплопроводностью;
- поддерживает различные профили легирования.

Наиболее критичными для барьерного слоя параметрами, обеспечивающими перечисленные выше его функциональные качества, являются толщина слоя и состав полупроводника. Выбор материала полупроводника для барьерного слоя определяется конкретной задачей гетероструктуры. Толщина барьерного слоя должна быть достаточно большой для обеспечения функции ограничения и одновременно достаточно тонкой для эффективного туннелирования (10–50 нм).

Описанная схема может повторяться многократно. Следующий слой КТ напыляется на барьерный слой, закрывающий первый ряд матрицы. Таким образом, формируются вертикально связанные 3D массивы квантовых точек (Vertically Coupled Quantum Dots – VCQD).

Технологическим и теоретическим аспектам, связанным с VCQD, в лаборатории Алфёрова уделялось особое внимание. На эту тему есть множество публикаций. Ниже приведены только ссылки на те статьи, которые сам Жорес Алфёров считал важными и выделил их в своей Нобелевской речи [37].

Например, в статье [38] показано, как именно попеременное осаждение GaAs-InAs приводит к созданию вертикально разделённых пирамид. Это разделение обусловлено тем, что энергия деформации уменьшается из-за последовательного переноса InAs из заглублённой части пирамиды в её открытую часть. Полученная структура состоит из нескольких вертикально сливающихся частей InAs, представляющих собой упорядоченный массив КТ, вмонтированных в матрицу GaAs. Такие гетероструктуры демонстрируют инжекционную лазерную генерацию при очень низких плотностях тока.

В другой работе [39] исследовались спектры фотолюминесценции массивов вертикально связанных напряжённых квантовых точек InAs в матрице GaAs. Было продемонстрировано, что при повторном осаждении квантовых точек InAs в матрицах GaAs островки второго ряда формировались в точности над островками предыдущего ряда. Этот эффект можно было объяснить влиянием неоднородных полей напряжения, возникающих в результате формирования первого ряда точек, на темпы поверхностной миграции атомов Ga и In. Также было обнаружено, что повторное осаждение рядов КТ приводит к заметному сдвигу максимума линии фотолюминесценции в сторону меньших энергий по сравнению со случаем одиночного массива КТ (N = 1). За счёт замены несвязанных точек вертикально связанными массивами однородных КТ (Vertically Coupled Quantum Dots – VCQD) удалось заметно снизить потери, обусловленные оптическим ограничением, а также увеличить эффективность усиления.

Рассмотренная выше общая схема получения массива квантовых точек использовалась Алфёровым не только для создания массивов КТ на основе арсенида галлия, но также применялась и для разработок гетероструктур с другими соединениями группы A3B5.

Так, в статье [40] описаны результаты исследований массивов напряжённых наноразмерных кластеров двух типов: InP в матрице $In_{0,49}Ga_{0,51}P$ на подложке GaAs {100} и InAs в матрице $In_{0,53}Ga_{0,47}As$ на подложке InP {100}, полученных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Было показано, что образующиеся наноразмерные кластеры имеют размеры 80 нм (InP/InGaP) и 25–60 нм (InAs/InGaAs). В спектрах фотолюминесценции полученных наноразмерных кластеров наблюдались полосы в диапазонах длин волн 0,66–0,72 и 1,66–1,91 мкм при 77K. При этом положение максимумов не изменялось с увеличением эффективной толщины InP и InAs. Полученные в экспериментах значения эффективности излучения наноразмерных кластеров InP значительно превосходили интенсивность излучения кластеров на основе InAs [41].

Аналогичные эксперименты были проведены с гетероструктурами GaAs, выращенными на поверхности GaN.

Исследованы особенности получения гетероструктур AlGaN/GaN мето-

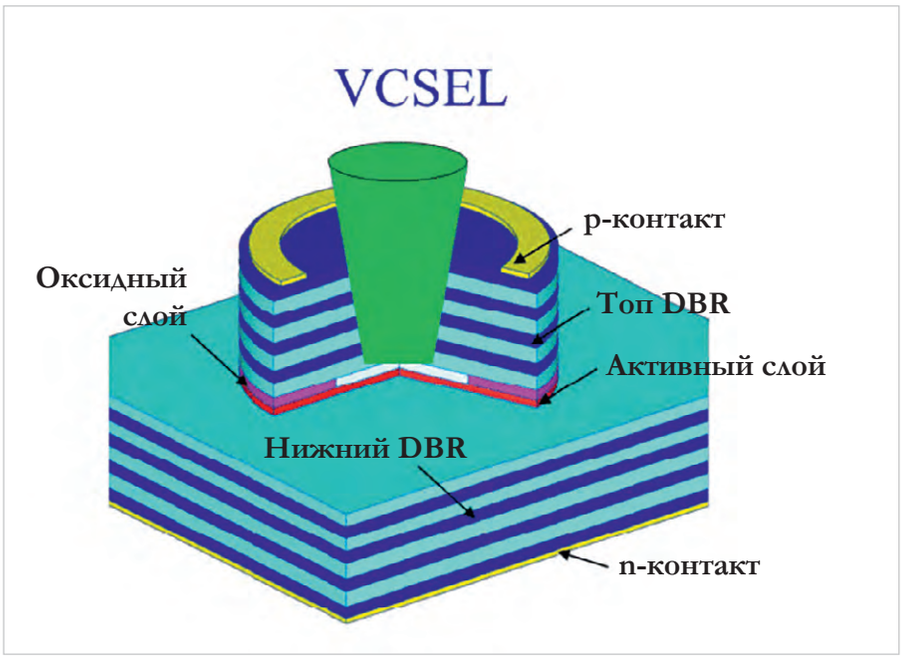


Рис. 8. Упрощённая схема лазера с вертикальным резонатором и поверхностным излучением (VCSEL)

дом ГФЭ, выращенных на подложках сапфира с ориентацией {0001}. Полученные гетероструктуры AlGaN/GaN обладали высокой подвижностью носителей в канале 1290 $см^2/(В·с)$ и концентрацией $1,2×10^{13}$ $см^{-2}$ (при комнатной температуре). Проанализированы экспериментальные результаты зависимости влияния чистоты исходных компонентов на параметры синтезированных гетероструктур [42].

Накопленный опыт, разработанные теоретические основы и созданная экспериментальная база позволили Алфёрову с сотрудниками создать полупроводниковый инжекционный лазер на основе вертикально связанного массива квантовых точек InGa/GaAs (Vertically Coupled Quantum Dots – VCQDs), работавший в непрерывном режиме при комнатной температуре [43].

Для того чтобы понять основные принципы работы этого типа лазеров, рассмотрим сначала упрощённую схему лазера с вертикальным резонатором и поверхностным излучением (Vertical Cavity Surface Emitting Laser VCSEL), показанную на рис. 8 [44].

Фактически лазер VCSEL состоит из двух основных частей: активной зоны и резонатора. В активной зоне, состоящей из массива вертикально связанных квантовых точек VCQD, генерируется лазерное излучение. Резонатор, отражающий свет, выходящий из активной области обратно внутрь, выполнен по схеме распределённого брэгговского отражателя (Distributed Bragg Reflector – DBR).

В лазерах VCSEL свет излучается в направлении, перпендикулярном поверхности кристалла, в отличие от обычных конструкций лазеров, излучающих в плоскости, параллельной поверхности. При этом ось резонатора VCSEL перпендикулярна плоскости гетероструктуры, а размеры активной области обычно не превышают нескольких микрометров (ширина – высота – длина).

Отражатель DBR представляет собой слоистую структуру, состоящую из последовательности осаждённых друг на друга материалов с разными показателями преломления. Как правило, DBR изготовляются при помощи молекулярно-лучевой эпитаксии или химического осаждения из газовой фазы в том же самом технологическом процессе, в котором синтезируется активная гетероструктура на основе массива КТ.

Такие рефлекторы позволяют отражать свет с более узкой полосой отражения, чем обычные отполированные грани кристалла.

Слои DBR резонатора, выполняющие одновременно роль проводников тока, нанесены сверху и снизу непосредственно на излучающие поверхности.

Как правило, они сконструированы в виде чередующихся четвертьволновых (λ/4) слоёв с разными показателями преломления. Например, один слой DBR может быть изготовлен из GaAs, а другой из $Al_{0,5}Ga_{0,5}As$. Уместно отметить, что при использовании в конструкции DBR пятидесяти таких пар становится возможным получение коэффициента отражения больше, чем 0,999.

Конструкция DBR напоминает электролитический конденсатор. Оба DBR (верхний и нижний) состоят из слоёв одного типа проводимости. При этом они одновременно являются p- или n-эмиттерами.

Функцию волновода и корректора профиля показателя преломления может выполнять специально сконструированный барьерный слой.

Необходимо особо подчеркнуть, что в такой конструкции изолированная квантовая точка не может функционировать как микролазер типа ДГС. Понятно, что для достижения инверсии населённости нужен ток. Однако невозможно напрямую прикрепить электрические контакты к каждой из миллионов КТ, составляющих массив VCQD, и заставить их синхронно работать. Поэтому в лазерах VCSEL квантовая точка должна быть интегрирована в тщательно спроектированную структуру полупроводникового устройства, которая обеспечивает общие пути инжекции носителей во всём массиве. На рис. 8 квантовые точки активной зоны (Active Layer) встроены в общую структуру p-n-перехода. Прямое смещение, прикладываемое ко всей структуре устройства (контакты p, n), вызывает ток, который протекает через окружающий полупроводниковый материал. Барьерный слой, кроме разграничивающих функций, также формирует потенциальные ямы для электронов и дырок и определяет смещение зон для КТ. При этом носители захватываются квантовой точкой как непосредственно из барьерного слоя, показанного выше на рис. 7 (AlGaAs), так и с помощью туннелирования из соседних областей. Внутри КТ происходит релаксация носителей и их переход в основное состояние. Благодаря эффекту КРЭ фотоны, испускаемые при рекомбинации электронов и дырок, имеют дискретные энергии. Вместе с тем рефлекторы DBR, возвращающие свет обратно в активную зону, позволяют выделить очень узкую спектральную линию.

На этом этапе становится очень важной вертикальная связь между слоями квантовых точек. Носители, кото-

рые не захватываются одним слоем КТ, могут быть захвачены последующими слоями. Причём кроме прямого захвата из барьерного слоя носители могут туннелировать между соседними точками, а также захватываться с помощью фононов.

Поскольку квантовые точки встроены в оптическую полость (ОП), образованную зеркалами DBR, то все они взаимодействуют с одной и той же оптической модой. При этом в ОП формируется стоячая волна, которая обеспечивает общее резонансное поле, связанное со всеми КТ.

При достижении порогового напряжения лазера только КТ с энергиями перехода, соответствующими основной моде ОП, начинают излучать когерентно. В то же время в оптической полости создаются условия, необходимые для существования инверсии населённости, вызывающей вынужденное излучение с синхронизированными фазами испускаемых фотонов. Таким образом, реализуется «естественный отбор» КТ, участвующих в генерации когерентного лазерного излучения. Те квантовые точки, энергия которых не соответствует основной моде, практически не вносят вклад в когерентное излучение.

Ключевое отличие принципа работы лазера VCSEL от лазера с традиционной двойной гетероструктурой (ДГС) заключается в том, что вместо единой непрерывной среды усиления мы имеем массивы, состоящие из многочисленных дискретных центров усиления (КТ). Отмеченные выше свойства резонатора DBR и процесс стимулированного излучения заставляют эти дискретные излучатели (КТ) работать синхронно, вырабатывая коллективное когерентное излучение.

В таких VCSEL-лазерах максимальный коэффициент усиления ($К_{вус}$) реализуется в направлении, перпендикулярном гетеропереходу. В то же время КГус в плоскости перехода сведён к минимуму. Этот эффект максимально реализуется при использовании гетероструктур на базе 3D массивов с вертикально связанными КТ (VCQD).

Важный элемент в вертикально-излучающих лазерах (ВИЛ), связанный с ограничением по току, получил название «токовая апертура» (Current Aperture – CU). На рис. 8 этот защитный элемент обозначен как «Oxide Layer». В современных ВИЛ, в которых используется субмиллиметровая модуляция, существует проблема ограничения порогового тока на частотах выше 10 ГГц. Наиболее распространённым решением этой технологической задачи является вариант токовой апертуры, изготовленной методом селективного окисления слоёв AlGaAs с высоким содержанием Al [45].

Следует отметить, что существует также другая проблема в современных ВИЛ, связанная с дифракцией света на высоких частотах. Для этого используется другой вариант коррекции: оптическая апертура (Optical Aperture).

Первая модель вертикально-излучающего лазера, разработанная группой Алфёрова, была предназначена для генерации когерентного излучения в инфракрасном (ИК) диапазоне (λ = 1–3 мкм) [43].

Гетероструктура VCQD этого лазера, выращенная методом МЛЭ, состояла из вертикально связанных слоёв квазипирамидальных КТ, образованных осаждениями InGaAs на подложках GaAs по описанной выше схеме (рис. 7). Эта структура содержала три слоя квантовых точек InGaAs со средней толщиной 1,2 нм, разделённых барьерным слоем GaAs (1,75 λ). Кроме того, в состав гетероструктуры были включены два распределённых брэгговских отражателя – РБО (DBR) на основе чередующихся слоёв AlGaAs толщиной $\lambda/4$ и разными показателями преломления. Плотность КТ в активном слое составляла 5×10^{11} $см^{-2}$. Матрица из VCQD была размещена в центре DBR микрорезонатора. Граничные области активной зоны были легированы до 10^{17} $см^3$ и 10^{18} $см^3$ (p, n).

Этот лазер имел модовое расстояние $\Delta\lambda$ в диапазоне примерно от 100 до 300 нм. Такое расстояние между модами позволяло лазеру излучать одиночную продольную моду при различных входных токах.

Благодаря тому, что в активной области используются тройные гетероструктуры, содержащие массивы квантовых точек, а направление излучения лазера перпендикулярно плоскости перехода, на небольшой площади оптической апертуры (100 $мкм^2$) может быть получена высокая плотность излучателей. При этом эффективный показатель усиления этой среды превышал 10^4 $см^{-1}$.

Эксперименты с различным количеством слоёв квантовых точек (N) показали, что увеличение их числа приводит к значительному снижению пороговой плотности тока (примерно 100 $А/см^2$ при 300К для N = 10). Использование гетероструктур InGaAs/AlGaAs VCQD в сочетании с высокотемпературным ростом слоёв эмиттера и волновода приводит к дальнейшему снижению пороговой плотности тока (60–80 $А/см^2$, 300К) и повышению внутренней квантовой эффективности (70%) [34].

В статье [46] исследовались различные варианты гетероструктуры с вертикальными оптическими резонаторами (ОР), имеющие активные области на базе массивов квантовых точек InAs, выращенные методом МПЭ на подложках GaAs. В качестве ОР использовались DBR на основе AlAs/GaAs (нижний) и SiO_2/ZnS (верхний). Массивы InAs квантовых точек были помещены во внешнюю квантовую яму $In_{0,3}Ga_{0,7}$ шириной 4 нм.

Для получения гетероструктур была разработана поэтапная технология синтеза. Сначала методом МПЭ выращивалось нижнее зеркало на основе нелегированной структуры AlAs/GaAs с толщинами слоёв $\lambda/4$. При этом контролировалось формирование скрытых контактных слоёв (p, n) внутри активного слоя ОР. После выращивания зеркала структура вынималась из камеры и проводились измерения спектров отражения и других параметров. Затем нижний ОР разделялся на отдельные образцы, на которых выращивались различные варианты активных слоёв. Для предотвращения окисления AlAs все структурные слои покрывались слоем GaAs толщиной ($\lambda/4$).

Полученные результаты зависимости спектров отражения и фотолюминесценции от различных комбинаций компонентов структуры активной области и оптических резонаторов позволили утверждать, что разработанная технология потенциально пригодна для создания вертикальных излучателей и резонансных фотоприёмников диапазона длин волн в районе 1,3 мкм на подложках арсенида галлия.

Было показано, что конструкция гетероструктур, в которых массивы квантовых точек InAs размещены во внешней напряжённой квантовой яме InGaAs, позволяет значительно

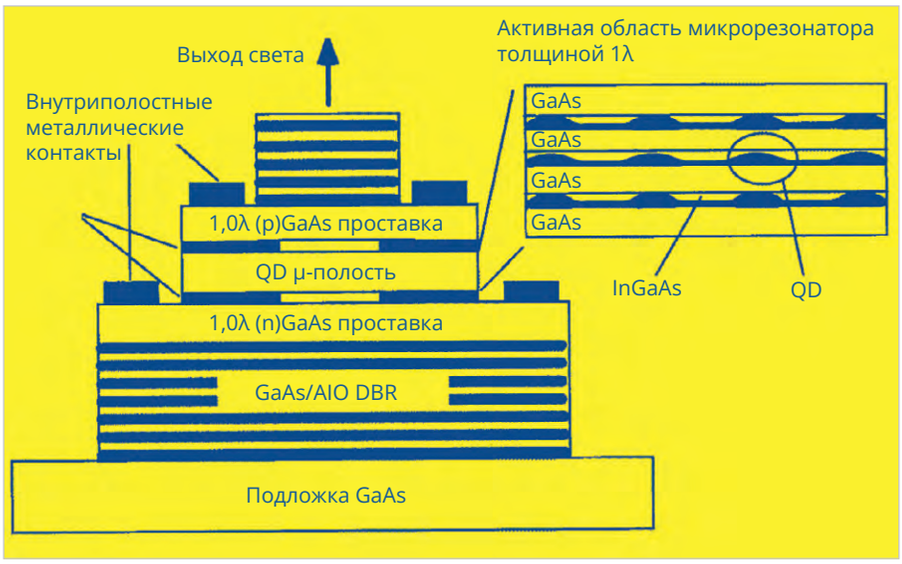


Рис. 9. Структурная схема VCSEL-лазера, разработанная группой Алфёрова в 2000 году

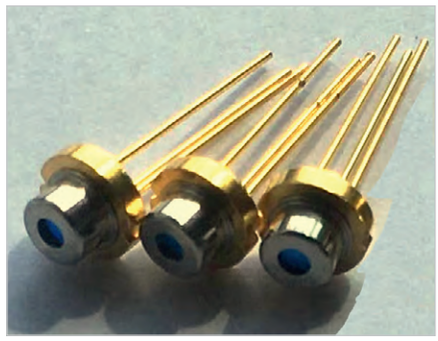


Рис. 10. Современный одномодовый диодный VCSEL-лазер с вертикальным излучением на основе GaAsP/AlGaAs

расширить длинноволновый предел излучения в структурах, выращенных методом МПЭ на подложках арсенида галлия.

В следующей модели вертикального резонансного поверхностно-излучающего лазера, излучающего на длине волны 1,3 мм, разработанной группой Алфёрова [47], в качестве материала матрицы использовались несколько иные составы активного и буферного слоёв, позволившие значительно снизить пороговое значение плотности тока в исследуемых образах.

Структурная схема этого VCSEL-лазера, разработанная группой Алфёрова, показана на рис. 9.

Гетероструктура лазера была выращена на подложке GaAs (substrate) методом МЛЭ. Верхний и нижний резонаторы Брэгга (DBR) состоят из чередующихся слоёв GaAs, AlO толщиной λ\4. В центре структуры размещена активная область, содержащая три слоя массивов пирамидообразных квантовых точек $In_{0,15}Ga_{0,85}As$. Толщина каждого слоя составляла 5 нм. Слои квантовых точек разделены между собой барьерным слоем GaAs толщиной 25 нм.

Границы активной области лигированы до величин 10^{17} $см^{-3}$ и 10^{18} $см^{-3}$ соответственно для (n) и (p) областей. Плотность КТ внутри слоёв составляла приблизительно 5×10^{10} на квадратный сантиметр. При этом волновые функции носителей заряда не перекрываются ни в поперечном, ни в вертикальном направлениях. Напряжение смещения подаётся через распределённые контакты 1,0 λ (n) GaAs и 1,0 λ (p) GaAs.

Во время синтеза всей гетероструктуры были окислены соответствующие слои AlAs, образующие токовую апертуру.

Лабораторный образец VCSEL-лазера тестировался с использованием источника тока, работавшего в импульсном режиме с пакетами 100 наносекундных импульсов с периодом от 1 до 10 мкс.

Исследовалось излучение в районе 1,3 мкм. Разброс от пиковой длины волны излучения составил около 10%. Авторы объяснили это некоторыми недостатками технологии синтеза, такими, например, как отсутствие вращения подложки во время роста структуры. Эти и другие технические ошибки могли привести к неоднородности параметров квантовых точек в структуре массива.

Сравнение экспериментальных данных с теоретическими оценками позволило утверждать, что в процессе генерации когерентного излучения важную роль играет переход основного состояния экситона КТ.

Эта работа группы Алфёрова имела очень большое значение для дальнейшего развития миниатюрных транзисторных лазеров. Во-первых, была подтверждена корректность направления развития миниатюрных транзисторных лазеров, связанная с самой идей VCSEL. Во-вторых, были выявлены недостатки этих первых моделей и намечены пути их устранения. Было отмечено, что значительное улучшение производительности такого типа лазеров может быть достигнуто за счёт увеличения количества слоёв КТ, выращенных с уменьшенной толщиной разделительного слоя и уменьшенным размером микрорезонатора. Кроме того, необходимо было модернизировать токовую апертуру и внутрирезонаторные распределённые контакты [48].

Рассмотренные в этой статье (части 1, 2, 3, 4) научные работы Жореса Алфёрова явились основанием для присуждения ему в 2000 году Нобелевской премии за выдающийся вклад в разработку полупроводниковых гетероструктур и создание на их основе микроэлектронных компонентов.

Необходимо отметить, что ещё в течение двадцати лет после получения Нобелевской премии Жорес Алфёров продолжал активно работать в этой области и написал ещё много статей, рассмотрение которых, возможно, будет продолжено в следующих номерах журнала.

Достаточно сказать, что гетерогенные структуры и изготовленные на их основе лазеры, разработанные Алфёровым, используются сегодня повсеместно в смартфонах, телевизорах, медицинском оборудовании, CD-проигрывателях, прожекторах, автомобильных фарах, детских игрушках и другом оборудовании.

Наибольшее распространение получили лазеры VCSEL, которые применяются как для оптической накачки волоконно-оптических лазеров (ВОЛ), так и в других приложениях, таких, например, как лазерная абсорбционная спектроскопия, рубидиевая спектроскопия, оптические часы и т.д. Общие схемы этих устройств фактически не отличаются от структуры, предложенной Алфёровым в 2000 году (рис. 9). В то же время современные технологии позволили наладить мас-

совое производство миниатюрных и сравнительно недорогих VCSEL-лазеров.

Модель PL-0850-1-A81 (TO-46), показанная на рис. 10, представляет собой вертикально излучающий лазер на основе GaAsP/AlGaAs, выращенный с помощью технологии MOVPE [49].

Лазер предназначен для одномодового излучения на длине волны 850 нм. Он имеет термоэлектрический охладитель, термистор и защиту от электростатики. Лазер размещён в стандартном корпусе (T-O5) с габаритными размерами D = 4,7 мм, h = 3,75 мм.

Благодаря внедрению VCSEL в системы сетей передачи данных Gigabit и 10 Gigabit Ethernet в последние годы значительно увеличился спрос на высокоскоростные модули на основе поверхностно излучающих лазеров с вертикальным резонатором.

Ожидается, что мировой рынок волоконно-оптических лазеров вырастет с 4,22 млрд долларов США в 2023 году до 8,41 млрд долларов США к 2030 году [50].

Литература

1. *Ekimov A.I.* et al. Quantum size effect in semiconductor microcrystals. Solid State Communications, Volume 56, Issue 11, Pages 921–924, 1985. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038109885800259?via%3Dihub.
2. *Brus L.E.* Chemical Quantum Dots in Bell Laboratories, Accounts of Chemical Research, 2024. URL: http://www.columbia.edu/cu/chemistry/fac-bios/brus/group/pdf-files/brus-2024-chemical-quantum-dots-in-bell-laboratories.pdf.
3. *Brus L.E.* A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites. The Journal of Chemical Physics, Volume 79, Issue 11, 5566–5571, 1983. URL: https://doi.org/10.1063/1.445676.
4. *Brus L.E.* et al. Size effects in the excited electronic states of small colloidal CdS crystallites. The Journal of Chemical Physics, Volume 80, Issue 9, 1984. URL: https://doi.org/10.1063/1.447228.
5. *Brus L.E.* Electron–electron and electron-hole interactions in small semiconductor crystallites: The size dependence of the lowest excited electronic state. J. Chem. Phys. 80, 4403, 1984. URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.447218.
6. *Bawendi M.G.* (CdSe)ZnS Core–Shell Quantum Dots: Synthesis and Characterization of a Size Series of Highly Luminescent Nanocrystallites. The Journal of Physical Chemistry, B, Vol 101/Issue 46, 1997. URL: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp971091y.
7. *Алексеев В.* Открытие квантовых точек и разработка технологии их массового производства // СОЭЛ. 2024. № 2. URL: https://www.cta.ru/articles/soel/2024/2024-2/178209/.
8. *Jing Liu, Peilin Liu, Dengyang Chen,* et al. A near-infrared colloidal quantum dot imager with monolithically integrated readout circuitry. Nature Electronics volume 5, pages 443–451 (2022). URL: https://www.nature.com/articles/s41928-022-00779-x.
9. *Yun-Ran Wang, Im Sik Han and Mark Hopkinson.* Fabrication of quantum dot and ring arrays by direct laser interference patterning for nanophotonics. Nanophotonics 2023; 12(8): 1469–1479. URL: https://doi.org/10.1515/nanoph-2022-0584.
10. *Nötzel R.* et al. Self-Organized Quantum Dots. Semiconductor Science and Technology, Europhysics News, 1996. URL: https://www.researchgate.net/publication/256349094_Self-organized_growth_of_quantum-dot_structures.
11. *Stranski N. & Krastanow L.* Zur Theorie der orientierten Ausscheidung von Ionenkristallen aufeinander. Monatshefte für Chemie und verwandte Teile anderer Wissenschaftenю. Volume 71, pages 351–364, (1937). URL: https://link.springer.com/article/10.1007/BF01798103.
12. Алфёровский Университет. Лаборатория молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ). URL: https://bit.ly/3OYmKQ2.
13. *Goldstein L.* et al. Growth by molecular beam epitaxy and characterization of InAs/GaAs strained-layer superlattices. Appl. Phys. Lett. 47, 1099–1101 (1985). URL: https://doi.org/10.1063/1.96342.
14. *Leonard D.* et al. Direct formation of quantum-sized dots from uniform coherent islands of InGaAs on GaAs surfaces. Appl. Phys. Lett. 63, 3203–3205 (1993). URL: https://doi.org/10.1063/1.110199.
15. *Leonard D.* et al. Critical layer thickness for self-assembled InAs islands on GaAs. Phys. Rev. B 50, 11687. 1994. URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.50.11687.
16. *Justin C. Norman, Richard P. Mirin, John E. Bowers.* Quantum dot lasers—History and future prospects. J. Vac. Sci. Technol. A 39, 020802 (2021). URL: https://doi.org/10.1116/6.0000768.
17. *Алфёров Ж.И., Гарбузов Д.З., Денисов А.Г.* и др. Квантово-размерные AlGaAs/GaAs – гетероструктуры со 100% квантовым выходом излучательной рекомбинации, полученные методом молекулярно-пучковой эпитаксии // Физика и техника полупроводников. 1988, т. 22, вып. 12. С. 2105–2110. URL: https://m.mathnet.ru/links/c938130182e16c44687e7c9c4ce22272/phts3145.pdf.
18. *Alferov Zh.I., Ledentsov N.N.* et al. Proc. 22nd Inter. Conf. Phys. Semicond., Vancouver, Canada, August 1994, edited by D.J. Lockwood, Vol. 3, p. 1855. URL: https://www.nlb.gov.sg/main/book-detail?cmsuuid=f8348db5-1df1-491a-a26a-6096b1b103ac.
19. *Alferov Zh.I., Bimberg D., Ledentsov N.N.* et. al. Self-organization processes in MBE-grown quantum dot structures. Thin Solid Films 267, 32 (1995). URL: https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)06597-0.
20. *Alferov Zh.I., Grundmann M., Ledentsov N.N.* et al. Ultranarrow Luminescence Lines from Single Quantum Dots. Phys. Rev. Lett. 74, 4043 (1995). URL: https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.74.4043.
21. *Alferov Zh.I., Grundmann M., Ledentsov N.N.* et al. InAs/GaAs quantum dots radiative recombination from zero-dimensional states. Phys. Status Solidi B 188, 249 (1995). URL: https://doi.org/10.1002/pssb.2221880122.
22. *Alferov Zh.I., Ruvimov S.S.* et al. Structural characterization of (In,Ga)As quantum dots in a GaAs matrix. Phys. Rev. B 51, 14766 (1995). URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.14766.
23. *Alferov Zh.I., Zhukov A.E., Ustinov M.* et al. Negative Characteristic Temperature of InGaAs Quantum Dot Injection Laser. Japanese Journal of Applied Physics. Volume 36, Number 6S, 4216. 1997. URL: https://

iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.36.4216.
24. *Alferov Zh.I., Ledentsov N.N.* et al. Structural and optical properties of InAs–GaAs quantum dots subjected to high temperature annealing. Applied Physics Letters, volume 69, issue 20, pages 3072–3074. 1996. URL: https://colab.ws/articles/10.1063%2F1.116843.
25. *Алфёров Ж.И., Бимберг Д.* и др. Напряжённые субмонослойные гетероструктуры и гетероструктуры с квантовыми точками. УФН, 165, 224 (1995). URL: https://ufn.ru/ru/articles/1995/2/h/.
26. *Ledentsov N.N., Cirlin G.* et al. Ordering phenomena in InAs strained layer morphological transformation on GaAs (100) surface Appl. Phys. Lett. 67, 97 (1995). URL: https://doi.org/10.1063/1.115520.
27. *Henini M.* Properties and applications of quantum dot heterostructures grown by molecular beam epitaxy. Nanoscale Res. Lett. 2006, 1, 32–45. URL: https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3246631/.
28. *Ledentsov N.N., Shchukin V.A.* et al. Spontaneous Ordering of Arrays of Coherent Strained. Phys. Rev. Lett. 75, 2968 (1995). URL: https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.75.2968.
29. *Ledentsov N.N., Shchukin V.A., Grundmann M.* et al. Strain-induced formation and tuning of ordered nanostructures on crystal surfaces. Surf. Sci. 352–354, 117 (1996). URL: https://doi.org/10.1016/0039-6028(95)01112-9.
30. *Alferov Zh.I., Slepyan G.Ya., Maksimenko S.A.* et al. Polarization splitting of the gain band in quantum wire and quantum dot arrays. Phys. Rev. B, vol. 59, pp. 12275–12278, 1999. URL: https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.59.12275.
31. *Alferov Zh.I., Kirstaedter N., Ledentsov N.N.* et al. Low threshold, large to injection laser emission from (InGa)As quantum dots. Electronics Letters, Volume 30, Issue 17. URL: https://doi.org/10.1049/el:19940939.
32. *Alferov Zh.I., Bimberg D., Kirstaedter N., Ledentsov N.N.* et al. InGaAs-GaAs quantum-dot lasers. IEEE Journal of Selected Topics in Quant. Electron., Volume: 3 Issue: 2. 1997. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/605656.
33. *Alferov Zh.I., Kirstaedter N., Schmidt O.G.* et al. Gain and differential gain of single layer InAs/GaAs quantum dot injection lasers. Appl. Phys. Lett. 69, 1226–1228 (1996). URL: https://doi.org/10.1063/1.117419.
34. *Alferov Zh.I., Ustinov V.M.* et al. Low-threshold injection lasers based on vertically coupled quantum dots. Journal of Crystal Growth. Volumes 175–176, Part 2, Pages 689–695, 1997. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022024896010214.
35. *Alferov Zh.I., Lott J.A., Ledentsov N.N.* et al. Vertical cavity lasers based on vertically coupled quantum dot. Electronics Letters, 19th June 1997 Vol. 33 No. 73. URL: https://bit.ly/4goFF2y.
36. Refining the quantum dot laser. Compound Semiconductor. URL: https://compoundsemiconductor.net/article/114186/Refining_the_quantum_dot_laser.
37. *Alferov Zh.I.* Nobel Lecture: The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology. Rev. Mod. Phys. 73 767 (2001) URL: https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.73.767.
38. *Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Shchukin V.A.* et al. Direct formation of vertically coupled quantum dots in Stranski-Krastanow growth. Phys. Rev. B, 1996, 54, (12), pp. 8743–8750. URL: https://journals.aps.org/prb/abstract/10.1103/PhysRevB.54.8743.
39. *Алфёров Ж.И., Цацульников А.Ф., Леденцов Н.Н.* и др. Фотолюминесценция массивов вертикально связанных напряжённых квантовых точек InAs в матрице GaAs (100) // Физика и техника полупроводников. 1996. Вып. 10. С. 18–22. URL: http://journals.ioffe.ru/articles/18550.
40. *Алфёров Ж.И., Винокуров Д.А., Капитонов В.А.* и др. Самоорганизующиеся наноразмерные кластеры InP в матрице InGaP/GaAs и InAs в матрице InGaAs/InP // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33, вып. 7. URL: https://j.ioffe.ru/articles/viewPDF/35807.
41. *Алфёров Ж.И., Цацульников А.Ф., Бер Б.Я.* и др. Исследование слоёв GaN, легированных атомами As, полученных методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Год 1999, вып. 7. С. 791. URL: http://journals.ioffe.ru/articles/35795.
42. *Алфёров Ж.И., Лундин В.В., Заварин Е.Е.* и др. Гетероструктуры AlGaN/GaN с высокой подвижностью электронов, выращенные методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38, вып. 11. URL: https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/5664.
43. *Alferov Zh.I., Lott J.A., Ledentsov N.N.* et al. Vertical cavity lasers based on vertically coupled quantum dots. IET Electronics Letters, Volume 33, Issue 13, 1997. URL: https://www.academia.edu/101399945/Vertical_cavity_lasers_based_on_vertically_coupled_quantum_dots.
44. *Yixin Cao.* Development of Vertical Cavity Surface Emitting Laser Modulation for Data Communication. Journal of Physics: Conference Series, 1653 012001, 2020. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1653/1/012001.
45. *Леденцов Н.Н., Надточий А.М., Блохин С.А.* и др. Способ уменьшения паразитной ёмкости ВИЛ с селективно окисленной апертурой // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38, вып 3.
46. *Алфёров Ж.И., Малеев Н.А.* и др. Структуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками в вертикальных оптических резонаторах для диапазона длин волн вблизи 1,3 мкм // Физика и техника полупроводников. 1999. Т. 33, вып. 5. URL: https://j.ioffe.ru/articles/35758.
47. *Alferov Zh.I., Lott J.A., Ledentsov N.N.* et al. InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3 micro meter. Electronics Letters, 2000, Vol. 36 No. 16. URL: https://www.researchgate.net/publication/3382639_InAs-InGaAs_quantum_dot_VCSELs_on_GaAs_substrates_emitting_at_13_micro_signm.
48. *Alferov Zh.I., Ledentsov N., Grundmann M.* et al. Quantum-Dot Heterostructure Lasers. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 6(3): 439–451, 2000. URL: https://www.researchgate.net/publication/3409132_Quantum-dot_heterostructure_lasers.
49. 850 nm Single Mode VCSEL Laser diode. LD-PD-INC. URL: https://lenlasers.ru/upload/iblock/667/5hkdxy6r07lbc4rv81juefy1s6x1arpu/850nm_Single_Mode_VCSEL.pdf.
50. Exactitude Consultancy. URL: https://www.exactitudeconsultancy.com/ru/reports/32978/fiber-optic-lasers-market/.

Семён Айзенштейн в истории радио и электроники

Андрей Кашкаров

Сотрудники всемирно известной компании E2V в своё время оборудовали телескоп «Хаббл», разработали электронное оборудование для фирм Boeing и Airbus, Европейского космического агентства и NASA. Радарные установки конструировали в English Electric Valve Company и в английской фирме Маркони, и за всем этим стоял русский изобретатель Семён Моисеевич Айзенштейн (1883–1962), запатентовавший за трудовую жизнь порядка 60 знаковых изобретений, в том числе около 30 в России. Что было в нём больше – таланта предпринимательства, авантюризма или изобретательства – судите сами.

О Семёне Моисеевиче Айзенштейне известно меньше, чем о выдающемся А.С. Попове, тем не менее Айзенштейн успел внести значительный вклад именно в развитие радио в Стране Советов, расширение производства и конструкторской мысли отечественных разработчиков того времени. Со времени открытия электрического тока и затем «свечи Яблочкова» обыватели относились к электричеству с недоверием: в истории Австро-Венгерской империи известен «страшный» плакат (рис. 1), одним только видом призванный похоронить инновации, связанные с электропроводимостью, энергоснабжением, электроприборами и освещением, и подобные страхи не были до конца истреблены даже в Москве. Так, в сатирическом романе «Золотой телёнок» Ильи Ильфа и Евгения Петрова реалистично показано, как в коммунальной квартире, «Вороньей слободке», бабушка, имени которой никто не помнил, убоявшись электричества, «жгла у себя на антресолях лучины». Люди во все времена с недоверием относятся к неизвестному и непредсказуемому, но только не такие творческие натуры, как Семен Айзенштейн, получивший в 1901 году университетское образование по кафедре электротехники и активно работавший во вновь созданной электротехнической лаборатории.

Рис. 1. «Страшный» плакат из Австро-Венгрии конца XIX века

Несколько своевременных встреч

Семён Моисеевич родился в купеческой семье (отец был купцом I гильдии) в 1883 году, о точной дате рождения неизвестно. Также у автора нет достоверных свидетельств того, что Попов и Айзенштейн – выдающиеся люди одного века – встречались, сотрудничали или были знакомы. Вспомним, что А.С. Попов умер в 1906 году, когда С.М. Айзенштейну было примерно 24 года (рис. 2). Однако нет и опровержений этой версии. Итак, обучаясь в киевской гимназии в 1890-х годах и затем в Киевском университете Св. Владимира, Семён Айзенштейн увлёкся опытами с электричеством, уделяя хобби почти всё свободное время. По окончании полного университетского курса начинающий конструктор устроил в своём доме демонстрацию радиосвязи, используя приёмник и передатчик собственной конструкции, чем в октябре 1901 года восхитил присутствовавшего по случаю Владимира Александровича Сухомлинова – будущего военного министра императорской России (рис. 3), а в 1905 году высочайшей волей назначенного генерал-губернатором Киевским, Подольским и Волынским, то есть всего Юго-Западного края.

Кстати, за свою по-разному оцениваемую современниками карьеру для

Рис. 2. Семён Моисеевич Айзенштейн в 1918 году

Рис. 3. Генерал-адъютант Владимир Александрович Сухомлинов

«беспроволочной связи» генерал сделал очень много, по сути, продвигал инновационную тогда идею Попова и в целом концепцию радиосвязи для снабжения армии. Немудрено, что внимательный к техническим новинкам генерал от кавалерии (1906), бывший военным министром в 1909–1915 годах, а в 1912 году получивший чин генерал-адъютанта, предложил «вспоможение» и содействие юному дарованию, выправку патента на изобретение и затем помощь в организации производства радиоприборов для армии и полиции. Согласно релевантным источникам Сухомлинов был отстранён от должности военного министра на фоне обвинений в неспособности обеспечить Российскую императорскую армию необходимым, однако сохранил за собой место в Государственном совете империи.

Знакомство с влиятельным Сухомлиновым буквально открыло изобретателю и высший свет, и связи. Тем не менее на этой развилке времени и возможностей Айзенштейны выбрали для сына иной путь. Деньги в семье водились, и Сёму направили учиться в Германию. Когда он вернулся в 1905 году, семья уже переехала из Киева в Москву.

Обретя опыт и знания, в России после первой революции молодой Айзенштейн ищет новых знакомств и перспектив, добиваясь финансирования своих проектов через Сухомлинова и Генеральный штаб. Будущий военный министр, неровно дышащий к радио, поддерживает будущего талантливого изобретателя. Айзенштейн открывает свою первую лабораторию и приступает к мелкооптовому производству маломощных радиостанций. Первый большой заказ выполнен на «отлично», а «беспроволочная линия связи» между Жмеринкой, Киевом и Одессой фактически продемонстрирована в присутствии журналистов, и сей факт зафиксирован. Редакции в восторге пишут сенсациями: «будущее наступило», «мир больше никогда не будет прежним».

Первым инвестором стал бывший народоволец по кличке «Титыч», или Юрий Макарович Тищенко, по результатам своей деятельности осуждённый и сосланный властями в Туркестан и затем с 1886 года наживавший капитал в Баку на нефтепромыслах. О масштабе личности говорит то, что на вновь созданном акционерном обществе по добыче и переработке нефти Тищенко стал партнёром миллионщика Павла Гукасова. К слову, доходность была огромная, было из чего инвестировать: уровень добычи каспийской нефти в 1904 году приближался к американскому уровню Standard Oil, но после революционных событий и русско-японской войны к своему пику уже не вернулся. Юрий Тищенко как талантливый предприниматель в своей деятельности напоминал гончего пса – такой острый был нюх на капиталы. И при этом Тищенко тоже любил электричество, как инновацию и перспективу изменения мира. Вот когда общие интересы, замешанные на электричестве и радио, сблизили трёх, казалось бы, совершенно разных людей, получивших богатый опыт по разные стороны колючей проволоки: генерала Владимира Александровича Сухомлинова, предпринимателя Юрия Тищенко и молодого изобретателя Семёна Айзенштейна.

Эволюция РОБТиТ и Айзенштейна

Дальше – больше. Уже в 1908 году (изобретателю только 25 лет, а он уже с «именем») в основном на средства Тищенко учреждается «Общество беспроволочных телеграфов и телефонов системы С.М. Айзенштейна» (ОБТиТ). По действовавшим в то время высочайшим установлениям человек иудейского вероисповедания не имел права владеть недвижимостью в столице, но зато его компаньоны могли себе это позволить без ограничений.

А в 1910 году решением Совета министров акционерному обществу ОБТиТ Айзенштейна присваивается наименование «Русское». На рис. 4 показано здание завода РОБТиТ в Санкт-Петербурге, в строительство и оборудование которого Юрий Тищенко вложил огромные деньги.

Позже эта компания станет известна как НПО «Вектор». В качестве дочернего предприятия «Ростеха» она существует и сегодня.

Уместно заметить влияние на развитие событий самого Сухомлинова: акционерные общества в императорское время утверждались не менее чем профильным министерством, а чаще Советом министров. Влиятельный во власти генерал Владимир Александрович Сухомлинов патронировал концессию партнёров с самого начала: регистрировать компанию, где компаньонами состояли иудей, неблагонадёжный народоволец и спонсор дашнаков, наверху воспротивились, только настойчивость и воля начальника Генерального штаба решила проблему. О личной заинтересованности генерала сведений нет, но известно, что позже он стал акционером компании. Благодаря связям генерала растёт объём оборонных заказов (рис. 5). Акционерное общество процветает, как и журнал с броским и привлекательным названием «Вестник телеграфии без проводов», расширивший благодаря продукции Айзенштейна тираж до невиданного в России того времени тиража в 9 тысяч экземпляров. Техническое образование в стране развито ещё слабо, грамотность была далека до всеобщей, и в такое-то время – такие успехи и распространение.

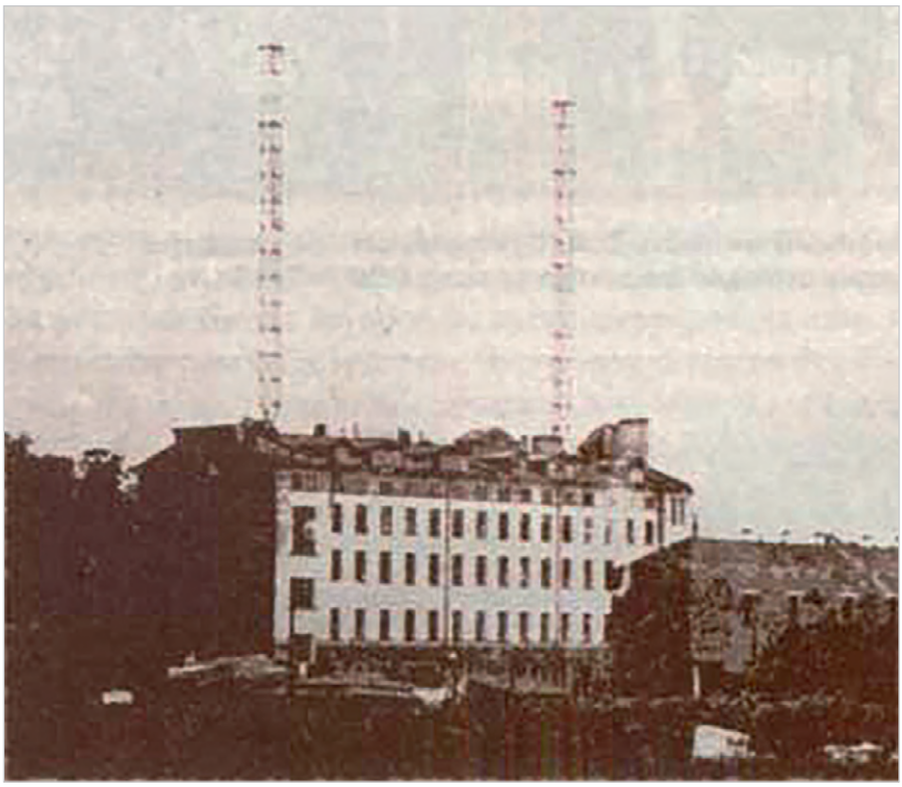


Рис. 4. Здание завода РОБТиТ в Санкт-Петербурге

Рис. 5. Приём военного госзаказа на территории завода РОБТиТ

Всё это свидетельствует о значении в то время РОБТиТ и самого Семёна Моисеевича. Только за неполных четыре года – с 1910 по 1914 – оборот предприятия вырос в 25 раз. Среди заказчиков продукции не только военные, но и нефтяники, судовладельцы, банкиры и даже почтовое ведомство.

Айзенштейн без устали работает в своей области, завязывает деловые отношения с Гульельмо Маркони (известно об обмене технической информацией между ними), через «Вестник телеграфии» распространяются акции компании. Ставший уже известным среди специалистов радио и электротехники нобелевский лауреат Маркони прорывается в состав акционеров и получает 20% акций РОБТиТ.

Выпуск радиоприёмных и передающих устройств, антенного хозяйства расширяется сегментом радиоламп и даже небольших электродвигателей. У Айзенштейна теперь работает Николай Папалекси, будущий академик и отец советской радиофизики, Рафаил Львович, будущий локомотив в продвижении и популяризации радио в СССР, Исаак Шейнберг, будущий главный инженер лондонского подразделения фирмы Маркони. По конструкторскому и общему руководству Айзенштейн РОБТиТ производит радиостанции для особых нужд, работающих при относительно низких температурах воздуха, их поставляют в северные регионы, и разрабатывает новые технические решения для военных. На рис. 5 показан приём военного госзаказа на территории завода РОБТиТ – радиостанции для нужд армии на двуколках. Успехи стали следствием жестокой конкуренции с Кронштадтской радиомастерской, а из заграничных – компанией Siemens & Halske, создавшей «отделение беспроволочной телеграфии по системе профессора Попова», компанией «Дюфлон и Константинович», Выборгским радиозаводом военного ведомства императорской России и десятка небольших, размером с мастерскую и лабораторию, предприятий. О развитии компании говорит и такой факт. До Первой мировой войны завод РОБТиТ в Петербурге состоял из пятисот сотрудников, в 1914–1925 годах количество рабочих выросло в полтора раза, организована работа в три смены. Г. Маркони с начала войны отошёл от активного бизнеса и передал в управление С. Айзенштейну филиал своей фирмы в России. Маркони вернулся в Италию, монарх которой – король Ви́ктор Эммануи́л III – 23 мая 1915 года встал на сторону коалиции Франции, Великобритании, США, России и Сербии и объявил войну Австро-Венгерской империи.

К началу Первой мировой войны больше половины всех радиостанций, в том числе коммерческого назначения, в стране построено в РОБиТ. Среди них радиостанции большой мощности, действующие на Ходынском поле в Москве, Царскосельская-императорская и приёмная станция в Твери. Во время войны Россия имела постоянную линию связи с союзниками, со столицами стран-участниц Антанты именно благодаря развёрнутой деятельности Айзенштейна и компании. Один из знаковых эпизодов того времени – история радиоигры (ключом с помощью Азбуки Морзе), осуществлённая

Рис. 6. Шуховская телебашня на Шаболовке в наши дни

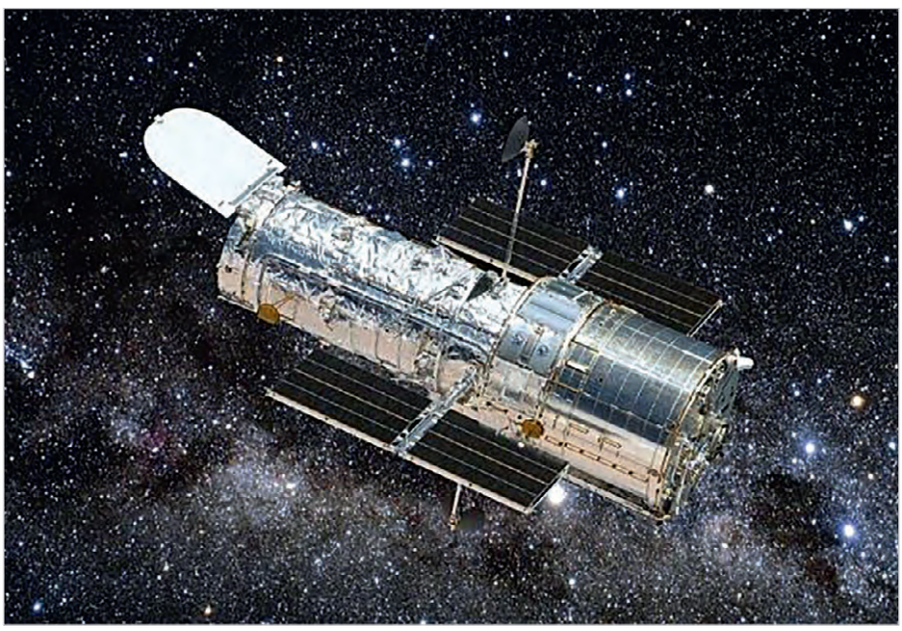


Рис. 7. Телескоп «Хаббл» в космосе

польскими военными накануне «Варшавской битвы» 1920 года и нашедшая отражение в одноимённом художественном фильме 2020 года выпуска. В кинокартине показаны прообразы радиостанций производства РОБТиТ.

В конце 1917 года происходит национализация компаний, а в следующем – согласно указанию Совета народных комиссаров Айзенштейн в возрасте 35 лет переезжает в Москву, пытается организовать новое производство. Следующей вехой в жизни неутомимого патентообладателя, конструктора радио и предпринимателя стало оснащение приёмо-передающей радиоаппаратурой Шуховской башни в Москве – сегодня это московский телецентр на Шаболовке. Конструкция из стали высотой 160 метров возводилась в 1919–1920 годах по проекту архитектора и изобретателя Владимира Григорьевича Шухова (1853–1939). На рис. 6 Шуховская телебашня на Шаболовке в наши дни.

Она же называлась радиобашней Коминтерна, в настоящее время является объектом культурного наследия народов России регионального значения. К слову, Шухов участвовал в реконструкции известных по всему миру московских зданий ГУМа, ЦУМа, Петровского пассажа, гостиницы «Метрополь», Киевского вокзала.

Затем по предложению Айзенштейна советское правительство согласовывает решение радиофицировать Транссиб, работы ведутся параллельно в нескольких областях страны.

В советское время от РОБТиТ отделились несколько производств, в частности, электролампы стали выпускать в Ленинграде в ЛОЭП «Светлана».

Личная планида

Личная планида Семёна Айзенштейна напоминала по форме синусоиду. Так, из малоизвестной теперь истории строительства Шуховской башни следует, что в 1920 году с высоты 75 метров сорвался стальной трос и повредил несколько секций башни с её антенным хозяйством. За это суд приговорил Шухова к расстрелу условно, Айзенштейна – к длительному тюремному сроку без отрыва от работы. Вероятно, не выдержав такого напора страстей, Айзенштейн в 1922 году покидает Советскую Россию и переезжает в Англию, где по давнему знакомству с Маркони руководит лондонским подразделением его компании, осуществляет опыты по совершенствованию электровакуумных ламп, параллельно перед Второй мировой организует производство радиоприёмников в Польше и Чехословакии. А в наши дни его идеи реализованы в конструкции телескопа «Хаббл» и других современных разработках в области электроники (рис. 7). Со времени, когда молодой инженер Семён Айзенштейн стал главой и конструктором в компании по производству станций радиопередачи в 1908 году, до его эмиграции и начала «нового пути» производственной деятельности прошло всего 14 лет. Умер изобретатель и предприниматель в Лондоне в 1962 году.

Инженеров и техников, развивающих конструкторскую мысль и производственные площадки электротехники и электроники, в начале XX века было не так уж и много, но среди них выделяются несколько интересных своими трудами личностей. Имя Семёна Моисеевича Айзенштейна сегодня нечасто вспоминают, однако его работы имели огромное значение для всей отрасли радиоэлектроники.

Литература

1. Приключения Семена Айзенштейна. Как создавалась индустрия радио в России. URL: https://knife.media/aisenstein/.

Методика рационального выбора видеопередатчика для БПЛА FPV-типа

Александр Ананьев, Наиль Кузияров, Сергей Пилкин

В статье рассматриваются ключевые параметры выбора видеопередатчика и осуществляется его выбор для беспилотных летательных аппаратов FPV-типа. Учитывая растущую популярность применения БПЛА в различных сферах, выбор надёжного и эффективного видеопередатчика становится особенно важным. Авторы анализируют различные характеристики видеопередатчиков, включая мощность передачи сигнала, диапазон частот, размер и вес, разъём для антенны, наличие микрофона, корпус, напряжение.

Видеопередатчик – это устройство, которое принимает видеосигнал с FPV-камеры квадрокоптера, преобразовывает его в видеосигнал определённой частоты и передаёт на принимающее устройство пилота, например, в шлем или очки. Передатчик отвечает за отправку видео, снятого камерой, на видеоприёмник. Это важнейший компонент, определяющий дальность и качество передачи видео (рис. 1).

Любой электронный компонент обладает рядом технических характеристик, на которые следует обращать внимание при выборе, это относится и к видеопередатчикам.

После выбора дрона стоит определиться, какой формат видеопередачи вы планируете использовать:

- аналоговый;
- цифровой.

Аналоговая видеопередача – основа FPV-полётов, именно работа данной системы позволила пользователям получать изображение с дрона в режиме реального времени. Она отличается высокой скоростью передачи, а также большой дальнобойностью.

Рис. 1. Видеопередатчик

Аналоговые системы FPV уже многие годы составляют основу сообщества FPV. Они работают, передавая непрерывные волновые сигналы, предлагая возможность полёта в реальном времени.

Традиционно используется аналоговая передача данных в диапазоне 5,8 ГГц. Речь идёт о самом обычном ламповом телевизионном сигнале в стандарте PAL или NTSC. Стандарт диктует не передатчик, а камера.

Аналоговый сигнал весьма ограничен в качестве. Стандарт PAL имеет 576 телевизионных линий, а NTSC и того меньше. То есть видео, которое передаётся, с трудом дотягивает по разрешению даже до обычного VGA 640×480. И неважно, какое разрешение может выдавать камера, так как стандарт телевизионного сигнала всё равно не может выдать больше. Кроме того, такой сигнал практически никогда не бывает чистым. В нём содержатся помехи, которые увеличиваются по мере удаления от передатчика.

Единственное его достоинство – очень маленькая задержка и аналоговая картинка, которая не пропадает от помех, а только зашумляется. Даже с самыми сильными помехами удаётся что-то разглядеть, и это может спасти.

Плюсы:

- доступность (аналоговые системы, как правило, дешевле);
- низкая задержка (крайне важна для таких приложений, как гонки дронов);
- широкая совместимость с разнообразным оборудованием разных производителей.

Минусы:

- низкое качество изображения (аналоговые сигналы имеют более низкое разрешение и подвержены помехам);
- ограниченные возможности (отсутствие расширенных функций, присущих цифровым системам) [1].

Цифровая видеопередача – переход на данный формат подарил пилотам возможность видеть красивую детализированную картинку сразу в очках.

Минус – её реакция на сложные условия работы. Картинка начинает тормозить либо просто пропадает, что исключает возможность принятия решения для улучшения ситуации.

Есть и цифровые протоколы, и это не обычная передача по Wi-Fi. Он обеспечивает низкую задержку, прекрасное качество изображения в HD, высокую дальность, отсутствие помех, но картинка просто исчезнет, когда дистанция станет слишком большой.

По сути, у этого набора только два недостатка: он завязан на экосистему DJI и очень дорогой. Можно также добавить сравнительно большие габариты и вес камеры и передатчика.

Плюсы:

- высокое качество изображения (обеспечивает разрешение до 1080p);
- надёжный сигнал (лучше справляется с помехами, обеспечивая более стабильную подачу);
- интегрированная экосистема (DJI предлагает комплексное решение, включающее камеру, передатчик, приёмник и очки).

Минусы:

- более высокая стоимость, чем у аналоговых установок;
- закрытая экосистема, то есть ограниченная совместимость с оборудованием сторонних производителей.

В то время как цифровые системы, такие как DJI, HDZero и Walksnail Avatar, набирают популярность, аналоговые системы продолжают занимать значительное место в сообществе FPV. Доступность, низкая задержка и широкая совместимость аналоговых систем делают их жизнеспособным выбором, особенно для конкретных приложений, таких как гонки.

Если планируется снимать видео в радиусе 2–4 км, то предпочтительна цифровая видеопередача. Она позволит видеть любые преграды на пути, а также видеть картинку, максимально приближённую к той, которую вы получите с экшн-камеры. Если необходимо летать на дальние расстояния (7 км и больше) – стоит присмотреться к аналоговой видеопередаче из-за отсутствия задержки [2].

Так как видеопередатчик выбирается для FPV-дрона, предназначенного для дальнего полета и видеосъёмки, мы будем рассматривать аналоговую видеопередачу. Рассмотрим 8 параметров, которые учитываются при выборе этого важного компонента для БПЛА FPV-типа.

Выходная мощность

Выходная мощность – это определение, сколько энергии излучает видеопередатчик в процессе работы. Большая мощность означает хорошую дальность, но сопровождается «побочными эффектами»: создаются помехи другим пилотам, которые будут летать с вами.

Большинство видеопередатчиков имеют мощность:

- 25 mW – мощность для полётов в помещении;
- 200…400 mW – на этих мощностях увеличивается дальность полёта, и вы сможете высоко взлетать и отлетать на значительные расстояния;
- 600 mW и более – мощности, которые используются для дальних полётов.

Все современные видеопередатчики имеют возможность регулировать выходную мощность сигнала, что позволяет удобно использовать дрон в помещении, выставив ему мощность в 25 mW, и на улице на дальние дистанции – на 200 или 400 mW. Более высокая мощность приводит к увеличению дальности действия, но потребляет больше заряда батареи и может увеличить помехи.

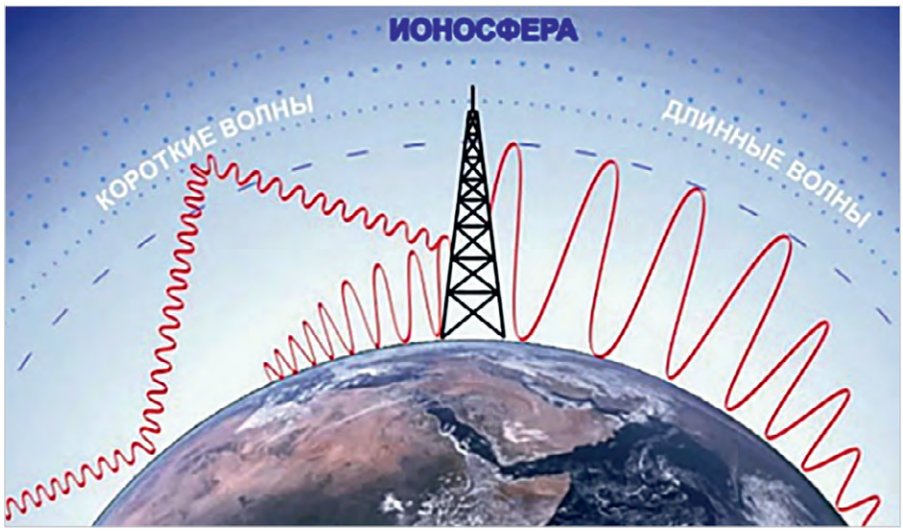


Рис. 2. Волны работы видеопередатчиков

Передатчики бывают разных размеров и разной мощности. Есть зависимость между размером и мощностью, так как все видеопередатчики нагреваются при работе, и чем больше мощность, тем сильнее нагрев. Маленький передатчик просто расплавится от большой мощности. Поэтому мощность маленьких передатчиков составляет от 25 до 100 милливатт.

Передатчики побольше выдают 200–1200 милливатт и, наконец, большие передатчики имеют мощность до 2–3 ватт и борются с нагревом при помощи радиаторов и даже кулеров.

Для FPV-полётов на 500 метров хватает 25–200 мВт (в зависимости от чистоты эфира и наличия препятствий), а если надо летать на 2–3 км, то 600–800 мВт. Дальше – больше. Но мощность тут не главное, так как большую роль играют хорошие антенны. А с плохими антеннами любая мощность будет лишь нагревать воздух без пользы [3].

Диапазон беспроводного сигнала

Общие частоты включают 5,8 ГГц (самый популярный), 2,4 ГГц и 1,3 ГГц, каждый со своим диапазоном и возможностями проникновения.

На практике большинство видеопередатчиков работают на частоте 5,8 ГГц. Это означает, что передатчик будет работать на короткой (низкой) волне (рис. 2).

Как правило, это означает, что вы будете видеть самую чёткую картинку с минимумом помех. Но есть и обратная сторона: так как волна короткая, то и огибающая способность сигнала будет меньше, а значит, если улететь за большие препятствия, то будут помехи или вообще потеря связи – это первый момент.

Второй момент: все пилоты используют аппаратуру управления, которая работает на частоте 2,4 ГГц, а значит, частоту 2,4 ГГц нельзя использовать для видео, так как она уже занята управлением. Также, если для видео использовать частоту ниже 2,4 ГГц, будут создаваться помехи для сигнала управления.

Третий момент: у диапазонов с длинной волной (1,3 ГГц и ниже) очень большие и тяжёлые антенны, поэтому их почти никто и не использует.

Где используются частоты 1,3 МГц, 900 МГц и 433 МГц? Такие частоты применяют для использования квадрокоптеров и самолетов дальнего радиуса действия, а также специальных устройств, например, TBS Crossfire. Благодаря использованию низких частот значительно увеличивается диапазон, так как сигнал с длинными волнами хорошо проходит через препятствия, такие как деревья, постройки и т.д.

Видео, которое передаётся по такой частоте, значительно хуже по качеству, чем на более высоких частотах. Это обусловлено тем, что такая частота несёт в себе меньше данных.

Количество каналов

Канал видеопередатчика – это часть одной и той же частоты, но поделённая на равные промежутки этой частоты, чтобы была возможность использовать их другим пило-

Рис. 3. Варианты разъёмов антенн

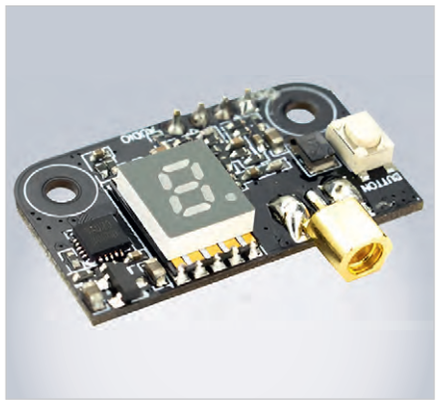


Рис. 4. IPX-разъём для антенны

Рис. 5. Вид микрофона на видеопередатчике

Таблица 1. Перечень видеопередатчиков

№	Название	Мощность (мВт)	Диапазон сигнала	Количество каналов	Размер и вес	Разъём для антенны	Микро-фон	Корпус	Напряжение	Стоимость (руб.)
1	VT5804 Q1	800	5,8	16	36×36×5,5 мм, 9 г	MMCX	–	+	2~6 В	2964
2	Foxeer 6G Reaper Extr eme	2500	5,8	40	36×27,5×8 мм, 13 г	MMCX	+	+	9~36 В	6451
3	XDRC 2.0W	2000	5,8	64	36×36×10 мм, 13,5 г	MMCX	–	–	2–8 В	1997
4	LST 3,3G 3W VTX VRX	3000	3,3	16	37,7×36,1×11 мм, 16 г	SMA	+	+	6–36 В	11 997
5	BANGSHE	500	2,4	8	55×26×17 мм, 82 г	SMA	–	+	6,5–12 В	3396
6	EWRF TS5823	600	5,8	40	30×20×8 мм, 13 г	RP-SMA	–	+	7–24 В	2125
7	XDRC VTX	1000	5,8	48	30×26×6 мм, 32 г	IPEX	–	–	2–4 В	2189
8	Cyclone XF5804 PRO	600	5,8	40	36×36×5 мм, 6 г	MMCX VTX	–	–	7–24 В	3469
9	GEPRC RAD VTX	1600	5,8	40	36,5×36,5×5,5 мм, 9,7 г	MMCX	+	–	7–36 В	7148
10	BETAFPV M03 VTX	350	5,8	48	18×14×3 мм, 1,1 г	IPX	–	–	4,5–5,5 В	4436
11	RUSHFPV TANK TINY	350	5,8	48	17×12,5×4,5 мм, 1,3 г	IPEX (UFL)	–	–	5 В	4721
12	RUSHFPV TANK ULTIMATE PLUS	800	5,8	48	33,6×22,8×4,1 мм, 6,66 г	MMCX-SMA	–	+	7–36 В	5321
13	DarwinFPV TX805P	800	5,8	40	30×35×5 мм, 6,3 г	MMCX	–	–	7–24 В	3132
14	DarwinFPV VT5804	400	5,8	40	36×36×5 мм, 3 г	IPX_E	–	–	6–26 В	3757
15	DarwinFPV HULK VTX	600	5,8	40	37,6×37,6×6,6 мм, 15,9 г	MMCX	–	+	7–30 В	4493
16	GEPRC RAD Tiny	400	5,8	48	18,5×14×5 мм, 1,1 г	UFL	–	–	5 В	3258
17	Foxeer Reaper Extreme V2	2500	5,8	72	36×27,5×8 мм, 13 г	MMCX	+	+	7–36 В	9007
18	RUSHFPV TANK SOLO	800	5,8	48	24×37×6,7 мм, 12 г	MMCX-SMA	+	+	7–36 В	7320
19	RUSHFPV TANK II ULTIMATE	800	5,8	48	36×36×4,5 мм, 6,8 г	MMCX-SMA	–	+	7–36 В	5419
20	Foxeer Reaper Infinity	5000	5,8	40	41×20×17 мм, 58 г	SMA	–	+	9–36 В	18 668
21	DarwinFPV CineApe	600	5,8	40	28×15×10 мм, 3,5 г	–	–	–	5 В	3052
22	Walksnail Avatar Mini 1S	500	5,8	8	30×30×6,5 мм, 5,1 г	IPEX	+	–	3,1–5 В	10 625
23	GEPRC RAD VTX	2500	5,8	40	36,5×36,5×12 мм, 15 г	MMCX	+	–	7–36 В	9211
24	GEPRC MATEN VTX	2000	1,2	9	36,4×36,4×7,4 мм, 14,5 г	MMCX	–	+	7–36 В	9354
25	TBS Unify Pro32 HV	1000	5,8	16	37×25×5,8 мм, 8,7 г	MMCX	+	+	6–25 В	7584
26	GEPRC RAD MINI VTX	1000	5,8	40	30,8×30,8×30,8 мм, 8,4 г	UFL	+	+	7–28 В	7012
27	GEPRC RAD Whoop VTX	400	5,8	40	25,5×25,5×26,5 мм, 2 г	UFL	–	–	5 В	3115

Таблица 2. Перечень оставшихся видеопередатчиков

Название	Мощность	Диапазон сигнала	Количество каналов	Размер	Вес	Разъём для антенны	Микрофон	Корпус	Напряжение	Стоимость (руб.)
Foxeer 6G Reaper Extreme	2500	5,8	40	36×27×8 мм	13 г	MMCX	+	+	9–36 В	6451
GEPRC RAD VTX 1,6	1600	5,8	40	36,5×36,5×5,5 мм	9,7 г	MMCX	+	–	7–36 В	7148
Foxeer Reaper Extreme V2	2500	5,8	72	36×27,5×8 мм	13 г	MMCX	+	+	7–36 В	9007
RUSHFPV TANK SOLO	800	5,8	48	24×37×6,7 мм	12 г	MMCX - SMA	+	+	7–36 В	7320
RUSHFPV TANK II ULTIMATE	800	5,8	48	36×36×4,5 мм	6,8 г	MMCX - SMA	–	+	7–36 В	5419
GEPRC RAD VTX 2,5	2500	5,8	40	36,5×36,5×12 мм	15 г	MMCX	+	–	7–36 В	9211

Таблица 3. Сравнение значимостей показателей (критериев)

Критерий – выбор ПК	Выходная мощность	Количество каналов	Встроенный микрофон	Корпус	Стоимость	Вектор приоритетов
Выходная мощность	1	2	3	4	5	0,417
Количество каналов	1/2	1	2	3	4	0,263
Встроенный микрофон	1/3	1/2	1	2	3	0,160
Корпус	1/4	1/3	1/2	1	2	0,097
Стоимость	1/5	1/4	1/3	1/2	1	0,061

там, в итоге на гонках могут летать сразу 40 и более пилотов, при этом каждый будет использовать частоту 5,8 ГГц, но у каждого будет своя часть сигнала. Канал в большинстве видеопередатчиков отображается на маленьком экране. Большее количество каналов обеспечивает гибкость в густонаселённых средах.

Передатчик можно настроить на какой-то канал, и, чтобы принимать с него изображение, приёмник должен быть настроен на тот же канал. Передатчики поддерживают примерно от 32 до 48 каналов. В целом это не так важно, если вам не требуется наличие какого-то специфического канала и вы не летаете в больших группах.

Каналы состоят из двух компонент: это полоса (Band) и собственно канал (Channel). Полоса обозначается буквами A, B, D, E, F, R, а каналы цифрами от 1 до 8. То есть полный идентификатор канала – это A8, или E3, или R1 и т.д. Каждому каналу соответствует своя частота, например, A4 – это 5805 МГц.

Размер и вес

Размер определяется наличием свободного места в раме, как это написано выше, и часто производители делают не очень компактные видеопередатчики, поэтому сравнивайте размеры с местом, которое есть в вашей раме. Вес тоже имеет значение, и чем он меньше, тем лучше [4].

Разъём для антенны

Разъёмов для антенн много (рис. 3, 4), но самые популярные – это:

- SMA;
- UFL (IPX);
- MMCX.

Они отличаются размером и прочностью. IPX целесообразен только на передатчиках формата «нано».

Встроенный микрофон

На многих видеопередатчиках стали устанавливать микрофоны, они используются для того, чтобы слышать звук работы двигателей. Никакого звука, кроме ветра и пропеллеров, не слышно, но именно эти звуки позволяют понять, что происходит с коптером (рис. 5).

Корпус

Большинство видеопередатчиков просто обтянуты термоусадкой и ничем не защищены, потому что обычно расположены внутри корпуса рамы. Если вам нужна дополнительная защита, то продаются видеопередатчики в алюминиевом или пластиковом корпусах, но они тяжелее.

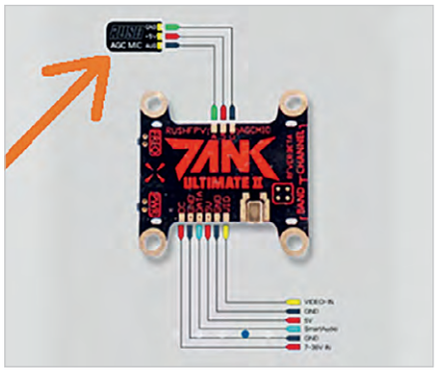


Рис. 6. Схема подключения видеопередатчика под номером 19

Напряжение

Некоторые видеопередатчики требуют определённый диапазон напряжения, поэтому при выборе учитывайте этот параметр. Например, многие видеопередатчики имеют большой диапазон входного напряжения: от 7 до 24 В, поэтому можно не беспокоиться и использовать в качестве источника питания прямое соединение с аккумулятором LiPo 2-6S.

На плате разводки питания есть контакты с 5 В, но на 5 В работать видеопередатчик FPV не будет, так как это очень ресурсоёмкий компонент, требующий большого напряжения. Видеопередатчики могут работать в большом диапазоне напряжений и поэтому подключаются напрямую к батарейному напряжению (VBAT) и, кроме того, могут нести на себе преобразователи напряжения на 5 В, от которых можно питать, допустим, камеру. При этом данные преобразователи могут давать более качественное питание (чистое от помех), чем такой же преобразователь на полётном контроллере. Но могут и не давать. Маленькие передатчики часто питаются только от 5 вольт [5].

Для более наглядного выбора и сравнения видеопередатчиков мы

собрали данные по приведённым выше параметрам из разных источников и составили таблицу (табл. 1).

Изучив вышеизложенные параметры (критерии), начинаем проводить предварительный выбор полётного контроллера под наши условия и задачи методом исключения [6, 7].

1. Видеопередатчики с порядковыми номерами 5, 6, 8, 10, 11, 14, 15, 16, 21, 22, 27 нам не подходят под наши задачи, так как имеют недостаточную мощность для передачи изображения на большие расстояния.
2. Для дальнего полёта и видеосъёмки целесообразнее будет использовать диапазон беспроводного сигнала 5,8 ГГц. Соответственно в нашем перечне видеопередатчики с порядковыми номерами 4 и 24 нам не подходят, так как имеют другие диапазоны.
3. Видеопередатчики с небольшим количеством каналов не могут позволить выполнять полёты в густонаселённых районах, такими являются образцы под номерами 1 и 25.
4. Видеопередатчик с номером 26 нам не подходит, так как на нём установлен разъём для подключения антенны UFL, который является очень хрупким и имеет маленький ресурс.
5. Видеопередатчики с номерами 3,7, 12, 13, 20 не имеют микрофонов. А при выполнении дальнего полёта этот компонент очень важен для определения состояния работы двигателей. Образец под номером 19 имеет возможность подключения микрофона (рис. 6).

Такие параметры, как диапазон беспроводного сигнала, размер, вес, разъём для антенны, напряжение у оставшихся видеопередатчиков мы рассматривать не будем, так как данные параметры имеют равные значения. Оставшиеся видеопередатчики приведены в табл. 2.

После предварительного сравнительного анализа параметров осталось шесть вариантов видеопередатчиков, далее выбор будет осуществляться методом анализа иерархий.

Для рассматриваемого случая, а именно FPV-дрона, предназначенного для дальнего полёта и видеосъёмки, необходима, в первую очередь, высокая выходная мощность. Таким образом, выходная мощность в нём имеет максимальную значимость относительно других критериев (табл. 3).

Таблица 4. Сравнение видеопередатчиков по показателю (критерию) «выходная мощность»

Критерий – выходная мощность	Foxeer 6G Reaper Extreme	GEPRC RAD VTX 1,6 Вт	Foxeer Reaper Extreme	RUSHFPV TANK SOLO	RUSHFPV TANK II ULTIMATE	GEPRC RAD VTX 2,5 Вт	Вектор приоритетов
Foxeer 6G Reaper Extreme	1	2	1	4	4	1	0,250
GEPRC RAD VTX 1,6	1/2	1	1/2	2	2	1/2	0,125
Foxeer Reaper Extreme V2	1	2	1	4	4	1	0,250
RUSHFPV TANK SOLO	1/4	1/2	1/4	1	1	1/4	0,062
RUSHFPV TANK II ULTIMATE	1/4	1/2	1/4	1	1	1/4	0,062
GEPRC RAD VTX 2,5	1	2	1	4	4	1	0,250

Таблица 5. Сравнение видеопередатчиков по показателю (критерию) «количество каналов»

Критерий – количество каналов	Foxeer 6G Reaper Extreme	GEPRC RAD VTX	Foxeer Reaper Extreme V2	RUSHFPV TANK SOLO	RUSHFPV TANK II ULTIMATE	GEPRC RAD VTX	Вектор приоритетов
Foxeer 6G Reaper Extreme	1	1	1/3	1/2	1/2	1	0,098
GEPRC RAD VTX 1,6	1	1	1/3	1/2	1/2	1	0,098
Foxeer Reaper Extreme	3	3	1	2	2	3	0,326
RUSHFPV TANK SOLO	2	2	1/2	1	1	2	0,188
RUSHFPV TANK II ULTIMATE	2	2	1/2	1	1	2	0,188
GEPRC RAD VTX 2,5	1	1	1/3	1/2	1/2	1	0,098

Таблица 6. Сравнение видеопередатчиков по показателю (критерию) «корпус»

Критерий – корпус	Foxeer 6G Reaper Extreme	GEPRC RAD VTX 1,6 Вт	Foxeer Reaper Extreme V2 2,5 Вт	RUSHFPV TANK SOLO	RUSHFPV TANK II ULTIMATE	GEPRC RAD VTX 2,5 Вт	Вектор приоритетов
Foxeer 6G Reaper Extreme	1	2	1	1	1	2	0,2
GEPRC RAD VTX 1,6	1/2	1	1/2	1/2	1/2	1	0,1
Foxeer Reaper Extreme V2	1	2	1	1	1	2	0,2
RUSHFPV TANK SOLO	1	2	1	1	1	2	0,2
RUSHFPV TANK II ULTIMATE	1	2	1	1	1	2	0,2
GEPRC RAD VTX 2,5	1/2	1	1/2	1/2	1/2	1	0,1

В результате присвоения значимостей и последующего сравнения показатели (критерии) расположились следующим образом (в порядке убывания).

1. Выходная мощность.
2. Количество каналов.
3. Корпус.
4. Встроенный микрофон.
5. Стоимость.

Следующими этапами идёт сравнение видеопередатчиков по каждому критерию. В данном случае мы сравниваем по выходной мощности. Так как видеопередатчик выбирается для FPV-дрона, предназначенного для дальнего полёта, нам необходима высокая выходная мощность для передачи изображения на дальние расстояния, поэтому значимость будет больше у тех видеопередатчиков, у которых выше выходная мощность (табл. 4).

В случае выполнения полётов в густонаселённом районе или при полётах группами необходимо большое количество каналов, чтобы не

Таблица 7. Сравнение видеопередатчиков по показателю (критерию) «встроенный микрофон»

Критерий – встроенный микрофон	Foxeer 6G Reaper Extreme	GEPRC RAD VTX	Foxeer Reaper Extreme	RUSHFPV TANK SOLO	RUSHFPV TANK II ULTIMATE	GEPRC RAD VTX	Вектор приоритетов
Foxeer 6G Reaper Extreme	1	1	1	1	4	1	0,190
GEPRC RAD VTX 1,6	1	1	1	1	4	1	0,190
Foxeer Reaper Extreme V2	1	1	1	1	4	1	0,190
RUSHFPV TANK SOLO	1	1	1	1	4	1	0,190
RUSHFPV TANK II ULTIMATE	1/4	1/4	1/4	1/4	1	1/4	0,047
GEPRC RAD VTX 2,5	1	1	1	1	4	1	0,190

Таблица 8. Сравнение видеопередатчиков по показателю (критерию) «стоимость»

Критерий – стоимость	Foxeer 6G Reaper Extreme	GEPRC RAD VTX	Foxeer Reaper Extreme V2	RUSHFPV TANK SOLO	RUSHFPV TANK II ULTIMATE	GEPRC RAD VTX	Вектор приоритетов
Foxeer 6G Reaper Extreme	1	2	3	2	1/2	3	0,227
GEPRC RAD VTX 1,6	1/2	1	2	1	1/3	2	0,131
Foxeer Reaper Extreme V2	1/3	1/2	1	1/2	1/4	1	0,073
RUSHFPV TANK SOLO	1/2	1	2	1	1/3	2	0,131
RUSHFPV TANK II ULTIMATE	2	3	4	3	1	4	0,361
GEPRC RAD VTX 2,5	1/3	1/2	1	1/2	1/4	1	0,073

Таблица 9. Приоритет видеопередатчиков по всем показателям (критериям) в порядке убывания

	Выходная мощность	Количество каналов	Корпус	Микрофон	Стоимость	Общие веса
Foxeer 6G Reaper Extreme	0,250	0,098	0,190	0,200	0,227	0,194
GEPRC RAD VTX 1,6	0,125	0,098	0,190	0,100	0,131	0,126
Foxeer Reaper Extreme V2	0,250	0,326	0,190	0,200	0,073	0,244
RUSHFPV TANK SOLO	0,062	0,188	0,190	0,200	0,131	0,133
RUSHFPV TANK II ULTIMATE	0,062	0,188	0,047	0,200	0,361	0,125
GEPRC RAD VTX 2,5	0,250	0,098	0,190	0,100	0,073	0,175

создавать друг другу помехи. Таким образом, значимость будет выше у передатчиков, у которых большее количество каналов (табл. 5).

Видеопередатчики, которые расположены в корпусе, имеют преимущество, так как при осуществлении полёта они более защищены от воздействия внешних факторов (табл. 6).

При выполнении дальнего полёта желательно иметь микрофон, чтобы слушать звук работы моторов, также по звуку можно определить их состояние. У видеопередатчиков, которые имеют встроенный микрофон, значимость будет выше (табл. 7).

Видеопередатчики имеют разную стоимость, мы разбили их на 4 группы по причине небольшой разницы в стоимости (в двух группах по два полётных контроллера). Значимость присваивалась от более низкой стоимости к более высокой, то есть чем ниже стоимость видеопередатчика, тем большее значение ему присваивалось (табл. 8).

После сравнения видеопередатчиков по всем показателям (критериям) и согласно значениям векторов приоритета получаем самые подходящие видеопередатчики в порядке убывания (табл. 9).

1. Foxeer Reaper Extreme V2.
2. Foxeer 6G Reaper Extreme.
3. GEPRC RAD VTX 1,6 Вт.
4. RUSHFPV TANK SOLO.
5. GEPRC RAD VTX 2,5 Вт.
6. RUSHFPV TANK II ULTIMATE.

В результате проведения анализа существующих видеопередатчиков на рынке, определения основных параметров, которые необходимо учитывать при выборе, мы определили оптимальный вариант видеопередатчика для беспилотных летательных аппаратов FPV-типа специального назначения.

Список литературы

1. Видеопередатчик для квадрокоптера. URL: https://profpv.ru/videoperedatchik-dlya-kvadrokoptera (дата обращения: 01.10.2024).
2. Как выбрать систему передачи FPV в 2024 году: FPV-камера, VTX, VRX, очки DJI, HDZero, Walksnail. URL: https://clck.ru/3EAvfx (дата обращения: 01.10.2024).
3. Квадрокоптер в деталях. Видеопередатчик. 25.07.2022. URL: https://dzen.ru/a/Yt7ISirWpm7rq5kO (дата обращения: 01.10.2024).
4. FPV справочник. URL: https://mydrone.ru/fpv-spravochnik/?srsltid=AfmBOopVZxTbwFYnrRQMRpsqmBLF4A90COpI_fVghe3sqOqugUNVf8AP#vtx (дата обращения: 01.10.2024).
5. Компоненты для передачи видео FPV. URL: https://mydrone.ru/kupit/fpv/komponenty/peredacha-video/?srsltid=AfmBOoop9uVJ1Zlgefm0q VYgZQ-TEUQdcgXhr0bPjCzf3saOZiPV7Txf (дата обращения: 04.10.2024).
6. AliExpress. Видеопередатчики FPV. URL: https://clck.ru/3EAw7N (дата обращения: 04.10.2024).
7. OZON. FPV-передатчики. URL: https://www.ozon.ru/category/fpv-peredatchik/?__rr=1 (дата обращения: 04.10.2024).
8. *Гуцыкова С.В.* Метод экспертных оценок. Теория и практика. М.: Когито-Центр, 2011. 888 с.
9. *Саати Т., Кернс К.М.* Аналитическое планирование. Организация систем / пер. с англ. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.

Съест ли ИИ квантовый компьютер на обед

Эдд Гент

Быстрое развитие применения искусственного интеллекта (ИИ) в моделировании физических и химических процессов заставляет задуматься: действительно ли так нужны квантовые компьютеры?

Технологические компании вкладывают миллиарды долларов в квантовые вычисления несмотря на то, что до практического применения этой технологии ещё далековато. Так для чего же будут использоваться квантовые компьютеры будущего, и почему так много экспертов убеждены, что они изменят правила игры? Создание компьютера, использующего необычные свойства квантовой механики, является идеей, которая обсуждается с 1980-х годов. Но за последние пару десятилетий учёные добились значительных успехов в создании крупномасштабных устройств. Теперь множество технологических гигантов от Google до IBM, а также несколько хорошо финансируемых стартапов инвестировали значительные суммы в эту технологию и создали несколько отдельных машин и квантовых процессоров (QPU). Теоретически квантовые компьютеры могут решать задачи, которые выходят за рамки даже самого мощного классического компьютера. Тем не менее существует широкий консенсус в отношении того, что такие устройства должны стать намного больше и надёжнее, прежде чем это произойдёт. И, как только они это сделают, есть надежда, что технология решит множество неразрешимых в настоящее время проблем в химии, физике, материаловедении и даже машинном обучении. Квантовые компьютеры обладают огромным потенциалом, и многие эксперты уверены, что они кардинально изменят способы решения сложных задач в различных областях науки и технологий. Давайте разберёмся, зачем вкладываются такие огромные средства в эту технологию и каким образом квантовые компьютеры могут изменить правила игры.

Что в них такого?

Идея создания компьютера, основанного на квантовой механике, возникла ещё в 1980-е годы, но только в последние десятилетия учёные смогли добиться значительных успехов в создании первых прототипов. Сейчас такие компании, как Google, IBM и другие стартапы, активно инвестируют в эту технологию, создавая отдельные квантовые процессоры (QPU). Основное преимущество квантовых компьютеров заключается в их способности решать задачи, которые неподвластны даже самым мощным классическим суперкомпьютерам. Они используют уникальные принципы квантовой механики, такие как суперпозиция и запутанность, чтобы параллельно обрабатывать огромные объёмы данных, что теоретически ускоряет вычисления на несколько порядков.

Что они могут?

Существует ряд задач, которые квантовые компьютеры могут решить быстрее и точнее, чем классические компьютеры. Вот несколько примеров.

- **Оптимизация и симуляция сложных систем.** Квантовые компьютеры могут ускорить процессы оптимизации, необходимые в логистике, финансовом планировании и управлении цепочками поставок. Также они могут помогать в моделировании поведения сложных систем, таких как погодные условия или молекулярные взаимодействия.
- **Фармакология и медицина.** Квантовые компьютеры могут ускорять разработку новых лекарств, позволяя проводить моделирование химических реакций и биологических процессов на уровне атомов и молекул.
- **Материалы высокого качества.** Квантовые компьютеры помогут создавать новые материалы с заданными свойствами, что полезно в таких областях, как энергетика, авиация и строительство.
- **Безопасность и криптография.** Один из ярких примеров применения квантовых компьютеров – это взлом квантовых шифров, что позволит создать новые, более безопасные криптографические системы.

Стоят ли они таких усилий?

Несмотря на то что до широкого внедрения квантовых компьютеров ещё далеко, технологические компании продолжают активно вкладывать деньги в эту сферу. Причина проста: квантовые компьютеры потенциально открывают двери к решению задач, которые до сих пор считались неразрешимыми. Даже если на практике это займёт десятилетия, успех может привести к прорыву в различных областях, что сделает такие инвестиции крайне выгодными. На протяжении многих лет технологические гиганты инвестировали миллиарды долларов в создание квантовых компьютеров, надеясь, что они произведут революцию в таких отраслях, как финансы, фармацевтика и логистика. Эти надежды особенно сильны в физике и химии, где квантовая механика играет ключевую роль. Здесь квантовые машины потенциально способны значительно превзойти традиционные компьютеры. Однако пока разработчики квантовых устройств сталкиваются с многочисленными техническими вызовами, другой игрок демонстрирует впечатляющие результаты в тех самых перспективных направлениях.

Сегодня искусственный интеллект активно используется в фундаментальных исследованиях физики, химии и материаловедения, ставя под сомнение уникальность роли квантовых вычислений. Джузеппе Карлео, профессор вычислительной физики Швейцарского федерального технологического института (EPFL), отмечает стремительное развитие возможностей ИИ в моделировании квантовых систем. Недавно он стал соавтором статьи в журнале *Science*, демонстрирующей, что методы на основе нейронных сетей становятся основным инстру-

ментом для исследования материалов с выраженными квантовыми эффектами. Кроме того, компания Meta представила новую модель ИИ, обученную на большом массиве данных о материалах, которая заняла лидирующие позиции в рейтинге подходов машинного обучения для поиска новых веществ. Учитывая последние достижения, учёные начинают задаваться вопросом: сможет ли ИИ решить большинство значимых задач в химии и материаловедении ещё до того, как квантовые компьютеры выйдут на уровень промышленной эксплуатации. «Появление новых конкурентов в сфере машинного обучения ставит под угрозу будущие приложения квантовых компьютеров, – утверждает Карлео. – Я считаю, что компании, вложившие средства в квантовые разработки, вскоре осознают, что их инвестиции не оправдались».

Преодоление трудностей

Основным элементом квантового компьютера является кубит – квантовый аналог бита в классическом компьютере. Отличие заключается в том, что кубит может находиться в промежуточном состоянии, представляя одновременно как 0, так и 1, что называется суперпозицией. Эта уникальная особенность позволяет квантовым компьютерам выполнять операции с невероятной скоростью и эффективностью. Кубиты могут быть реализованы на различных устройствах, таких как сверхпроводники, захваченные ионы или даже фотоны (частицы света). Современные квантовые компьютеры уже достигли отметки в 1000 кубитов, но большинство из них содержат всего несколько десятков или сотен кубитов. Эти устройства гораздо более уязвимы к внешним помехам, чем классические компьютеры, из-за высокой чувствительности квантовых состояний к изменениям окружающей среды, таким как колебания температуры или электромагнитные поля. Это затрудняет выполнение длинных квантовых программ, необходимых для решения практических задач. Однако это не означает, что сегодняшние квантовые компьютеры бесполезны, отметил Уильям Оливер, директор Центра квантовой инженерии в Массачусетском технологическом институте (MIT) в США. «Сейчас квантовые компьютеры в основном используются для того, чтобы научиться строить квантовые компьютеры большего масштаба, а также для освоения методов работы с ними», – объяснил он в интервью Live *Science*. Разработка более крупных квантовых процессоров помогает понять, как создавать более мощные и стабильные квантовые машины, а также предоставляет платформу для разработки и тестирования новых квантовых алгоритмов. Они также позволяют исследователям проверять различные схемы квантовой коррекции ошибок, которые будут критичны для раскрытия полного потенциала этой технологии. Эти схемы часто включают распределение квантовой информации между несколькими физическими кубитами для формирования одного «логического кубита», который гораздо более устойчив к ошибкам. Люткенхаус, исполнительный директор Института квантовых вычислений в Университете Ватерлоо в Канаде, подчеркнул, что недавние достижения в этой области указывают на то, что отказоустойчивые квантовые вычисления могут быть ближе, чем кажется. Несколько компаний, включая QuEra, Quantinuum и Google, недавно продемонстрировали способность создавать логические кубиты с высокой надёжностью. Увеличение числа кубитов до тысяч или даже миллионов, необходимых для решения практических задач, займёт время и потребует значительных инженерных усилий, добавил Люткенхаус. Но как только это будет достигнуто, откроется множество захватывающих возможностей для применения.

Сложные расчёты

Основной потенциал квантовых компьютеров кроется в их способности выполнять определённые виды вычислений значительно быстрее, чем это возможно на традиционных машинах. Чтобы достичь этой цели, необходимы квантовые процессоры, намного превосходящие по мощности существующие. Хотя самые продвинутые устройства уже насчитывают около тысячи кубитов, для значительного превосходства над классическими системами, потребуется, вероятно, десятки тысяч, а то и миллионы кубитов. Когда такое оборудование появится, квантовые алгоритмы вроде алгоритма Шора смогут решать задачи экспоненциальной сложности гораздо эффективнее, чем классические аналоги. Тем не менее для большинства квантовых алгоритмов с явными коммерческими перспективами, таких как поиск в базах данных, оптимизация решений или применение методов искусственного интеллекта, скорость вычислений возрастает не так существенно. Более того, в недавней работе, подготовленной совместно с руководителем отде-

ла квантовых вычислений Microsoft Маттиасом Тройером, отмечается, что даже эти теоретические преимущества могут испаряться, учитывая, что квантовое оборудование функционирует на порядок медленнее современных компьютерных чипов. Дополнительную проблему представляет передача значительных объёмов классических данных в квантовую систему и обратно, что усложняет использование квантовых компьютеров в реальных условиях. Исходя из этого, Тройер и его команда делают вывод, что квантовые компьютеры должны сосредоточиться на задачах в химии и материаловедении, требующих моделирования систем, управляемых квантовыми эффектами. Ведь компьютер, работающий по тем же законам квантовой механики, что и исследуемая система, обладает естественным преимуществом. Именно эта идея лежала в основе концепции квантовых вычислений с момента её зарождения благодаря известному физику Ричарду Фейнману. Многие явления, представляющие огромный научный и экономический интерес, такие как поведение белков, молекулярная структура лекарственных препаратов и свойства материалов, подчиняются правилам квантовой механики. Их характеристики зависят от взаимодействия элементарных частиц, прежде всего электронов, поэтому точное моделирование этих взаимодействий могло бы дать возможность прогнозировать свойства молекул. Это открывает путь к открытию новых лекарств, созданию более эффективных аккумуляторов и другим важным научным прорывам.

Но квантовая механика, со своими парадоксальными правилами, особенно явление квантовой запутанности, которое связывает состояния удалённых частиц, делает взаимодействие частиц крайне сложным. Точная оценка таких взаимодействий требует сложных математических расчётов, сложность которых растёт экспоненциально с увеличением числа частиц. Это делает моделирование больших квантовых систем практически невозможным на классических компьютерах. Здесь на сцену выходят квантовые компьютеры. Работая на тех же квантовых принципах, они могут эффективно представлять квантовые состояния, что недоступно традиционным машинам. Более того, они способны использовать квантовые эффекты для ускорения вычислений. Однако не все квантовые системы одинаково сложны. Степень их сложности зависит от силы взаимодействия или корреляции между частицами. В системах с сильными взаимодействиями учёт всех этих связей резко увеличивает объём вычислений, необходимых для моделирования. Тем не менее в большинстве систем, представляющих практический интерес для химиков и материаловедов, взаимодействие частиц слабое, объясняет Карлео. Это значит, что частицы мало влияют на поведение друг друга, что значительно упрощает моделирование. Поэтому, по мнению Карлео, квантовые компьютеры вряд ли принесут значительное преимущество для решения большинства задач в химии и материаловедении. Уже существуют классические методы, способные точно моделировать слабосвязанные системы, самым известным из которых является теория функционала плотности (DFT). Основной принцип DFT состоит в том, что для понимания ключевых характеристик системы достаточно знать электронную плотность – распределение электронов в пространстве. Этот подход сильно упрощает вычисления, сохраняя высокую точность для слабосвязанных систем.

Моделирование больших систем с применением таких методов требует значительной вычислительной мощности. Однако за последние годы произошёл всплеск исследований, использующих DFT для анализа химических соединений, биомолекул и материалов. Получаемые данные затем используются для обучения нейронных сетей. Эти модели искусственного интеллекта выявляют закономерности в данных, позволяющие предсказывать свойства конкретных химических структур. При этом они на порядки дешевле в исполнении, чем стандартные расчёты DFT. Этот подход позволил значительно увеличить размеры систем, которые можно моделировать, – до 100 000 атомов одновременно, а также продолжительность самого моделирования, рассказывает Александр Ткаченко, профессор физики Университета Люксембурга. «Это потрясающе, – отмечает он. – Теперь вы действительно можете охватить большую часть химии». По словам Александра Исаева, профессора химии Университета Карнеги-Меллон, подобные методы уже находят широкое применение в химической промышленности и науках о жизни. Ранее недоступные задачи, такие как оптимизация химических реакций, разработка новых материалов для аккумуляторов и изучение связывания белков, теперь становятся выполнимыми.

Как и в большинстве приложений искусственного интеллекта, основной ограничивающий фактор – это данные, подчёркивает Исаев. Недавно опубликованная компанией Meta база данных о материалах содержала результаты расчётов теории функционала плотности (DFT) для 118 миллионов молекул. Обученная на этих данных модель продемонстрировала выдающиеся результаты, однако создание обучающей выборки потребовало колоссальных вычислительных ресурсов, значительно превышающих возможности большинства исследовательских групп. Это указывает на то, что для полной реализации потенциала данного подхода потребуются значительные инвестиции. Тем не менее моделирование слабо коррелированных систем с использованием DFT не сталкивается с проблемой экспоненциального роста сложности, поясняет Ткаченко. Это означает, что при наличии достаточного количества данных и вычислительных мощностей классические подходы на базе ИИ могут успешно справляться даже с самыми крупными системами. Учитывая, что появление квантовых компьютеров достаточной мощности ожидается лишь через несколько десятилетий, текущие тенденции развития ИИ предполагают, что он способен достичь важных целей, таких как точное моделирование взаимодействия лекарств с белками, значительно раньше.

Моделирование

При моделировании сильно коррелированных квантовых систем, где частицы интенсивно взаимодействуют, методы вроде теории функционала плотности (DFT) быстро теряют свою эффективность. Хотя такие системы встречаются реже, они включают материалы с потенциально революционными свойствами, такими как высокотемпературная сверхпроводимость или сверхчувствительные сенсоры. Даже в этих случаях искусственный интеллект демонстрирует значительный прогресс. В 2017 году

Джузеппе Карлео из EPFL и Маттиас Тройер из Microsoft опубликовали пионерскую работу в журнале *Science*, доказав, что нейронные сети способны моделировать сильно коррелированные квантовые системы. Подход отличается от традиционного обучения на данных. По словам Карлео, он напоминает стратегию AlphaZero от DeepMind, которая научилась играть в го, шахматы и сёги (разновидность японской настольной игры, которая произошла от распространения на Ближнем Востоке арабского варианта шахмат), опираясь исключительно на правила игр и способность играть против самой себя. В данном случае правила игры диктуются уравнением Шрёдингера, которое точно описывает квантовое состояние системы, или волновую функцию. Модель размещает частицы в разных конфигурациях и измеряет энергию системы. Задача состоит в достижении минимальной энергетической конфигурации (так называемого основного состояния), определяющей свойства системы. Процесс повторяется до тех пор, пока энергия не стабилизируется, что сигнализирует о достижении основного состояния или близкого к нему.

Карлео подчёркивает, что сила этих моделей заключается в их способности сжатия информации. «Волновая функция – чрезвычайно сложное математическое образование, – объясняет он. – Но было доказано, что нейронная сеть способна уловить всю сложность этого объекта таким образом, что его можно обработать на обычной машине». С момента публикации статьи 2017 года этот подход был расширен на множество сильно коррелированных систем, и результаты оказались весьма обнадеживающими, сообщает Карлео. В статье, вышедшей в журнале *Science* месяц назад, он и его коллеги проверили ведущие методы классического моделирования на сложных задачах квантового моделирования, создав эталон для оценки достижений как в классических, так и в квантовых подходах. Карлео утверждает, что методы, основанные на нейронных сетях, сейчас являются наилучшими для моделирования множества самых сложных квантовых систем, которые они тестировали. «Машинное обучение действительно занимает центральное место в решении многих из этих задач», – комментирует он.

Эти методы привлекли внимание крупных игроков в технологической индустрии. В августе исследователи из DeepMind представили в журнале *Science* статью, в которой продемонстрировано точное моделирование возбуждённых состояний в квантовых системах, что однажды может помочь предсказывать поведение солнечных батарей, датчиков и лазеров. Команда Microsoft Research также разработала пакет программного обеспечения с открытым исходным кодом, чтобы облегчить исследователям использование нейронных сетей для моделирования. «Одним из важнейших преимуществ этого подхода является то, что он использует огромные инвестиции в программные и аппаратные ресурсы для ИИ», – отмечает Филиппо Вичентини, профессор искусственного интеллекта и физики конденсированного состояния в Политехнической школе во Франции, также участвовавший в сравнительном анализе, опубликованном в *Science*. «Использование этих технологических достижений даёт нам большое преимущество», – добавляет он. Однако стоит отметить, что поскольку основные состояния находятся методом проб и ошибок, а не посредством точных расчётов, они представляют собой лишь приближения. Именно это, по словам Хуана Карраскильи, исследователя из ETH Zurich и одного из авторов сравнительного анализа в *Science*, делает этот подход столь полезным.

Для точного учёта всех взаимодействий в сильно коррелированной системе требуется экспоненциально возрастающее по мере увеличения размера системы количество вычислений. Но если приемлемо получить не абсолютно, но достаточно точный результат, появляется возможность сократить путь. «Может быть, нет надежды полностью точно воспроизвести его, – признаёт Карраскилья. – Но есть шанс собрать достаточное количество информации, чтобы охватить все интересующие нас аспекты. И если нам это удастся, то это будет практически неотличимо от настоящего решения».

Несмотря на то, что сильно коррелированные системы обычно трудно моделировать классическим способом, бывают исключения. Например, некоторые системы, относящиеся к моделированию высокотемпературной сверхпроводимости, как указано в статье 2023 года в Nature Communications. «Из-за экспоненциальной сложности всегда найдутся задачи, для которых невозможно найти короткого пути, – говорит Фрэнк Ноэ, руководитель исследовательской группы в Microsoft Research, занимающейся этими вопросами. – Но я полагаю, что количество таких систем, для которых нельзя найти хорошего короткого пути, значительно сократится».

Новые горизонты квантовых вычислений

Помимо уже упомянутых областей, квантовые компьютеры могут предложить новые интересные возможности.

Оптимизация – одна из ключевых сфер, где квантовые компьютеры могут показать своё преимущество. Такие задачи, как управление транспортными потоками в городах или определение оптимальных маршрутов для логистических компаний, могут быть решены с использованием квантовых алгоритмов. Оптимизация финансовых портфелей также может стать одним из направлений, где квантовые вычисления проявят себя.

Машинное обучение – ещё одно направление, где квантовые компьютеры могут сыграть главную роль. Алгоритмы квантовых вычислений могут помочь в обработке больших объёмов данных для выявления скрытых закономерностей.

Важно помнить, что в этих областях квантовые преимущества могут быть небольшими, и для их реализации на практике потребуется преодолеть серьёзные технические барьеры. Тем не менее прогресс в квантовых алгоритмах стимулирует инновации в классических вычислениях. Разработчики квантовых алгоритмов создают новые методы оптимизации, а специалисты в области компьютерных наук улучшают свои собственные алгоритмы, стирая разницу в эффективности.

Другие направления исследований включают использование квантовых компьютеров для поиска в больших базах данных, что может быть полезным для работы с большими наборами информации. Однако здесь возникают дополнительные сложности, связанные с преобразованием классических данных в квантовые состояния, что замедляет весь процесс и снижает вычислительные преимущества.

Однако на сегодняшний день большинство квантовых алгоритмов предлагают лишь небольшое ускорение по сравнению с классическими метода-

ми. Квантовые устройства работают медленнее, чем электронные схемы на основе транзисторов, и эти небольшие преимущества могут легко исчезнуть при практической реализации.

Несмотря на имеющиеся трудности, есть мнение, что область квантовых вычислений будет развиваться и открывать новые возможности. Уильям Оливер отметил, что для максимального использования потенциала квантовых компьютеров необходимо продолжать исследование и разработку базовых строительных блоков квантовых алгоритмов – элементарных математических операций, которые можно объединять для решения более сложных задач. «Наша цель – разработать квантовые алгоритмы, определить, какие примитивы полезны, а затем комбинировать их для создания новых алгоритмов», – сказал Оливер. Люткенхаус также подчеркнул важность гибкости в подходе к инвестициям в квантовые технологии. «Не фокусируйтесь слишком рано на конкретных задачах, – советует он. – Нам предстоит решить множество общих проблем, и это даст начало множеству новых приложений». Эти рекомендации помогают компаниям ориентироваться в стратегиях развития квантовых вычислений, делая акцент на фундаментальных исследованиях и открытых возможностях для будущих приложений.

Состоится ли волшебство?

Тем не менее Стефани Чишек, доцент физики в Университете Оттавы, предупреждает, что предсказать, какие задачи смогут решить нейронные сети, бывает непросто. В некоторых сложных системах они демонстрируют отличные результаты, тогда как в других, казалось бы, простых ситуациях, вычислительная нагрузка внезапно резко возрастает. «Мы на самом деле не понимаем их ограничения, – говорит она. – Никто пока не знает, при каких условиях системы становятся трудно представимыми с помощью этих нейронных сетей». Между тем значительные успехи были достигнуты и в других классических методах квантового моделирования, отмечает Антуан Жорж, директор Центра вычислительной квантовой физики Института Флэтайрона в Нью-Йорке, также принимавший участие в недавнем сравнительном исследовании в *Science*. «Каждый из этих методов сам по себе успешен, и они прекрасно дополняют друг друга, – говорит он. – Поэтому я не думаю, что методы машинного обучения просто вытеснят все остальные подходы». Квантовые компьютеры тоже найдут своё место, считает Мартин Реттелер, старший директор по квантовым решениям в компании IonQ, специализирующейся на разработке квантовых компьютеров на основе захваченных ионов. Хотя он соглашается, что классические подходы, вероятно, справятся с моделированием слабо коррелированных систем, он убеждён, что некоторые большие, сильно коррелированные системы останутся вне их досягаемости. «Экспоненциальный рост догонит вас, – предостерегает он. – Существуют случаи с сильно коррелированными системами, которые мы не сможем обрабатывать классически. Я абсолютно уверен в этом». По словам Реттелера, полноценный отказоустойчивый квантовый компьютер с гораздо большим числом кубитов, чем у существующих устройств, напротив, сможет моделировать такие системы. Это поможет открыть новые катализаторы или углубить наше понимание метаболических процессов в организме, что представляет большой интерес, например, для фармацевтической отрасли. Нейронные сети, вероятно, позволят расширить круг решаемых задач, полагает Джей Гамбетта, возглавляющий направление квантовых вычислений в IBM, но он сомневается, что они смогут справиться с самыми сложными задачами, важными для бизнеса. «Именно поэтому многие компании, связанные с химией, продолжают исследовать квантовые вычисления, ведь они точно знают, где методы аппроксимации дают сбой», – говорит он. Гамбетта также отвергает мысль о том, что эти технологии соперничают друг с другом. По его мнению, будущее вычислительной техники, скорее всего, будет основано на сочетании обоих подходов, где квантовые и классические программы будут работать сообща для решения задач. «Я не думаю, что они конкурируют. Скорее, они дополняют друг друга», – считает он. Однако Скотт Аароносон, глава Центра квантовой информации в Техасском университете, утверждает, что методы машинного обучения непосредственно конкурируют с квантовыми компьютерами в таких областях, как квантовая химия и физика конденсированных сред. Он прогнозирует, что сочетание машинного обучения и квантового моделирования во многих случаях превзойдёт чисто классические подходы, но это станет очевидно только после появления более крупных и надёжных квантовых компьютеров. «С самого начала я рассматриваю квантовые вычисления в первую очередь как научный поиск, а любые промышленные приложения – как приятный бонус, – говорит Аароносон. – Поэтому, если квантовое моделирование окажется лучше классического машинного обучения лишь в редких случаях, я не буду так разочарован, как некоторые мои коллеги».

Одной из областей, где квантовые компьютеры, вероятно, обладают значительным преимуществом, является моделирование эволюции сложных квантовых систем во времени, отмечает Карлео из EPFL. Это может предоставить ценную информацию для учёных в таких областях, как статистическая механика и физика высоких энергий, но маловероятно, что найдёт практические применения в ближайшем будущем. «Это более специализированные приложения, которые, на мой взгляд, не оправдывают огромных вложений и всеобщего ажиотажа», – добавляет Карлео.

Тем не менее эксперты, с которыми беседовал MIT Technology Review, утверждают, что отсутствие коммерческих приложений не является поводом прекращать разработку квантовых вычислений, способных привести к фундаментальным научным прорывам в долгосрочной перспективе. «Наука подобна набору вложенных друг в друга матрёшек – решив одну задачу, вы сталкиваетесь с пятью новыми, – говорит Вичентини. – Сложность объектов нашего изучения со временем только возрастает, поэтому нам всегда будут нужны более мощные инструменты».

Заключение

Хотя квантовые компьютеры обещают революционные изменения в ряде отраслей, их реализация сталкивается с серьёзными техническими проблемами. В то же время успехи ИИ вызывают у части экспертов сомнения в необходимости таких инвестиций. Только будущее покажет, какая технология окажется более успешной в решении сложных научных задач.

НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Как фиктивные исследования подрывают науку, замедляя прогресс

В научном мире циркулируют сотни тысяч поддельных исследований. За последнее десятилетие тайные коммерческие организации по всему миру превратили производство, продажу и распространение фальшивых научных работ в индустрию. Эти «бумажные фабрики» зарабатывают деньги, подрывая доверие к научной литературе, на которую полагаются врачи, инженеры и исследователи при принятии решений, влияющих на человеческие жизни.

Масштабы проблемы

Точные масштабы проблемы оценить сложно. На сегодняшний день около 55 000 научных статей были отозваны по различным причинам, но эксперты считают, что количество поддельных работ может достигать нескольких сотен тысяч. Эти фальшивые исследования не только вводят в заблуждение, но и заставляют законных учёных тратить время и ресурсы на проверку сомнительных данных, уравнений, изображений и методологий, которые в итоге оказываются вымышленными.

Даже когда поддельные статьи обнаруживаются – часто благодаря усилиям энтузиастов, которые в свободное время проверяют публикации, – научные журналы не спешат их отзывать. Это позволяет фальшивым исследованиям оставаться в научной литературе, загрязняя глобальную базу знаний, которая должна служить источником достоверной информации для новых открытий и обсуждений.

Влияние на науку и медицину

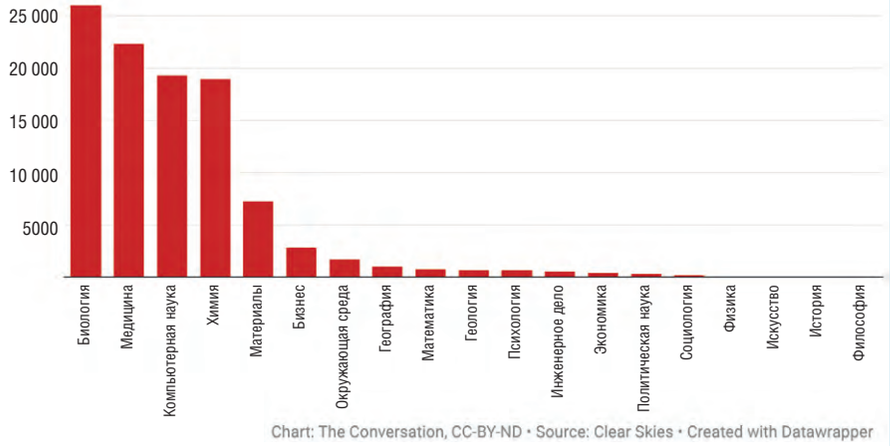
Фальшивые исследования замедляют прогресс в критически важных областях, таких как разработка лекарств и методов лечения. Особенно сильно страдают сферы, связанные с онкологией и медициной, где поддельные данные могут вводить учёных в заблуждение и задерживать появление жизненно важных открытий. Например, исследования рака и COVID-19 оказались под угрозой из-за фальшивых статей, в то время как менее прикладные области, такие как философия и искусство, пострадали меньше.

Пример: история с молекулой SNHG1

Один из ярких примеров – случай с молекулой SNHG1, описанный в статье 2018 года в Американском журнале исследований рака. Онколог Фрэнк Чаковски из Университета Уэйна в Детройте заинтересовался этой молекулой, так как она, по утверждению авторов, могла взаимодействовать с химическими реакциями, которые он изучал в контексте рака простаты. Однако эксперименты Чаковски и его коллеги Стивена Зильске не подтвердили заявленных результатов.

Документы, опубликованные в 2022 году, вызвавшие тревогу Papermill Alarm

В 2022 году, когда Адам Дэй анализировал при помощи программного обеспечения Papermill Alarm своей компании публикации из базы данных OpenAlex, он обнаружил значительное количество потенциально фальшивых документов, особенно в области биологии, медицины, компьютерной науки, химии и материаловедения. Обнаруженные документы содержали текстовые сходства с известными подделками.



Зильске заметил, что графики в статье содержали идентичные данные для разных клеточных линий, что практически невозможно в реальных экспериментах. После его обращения к редакции журнала статья была отозвана из-за «фальсифицированных материалов и/или данных». Чаковски отметил, что наука и так сложна, а фальшивые исследования только усложняют процесс поиска истины.

Проблемы системы рецензирования

Система рецензирования, призванная обеспечивать качество научных публикаций, далека от совершенства. Рецензенты, как правило, работают на добровольной основе и не всегда проверяют данные на достоверность, предполагая, что авторы действуют добросовестно. Кроме того, некоторые издатели могут выбирать рецензентов, которые с большей вероятностью одобрят статьи, чтобы избежать финансовых потерь, связанных с отклонением рукописей.

Ещё одна проблема – коррупция в системе рецензирования. Некоторые исследователи создают «круги взаимного цитирования», где они рецензируют работы друг друга. Бумажные фабрики могут создавать фальшивых рецензентов или даже подкупать редакторов журналов.

Масштабы проблемы бумажных фабрик

Точное время появления бумажных фабрик неизвестно, но первая статья, связанная с их деятельностью, была отозвана в 2004 году. С тех пор проблема только усугубилась. Анализ 53 000 статей, представленных шести издателям, показал, что от 2 до 46% заявок могут быть подозрительными. Например, издатель Wiley отозвал более 11 300 статей и закрыл 19 журналов, которые особенно пострадали от фальшивых публикаций.

По оценкам Адама Дэя из компании Clear Skies, около 2% всех научных статей, опубликованных в 2022 году, могли быть сфабрикованы. В таких областях, как биология и медицина, этот показатель может достигать 3%, а в некоторых подразделах, например, в исследованиях рака, – ещё выше.

Возможные решения

Для борьбы с фальшивыми исследованиями предлагаются различные меры.

1. **Улучшение системы рецензирования.** Рецензирование должно стать более прозрачным и строгим. Рецензенты должны получать вознаграждение за свою работу, а их отчёты – публиковаться, даже если статья отклонена.
2. **Технологические инструменты.** Компании, такие как Clear Skies и Research Signals, разрабатывают инструменты для выявления поддельных статей. Например, инструмент Papermill Alarm помогает издателям обнаруживать работы, созданные «бумажными фабриками».
3. **Международное сотрудничество.** Издатели и научные организации должны обмениваться данными и технологиями для борьбы с мошенничеством.
4. **Изменение издательской модели.** Необходимо пересмотреть текущую модель, при которой издатели получают прибыль за счёт публикации статей. Вместо этого акцент должен быть сделан на обеспечение качества и прозрачности.

Заключение

Фальшивые исследования представляют серьёзную угрозу для науки, подрывая доверие к научной литературе и замедляя прогресс в критически важных областях. Борьба с этой проблемой требует совместных усилий учёных, издателей и технологических компаний. Только так можно сохранить целостность науки и обеспечить её дальнейшее развитие на благо человечества.

РЭА особого назначения: системы электронного мониторинга подконтрольных лиц (СЭМПЛ)

Ухум Исыкуев

В связи с гуманистической концепцией, принятой в пенитенциарных системах многих государств мира, в том числе в России, подозреваемых и осуждённых, не представляющих большой угрозы для общества, не изолируют в исправительных учреждениях: в качестве наказания суды назначают ограничение свободы и перемещений, запрет на осуществление определённых действий в течение конкретного времени. Для контроля таких лиц задействованы электронные системы мониторинга подконтрольных лиц (СЭМПЛ). В статье рассматриваются актуальные вопросы взаимодействии элементов системы, перспективы повышения её эффективности и расширения функционала.

Предпосылки развития СЭМПЛ в России

СЭМПЛ активно и уже много лет применяют в Израиле, США, Великобритании, Финляндии, Испании и многих других странах. В России при фактически многолетнем наличии уголовно-исполнительных инспекций (УИИ) в исправительной системе под управлением Федеральной службы исполнения наказаний (ФСИН РФ) СЭМПЛ начали применять относительно недавно: примерно 13 лет назад. Эта возможность открылась по нескольким причинам. Во-первых, была проблема перенасыщения тюрем, и осуждённых по статьям небольшой тяжести или на заключительных сроках отбывания наказаний старались переводить на более мягкий режим. Во-вторых, среди отбывающих наказание всегда были разные категории осуждённых. Сложно поставить рядом уголовника-рецидивиста и мать пятерых несовершеннолетних детей, совершившую преступление по неосторожности. Поэтому возникла необходимость дифференцировать в части условий реализации наказания и следственной изоляции разные категории осуждённых и подозреваемых. В-третьих, с развитием устойчивой беспроводной связи появилась возможность технического осуществления дистанционного контроля за местонахождением и даже занятиями осуждённых к ограничению свободы подконтрольных лиц, в том числе при избранной мере пресечения «домашний арест». Все эти факторы так или иначе взаимосвязаны между собой. В результате было усовершенствовано и правовое поле: в поправках к Уголовно-исполнительному кодексу с 1 января 2010 года регламентировали такие понятия, как «домашний арест» для гражданских лиц и сопутствующие правовые нормы [2, 10]. На рис. 1 представлена схема элементов в СЭПМЛ. Как правило, браслет – как контрольный элемент – фиксируется на ноге (рис. 2). На рис. 3 представлен вид действующей системы СЭМПЛ-36.

Из открытых статистических данных понятно, что в 2023 году под контролем

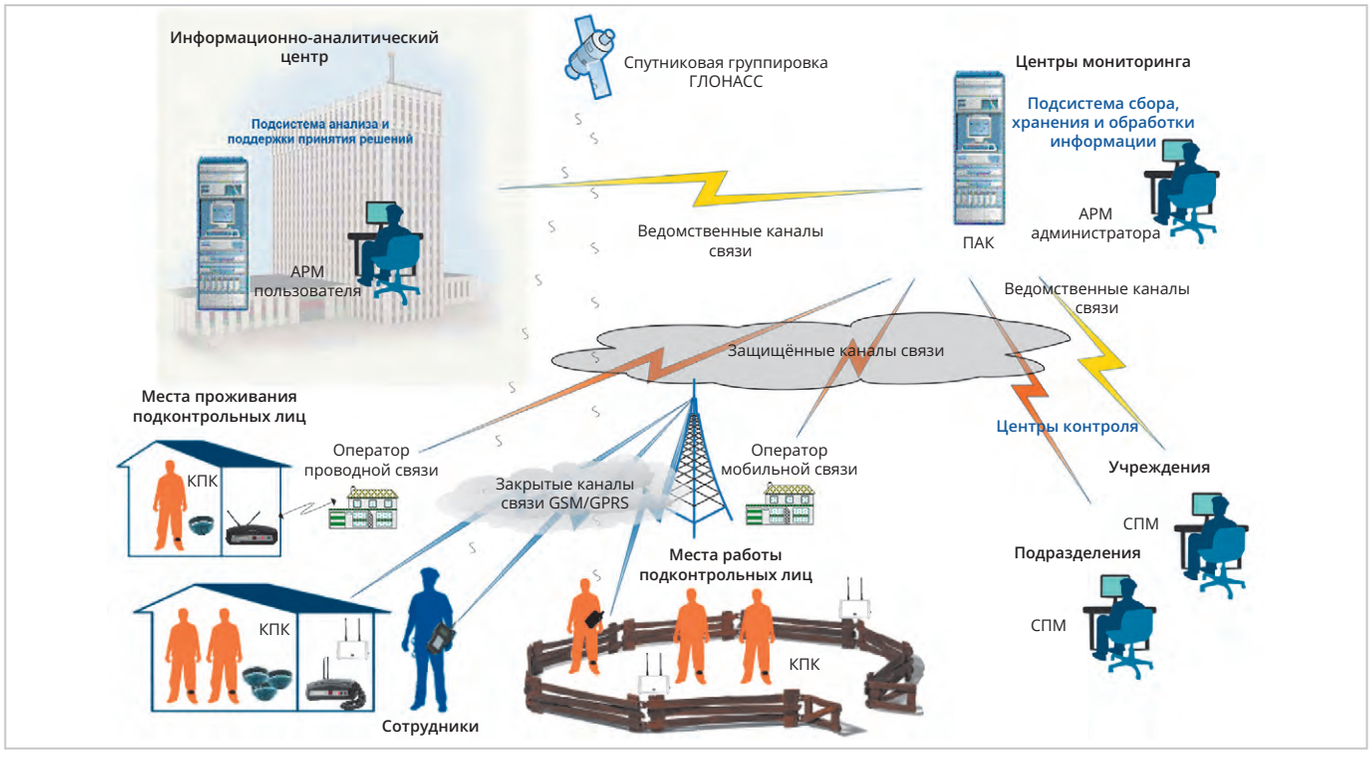


Рис. 1. Схема элементов СЭМПЛ

Рис. 2. Зафиксированный на ноге браслет СЭМПЛ

Рис. 3. СЭМПЛ-36

Рис. 5. Иллюстрация мобильного контролирующего устройства (МКУ)

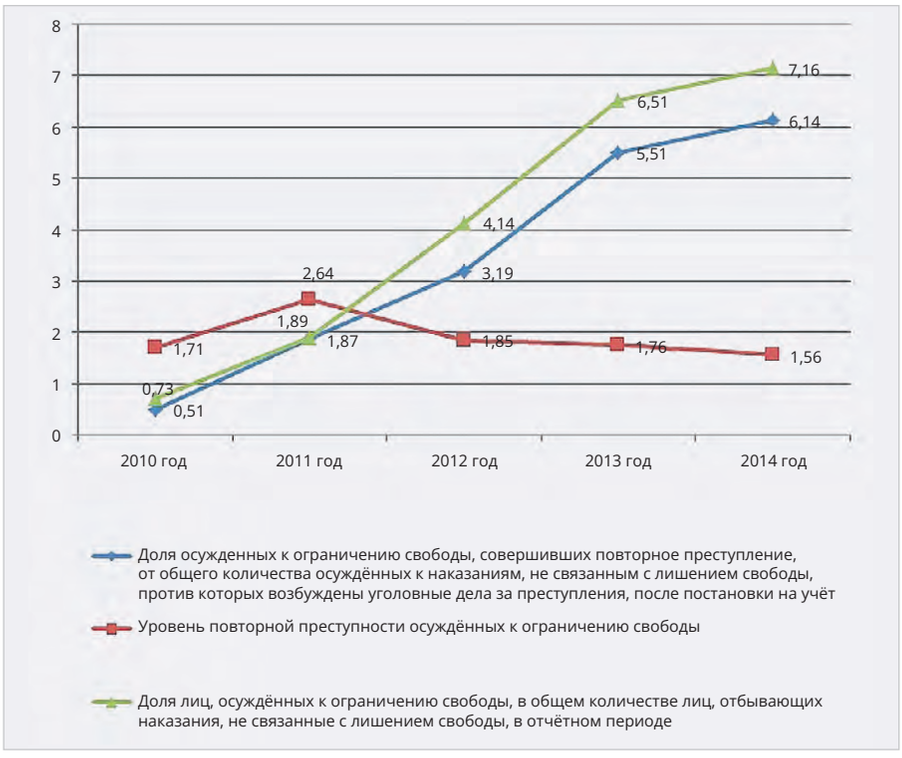


Рис. 4. Динамика роста применения браслетов и СЭМПЛ в России

СЭМПЛ в Росси и находились 22,5 тыс. осуждённых на ограничение свободы и 32,2 тыс. лиц, которым суд назначил домашний арест или запрет определённых действий. За один только год с помощью СЭМПЛ выявлено более 7 тыс. нарушений порядка и условий отбывания наказания и исполнения мер пресечения [1]. За более ранний период времени, кроме прочего, есть статистика, представленная в научной (рецензируемой ВАК РФ) работе [2]. В этой связи может быть интересен график роста применения электронных браслетов и СЭМПЛ в целом в последние 10 лет в России, представленный на рис. 4. Эта тенденция ещё более увеличилась в последние годы, статистики по которым ещё нет.

При внедрении СЭМПЛ ФСИН России использовала передовой опыт своих зарубежных коллег [12]. В частности, были заимствованы отдельные технические решения при производстве электронных браслетов, стационарных контролирующих устройств (СКУ) и мобильных контролирующих устройств (МКУ) – рис. 5.

Более того, до последнего времени элементы СЭМПЛ в России не производили «от и до» на отечественной элементной базе, поскольку в полном объёме таких компонентов пока не существует. Поэтому электронные устройства СЭМПЛ закупались в КНР и затем адаптировались силами профильного (для ФСИН) учреждения – Федерального государственного унитарного предприятия «Центр информационно-технического обеспечения и связи Федеральной службы исполнения наказаний» (ФГУП ФСИН России) к непосредственному применению в российских условиях. Причём нередко элементам системы присваивались собственные «номера» моделей, к примеру СЭМПЛ-36, но состоит она всё же из китайских компонентов. Та же ситуация относительно производства элементов СЭМПЛ актуальна в других странах мира.

Более того, в России запатентовали в сочетании с СЭМПЛ собственные полезные модели, причём вся система взаимодействия только в России считается инновационной. На самом деле в некоторых других странах, на примере США, Великобритании, Израиля и др., система была изобретена и отлажена более 30 лет назад, а затем совершенствовалась в соответствии с развитием сотовой связи и GPS-позиционирования. За примерами отечественных патентов можно обратиться в том числе к источникам [6, 8].

Отличия отечественных элементов СЭМПЛ от зарубежных заметны в меньшем физическом весе и габаритах отдельных устройств, связанных с приёмопередатчиками ГЛОНАСС (в других странах позиционирование происходит с помощью иных спутниковых систем), а также в конструктивной адаптации браслетов к резким перепадам температур и особенностям климата в регионах.

Итак, система ЭМПЛ запатентована в России как полезная модель, однако количество усовершенствований и модификаций системы за рубежом постоянно увеличивается. В нашей стране пока только высказывают авторитетные мнения о необходимости (силами ЦИТОС) модифицировать систему и делать новые разработки с расширенным функционалом, соответствующим вызовам времени.

Тем не менее такие мнения есть. «Сейчас стоит задача гуманизации пенитенциарной системы, например, за преступления по неосторожности. Если изоляция [от общества] не требуется, а человек готов соблюдать все требования домашнего ареста или ограни-

Рис. 6. Браслет Megastek 4G производства КНР

Рис. 7. Инфографика назначения СЭМПЛ

чения свободы, то надо их применять, чтобы не нагружать систему, не вовлекать человека в уголовную среду. При увеличении количества домашних арестов нагрузка на сотрудников уголовно-исполнительных инспекций, несомненно, возрастёт, поэтому техника должна брать большую часть рутинной работы на себя», – сообщил С.В. Щербаков, назначенный указом президента от 2 июля 2024 года заместителем директора ФСИН с задачей курирования цифровизации и в целом развития отрасли [1].

Отсюда понятно, что уже на высоком уровне пытаются усовершенствовать электронные браслеты для возможности более частого применения домашнего ареста вместо заключения под стражу и ограничения свободы вместо отправки в колонию. С технической стороны необходим качественный импульс в части новых разработок СЭМПЛ, создании устройств в сегменте микроэлектроники с улучшенной системой позиционирования, повышенной ёмкостью аккумулятора и дополнительным функционалом для более качественного отслеживания местоположения подконтрольных лиц.

Среди браслетов для СЭМПЛ (зарубежное название – «трекер для контроля заключенных») известны более 220 моделей, из них больше половины применяются ФСИН России. Среди них порядка 70 видов браслетов с ограниченным функционалом, то есть условно старых, но при этом недорогих по себестоимости. К ним относятся системы, работающие по принципу «ответного сигнала», но без функции отслеживания подконтрольного лица. К примеру, на браслет, снабжённый световым и звуковым индикаторами, совмещёнными с миниатюрным моторчиком вибрации, поступает сигнал с пульта контроля. «Лицо с браслетом» должно в течение непродолжительного времени нажать на устройстве контрольную кнопку для формирования и дистанционной беспроводной передачи ответного сигнала. Как вариант подобной взаимосвязи подконтрольное лицо должно позвонить по телефону своему инспектору с определённого своего номера. В первых простых моделях браслетов применялись крепления с фиксацией отверткой с нестандартными шлицами.

Типичный браслет СЭМПЛ модели Megastek 4G, представленный на рис. 6, имеет следующие технические характеристики. Браслет оснащён относительно мощным встроенным Li-Ion аккумулятором с номинальным напряжением 3,8 В и ёмкостью 2000 мА. В средней активности системы (без сигналов тревоги) и при условии «свежего» хорошо заряженного устройства энергии аккумулятора хватает на 10 суток использования без подзарядки. Поддерживает стандарты GPS, Wi-Fi, AGPS, LBS с высокой точностью определения позиций. Сотовая связь LTE обеспечивается при помощи установленной внутри корпуса SIM-карты 3G/4G. Может подавать сигнал SOS. Время зарядки до полной ёмкости АКБ составляет примерно 2,5 часа. Диапазон допустимых температур: –20…+55°С. Ток потребления в активном режиме тревоги – 70 мА. Уровень защиты – IP68. Габаритные размеры – 70×43×29 мм. Изготовлен из износостойкого пластика. Тем не менее из-за низкого качества бывают случаи ложной тревоги.

Есть и гендерные особенности: женщины с тонкими предплечьями могут исхитриться и снять браслет с руки, поэтому им браслет крепится на ногу. Однако сразу же возникла другая проблема: с браслетом на ноге женщина не может надеть ни колготки, ни сапоги. Такие вопросы решаются сотрудниками УИС индивидуально.

СЭМПЛ представляет собой радиометку (сам браслет) и адаптированное для работы с ним беспроводным способом стационарное контролирующее устройство (СКУ), обеспечивающее непрерывный круглосуточный приём сигнала с электронного браслета. Последнее устанавливается в квартире, работает от осветительной сети 230 В, но также имеет внутренний аккумулятор на случай отключения электроэнергии. Постоянное ношение браслета не отменяет контрольных визитов инспектора УИС без предупреждения: два раза в неделю. Но закон требует разрешение собственника квартиры на установку электронного оборудования. Из правоприменительной практики ясно, что, если собственник помещения родственник подконтрольного лица откажется давать необходимое согласие, потому что очень боится гаджетов, сотрудники ФСИН будут навещать подконтрольного чаще, система СЭМПЛ установлена не будет, и закон не нарушат.

На рис. 7 представлена наглядная иллюстрация назначения СЭМПЛ.

Рис. 8. Настройка системы фиксации браслета

Рис. 10. Способ перекуса или снятия браслета СЭМПЛ

Рис. 9. Один из вариантов системы ЭМПЛ, адаптированной в России

Рис. 11. Браслет СЭМПЛ с ремешком и элементом электронной защёлки в переносном зарядном устройстве

Особенности браслетов СЭМПЛ

Первые модели браслетов выпуска 2010–2012 годов применяют до сего дня, ибо по специальному заказу заготовлено их было несколько миллионов. Инспектор отдела охраны (ОО) или отдела режима (ОР) надевает и фиксирует браслет на ногу или руку подконтрольного лица и проводит его настройку с помощью второго устройства в системе – программатора со встроенным модулем LTE и GPS. Этот шаг представлен на рис. 8.

Радиоэлектронный браслет (РБ) – специализированное электронное устройство, предназначенное для ношения на теле лица, состоящего на учёте в уголовно-исполнительной инспекции (УИС), подконтрольного лица, в отношении которого судом определена мера ограничения свободы в виде домашнего ареста (и в других случаях) с целью постоянной дистанционной идентификации и отслеживания его места нахождения. При этом РБ имеет встроенную систему контроля несанкционированного снятия и вскрытия корпуса. При подобных несанкционированных действиях на пульт дежурного инспектора УИИ поступает сигнал тревоги.

Внешний вид браслетов системы ЭМПЛ может отличаться в зависимости от модели браслета: сегодня применяется более восьми модификаций, разработанных с 2010 по 2014 год. Система в оформленном виде заработала с 2012 года, но и сегодня ещё далека от совершенства. Так, ЦИТОС ФСИН РФ разрабатывает новое техническое задание на модернизацию СЭМПЛ. Один из вариантов СЭМПЛ представлен на рис. 9.

Ремешок сделан из силикона с регулировкой длины и системой защиты от перерезывания: в силиконовый состав вживлены стальные нити. Так же, как в XX веке для укрепления стекол во внутренних дверях жилых домов и общественных зданий вставлялись скреплённые между собой проволочные нити в виде сетки – так называемые армированные стёкла. При ударе стекло деформировалось (вдавливалось), но не рассыпалось. Что касается ремешков браслетов СЭМПЛ, в каждом идут 3–4 продольные стальные нити, перекусить которые можно только с помощью специального инструмента – бокореза. Это действие представлено на рис. 10.

Стальные нити внутри браслета подключены к внутреннему датчику контроля, который срабатывает по принципу «на разрыв»: выдаёт цифровой сигнал «тревоги» при нарушении целостности электрической цепи, элементом которой являются стальные нити внутри силиконового ремешка. Соответственно, при санкционированном снятии браслета этим занимается (перекусывает ремешок механическим способом) сотрудник УИС ФСИН, предварительно отключив контроль на ответной части системы ЭМПЛ.

Что касается относительно новых моделей браслетов и в целом СЭМПЛ образца 2014 года, то браслеты в них уже являются многоразовыми, то есть защищёнными от несанкционированного повреждения и снятия, а модуль фиксации в электронном браслете имеет дистанционно активируемую защёлку-фиксатор ремешка. На рис. 11 представлен браслет в переносном зарядном устройстве, где также видны элементы ремешка и электронной защёлки.

Тревожный сигнал на пульт оператора от СЭМПЛ поступает при попытке вскрыть или повредить браслет при внешних механических воздействиях, перерезании ремешка-фиксатора, при понижении температуры (срабатывает датчик температуры при попытке снять браслет), при нажатии на кнопку SOS. Также устройство сформирует и передаст тревожный сигнал, если человек с браслетом отойдёт от СКУ более чем на 20–100 метров (параметр регулируется). При этом домашний Интернет специально не блокируется, им могут пользоваться другие люди и члены семьи. Инспектор УИС всегда может связаться с поднадзорным лицом, и, если тот не отвечает, инспектор должен выехать на место и разобраться в том, что произошло. Если очевидно, что подконтрольное лицо грубо нарушает установленный режим, материалы передаются в отдел розыска, и оперативники начинают поиски беглеца. Взаимодействие элементов СЭМПЛ можно увидеть на рис. 12.

Браслеты отличаются по параметрам. Устаревшие РБ представлены на рис. 13.

Более совершенные устройства типа СЭМПЛ-36, Мета, МТ65, МТ110, МТ200, G737P, Xexun, Hesvt S3 и аналогичные по функционалу, имеющиеся на вооружении пенитенциарных систем как в России, так и в других странах мира, имеют расширенный функционал. Внешний вид браслета Hevst S3 представлен на рис. 14.

С помощью такого РБ можно отслеживать в постоянном режиме перемещение человека даже в одном поме-

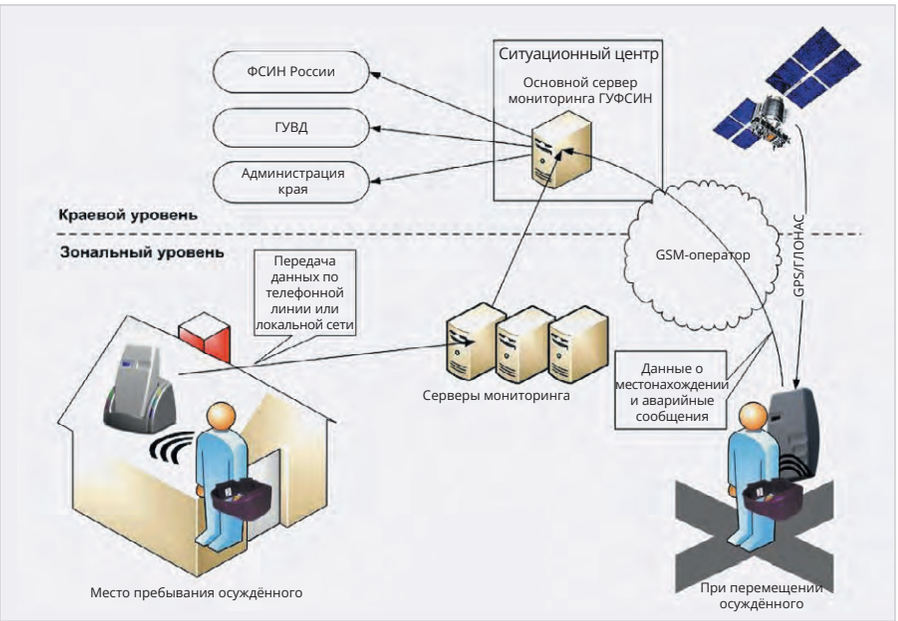


Рис. 12. Взаимодействие элементов СЭМПЛ (источник: sinkovskoe.ru)

щении, не то что вне его. У новых браслетов GPS-модуль имеет улучшенные показатели восприимчивости сигналов спутников (GPS): –159 dBm APP/PC, что обеспечивает точность определения местоположения до 5 метров, уровень защиты от воды от IP65 до IP68 с ёмкостью литиевого аккумулятора 1600–2000 мА/ч (напряжение 3,7–3,8 В) при весе всего 38 г.

Причём модуль GPS работает даже под водой. То есть с таким браслетом на руке или ноге можно принимать душ, плавать в бассейне (у кого он доступен дома) и мыть руки. Такие браслеты можно приобрести относительно свободно, к примеру, у китайского поставщика Али Экспресс по цене от 25 до 70 тыс. рублей и с доставкой по России. Что касается ответных устройств для настройки и тестирования, то в свободной продаже их нет.

Состав СЭМПЛ

Стационарное контрольное устройство (СКУ) установлено в диспетчерской, в кабинете инспектора или на посту дежурной смены подразделения УИС ФСИН. Мобильное контрольное устройство, по функционалу напоминающее планшет (КПК), имеет инспекторский состав УИС для контроля или поиска нарушивших режим ограничения свободы лиц. Устройство идентификации подконтрольного лица (УИПЛ), в зависимости от модели и конфигурации СЭМПЛ, состоит из закреплённого на руке или ноге радиоэлектронного браслета (РБ) и устройства, выполняющего функцию «пейджера» с обратной связью, или РБ в сочетании с передатчиком на поясе или рядом с человеком – в этом случае в системе действует также функционал приёма-передачи сигналов GPS, как показано на рис. 12. Блок-схема, из которой понятен алгоритм работы системы, представлена на рис. 15.

При необходимости в цепи взаимодействия может быть задействовано приёмо-передающее усилительное устройство (ППУУ) с функцией усиления сигналов передатчика СЭМПЛ. Такая ситуация может быть актуальна при осуществлении контроля над соответствующим контингентом в местах их удалённой работы (не дома).

Браслет состоит из замка, датчика температуры и радиомодуля приёмопередатчика. Датчик температуры нужен для того, чтобы дополнительно следить за контактом с телом человека, и является элементом контроля против снятия браслета, управляющегося с помощью микроконтроллера и питающегося от аккумулятора. Это характерно для всех типов электронных браслетов, модернизация которых часто происходит за счёт улучшения защиты корпуса и застёжки от взлома. Может показаться странным, что при разработке такого «умного» устройства слежения основное внимание уделяется противодействию примитивному способу взлома. Однако это оправдано тем, что при несанкционированном снятии браслета невозможно точно установить местоположение конкретного человека. В этой связи уместно рассматривать методику определения мест

Рис. 13. Внешний вид РБ, применявшихся до 2020 года

Рис. 14. Новые виды РБ, применявшихся до 2020 года

для размещения элементов системы электронного мониторинга подконтрольных лиц на базе радиосети передачи данных с применением геоинформационных технологий [3, 12].

Некоторые особенности и традиции систем контроля

В пенитенциарной системе России издавна, начиная со времён «инвалидных рот» и «инвалидных команд», когда впоследствии переименованные из них в «нестроевые» части армии занимались в том числе охраной малых крепостей, «съезжих домов», «острогов» и тюрем, принято разделение служб. Так, охрана места заключения (по внешнему периметру) была в ведении «отдела охраны» (ОО), а охрана заключённых или подозреваемых внутри тюрьмы, колонии, изолятора временного содержания (ИВС) или следственного изолятора (СИЗО) – в ведении «отдела режима» (ОР). Сотрудники отдела режима контролируют также особый контингент заключенных – «расконвоированных ЗК», которым разрешено относительно свободно перемещаться по территории тюрьмы или учреждения.

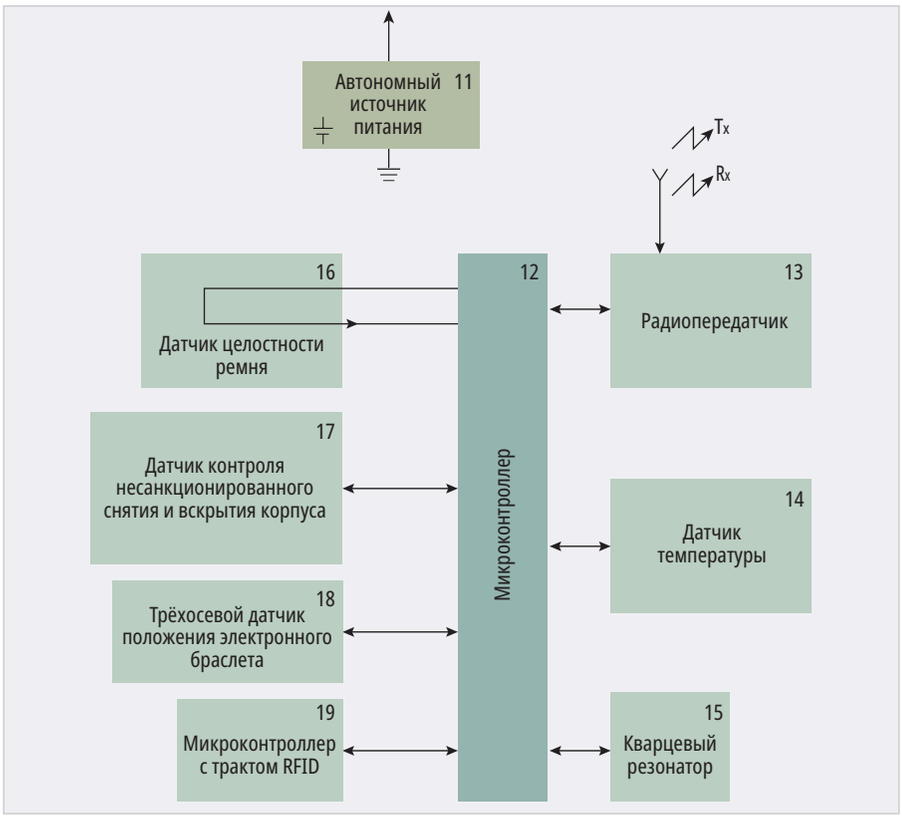


Рис. 15. Блок-схема СЭМПЛ

Как правило, это люди, срок заключения которых заканчивается, «активисты» и пособники администрации, а также положительно характеризующиеся и зарекомендовавшие себя заключённые. Для этого контингента и некоторых других лиц, но в особых случаях, таких как временное свидание с родственниками в колониях-поселениях, где осуждённые перемещаются также относительно свободно, в тюремных и специализированных больницах (к примеру, Санкт-Петербургской ПБСТИН – психиатрическая больница специализированного типа с интенсивным наблюдением) в системе ФСИН РФ, находящихся под вооруженной охраной, к подконтрольным лицам применяются браслеты СЭМПЛ.

Кроме отдела режима и специальных больниц систему дистанционного электронного контроля за определёнными лицами активно используют уголовно-исполнительные инспекции (УИС) – это основной вид контроля подозреваемых или осужденных к ограничению свободы в виде домашнего ареста.

Для охраны внешнего периметра против побегов подконтрольного контингента используются специально разработанные средства сигнализации для охраны периметра (к примеру, системы «Пион», «Багульник» и другие более современные), принцип работы которых основан на изменении ёмкости между «землёй» и объектом – при его приближении. Сигнал звуковой тревоги поступает на пульт дежурной смены, дежурного помощника начальника отдела охраны, а вырабатывается электронной системой при приближении человека к охраняемому периметру. Чувствительность устройств регулируется, а обслуживание находится в компетенции штатного инженера, аттестованного сотрудника пенитенциарной системы, имеющего специальное звание (как и все аттестованные сотрудники). Аналоги этих систем – анахронизмов эпохи – до сих применяются ФСИН России.

Это одна из самых неповоротливых в части технических инноваций РЭА служб. Некоторые системы модифицированы, но всё равно устойчивость их работы и надёжность оставляют желать лучшего.

Кстати, системы охраны периметра аналогичного принципа, но значительно лучшего качества и технической оснащённости, используются десятки лет и по сей день пограничным управлением ФСБ России и установлены вдоль заборов с металлической сеткой параллельно КСП (контрольно-следовой полосе). Те же системы используются десяток лет для охраны объектов транспорта: там, где есть заборы или иные административные барьеры, ограничивающие доступ на вокзалы (в том числе автовокзалы), аэропорты, территории вокруг мостов (по регламенту за 30–100 метров до него) и прочих режимных объектов. На заключительном этапе поездки на поезде и приближении к вокзалу крупного города (в разных регионах страны масштаб считается по-своему) пассажир из окна железнодорожного вагона может видеть как заборы, так и систему проводов, закреплённую вдоль каждой секции в гофрированном кабель-канале.

В соседней Финляндии подобный контроль приближения людей и животных вдоль заборов на основе реагирования электронной системы на изменение ёмкости (автоматического мониторинга и сравнения с эталонной) обеспечен не только у вокзалов, но и почти по всей длине железнодорожного пути; сделано это не столько для безопасности граждан на объектах транспорта, сколько для безопасности животных, которые без заборов могли переходить пути с риском быть сбитыми скоростным локомотивом.

Системы сигнализации и безопасности применяются не только ёмкостные, но и комплексные, в том числе на основе пироэлектрических датчиков, реагирующих на движение предмета, излучающего тепло. Миновать почти все подобные системы можно, облачившись в полностью защищённый, условно экранированный костюм, но не из фольги, а из стекла или сопутствующих материалов, так как фольга даст эффект изменения ёмкости при приближении к ограждению с соответствующей электронной системой. Экран из стекла (или соответствующего материала) прозрачен, позволяет заинтересованному лицу видеть и контролировать обстановку, отражает сканирующие лучи пироэлектрических датчиков и не изменяет баланс ёмкости, на реагирование по которому настроена система типа «Багульник» и аналогичные.

Итак, при приближении животного к ограждению, снабжённому системой сигнализации, раздаётся громкий отпугивающий звук, а на некоторых участках при касании ограждения можно получить удар током нелетального уровня – аналог действия устройства «электропастух». Электропитание системы обеспечивается посредством СЭС и ВЭС (солнечных панелей и ветрогенераторных установок) с преобразователями энергии.

В России до такого (электронной сигнализации вдоль всех ограничительных заборов) ещё не дошли из-за огромных расстояний и территории, а также в связи с многими другими обстоятельствами.

Особенности защищённого канала передачи данных

Защита беспроводного канала передачи данных разработана на основе системы защищённой мобильной связи B-Force. Назначение системы B-Force – обеспечивать защищённую связь с абонентами мобильной сети через открытые каналы связи Интернет в зашифрованном режиме с гарантированным уровнем криптографической стойкости к дешифрации. В B-Force предусматривались несколько видов обмена информацией: голосовая связь, пересылка файлов, пересылка коротких текстовых сообщений в зашифрованном виде с использованием криптографических алгоритмов. В качестве основного алгоритма шифрования использовался национальный стандарт РФ ГОСТ 28147-2010. Также предусмотрены алгоритмы шифрования AES128, AES192, AES256 TwoFish128, TwoFish256. Возможность настройки необходимого алгоритма шифрования остаётся за администратором системы.

Пересылаемые сигналы, СМС и история действий могут быть гарантированно удалены (без возможности восстановления) непосредственно на сервере СЭМПЛ, при этом информация о перемещении объекта с трекером сохраняется в памяти, что служит доказательной базой для дальнейшего привлечения к ответственности нарушителя.

Кроме того, система B-Force использует стандартные открытые протоколы передачи данных SIP, TLS, SRTP, ZRTP, OTR. По протоколу TLS обеспечивается зашифрованный аутентифицированный канал для передачи сигнализации, SRTP обеспечивает шифрование и аутентификацию медиа-трафика, ZRTP и OTR реализуют обмен ключами для обеспечения связи «точка–точка». Поддержка схемы SIPS предусматривает установку шифрованного соединения TLS на всех сегментах сети передачи данных коммуникации. Совокупность применения протоколов в комплексе обеспечивает гарантии безопасности канала для передаваемой информации. Для сеансов связи используется (каждый раз) новый уникальный случайно сгенерированный ключ. Выработка общего секретного ключа для симметричного шифрования реализована на основе алгоритма Диффи-Хеллмана на эллиптических кривых по алгоритмам ECDH256, ECDH384.

Для защиты от возможной хакерской атаки в формате «человек посередине» (алгоритма передачи данных MITM) применяют протоколы ZRTP и OTR, предоставляющие механизм четырёхсимвольной строки аутентификации и системы «контрольного вопроса» и «ответа», что полностью исключает возможность перехвата сигнала электронного браслета [7].

Относительно архитектуры сети B-Force известно, что элементы системы поставляются только юридическим лицам и по безналичному расчёту. Таким образом, завладеть оборудованием для экспериментов с ним теоретически невозможно. Впрочем, уже сегодня архитектура СЭМПЛ, применяемая в ЕС, США и Великобритании, имеет трёхуровневую защиту от вмешательства MITM. К этому стремятся и отечественные разработчики.

Иными словами, заглушить по радиоэфиру сигнал LTE или GPS беспроводным способом вполне возможно, но изменить и модифицировать его, к примеру, создать дубль носимого датчика-браслета в системе СЭМПЛ, затруднительно, хотя теоретически на старых версиях возможно.

Пути совершенствования СЭМПЛ

Кроме актуальной задачи сохранения и улучшения технической и аппаратной защищённости системы разработчики работают над увеличением автономности оборудования. До сих пор нередки случаи, когда сбои связи или систем навигации достигают нескольких десятков минут, когда нет возможности получать устойчивый сигнал с устройства слежения, связанного с трекером. Другая задача, требующая внимания и совершенствования РЭА в рассматриваемой области, – повышение надёжности и ёмкости аккумуляторов для трекеров при сохранении или даже уменьшении их форм-фактора. Это общая актуальнейшая проблема современной электроники, уже решаемая на разных уровнях в направлении альтернативных источников электропитания, включая выработку и аккумулирование электроэнергии (в том числе с помощью ионисторов) от малого уровня освещённости интерьеров, от движения человека, от преобразования в связке температура-ток вплоть до преобразования потовых выделений в электрический ток и последующего усиления мощности с помощью современной электронной элементной базы. Рассмотренные выше микросхемы и модули для миниатюрных трансиверов с их условно малым током потребления в активном режиме серьёзно рассматриваются как возможности для усовершенствования передающих каналов и в целом надёжности СЭМПЛ.

Для таких устройств, как браслеты и модемы в СЭМПЛ, важны быстрая зарядка, небольшое энергопотребление устройств и значительная ёмкость АКБ, чтобы зарядить девайс за пару минут и на несколько дней забыть о зарядке. Проблема в том, что быстрая зарядка изнашивает аккумулятор, а устойчивые к этому АКБ малого форм-фактора ещё только испытывают. За прошедшие 20 лет прирост объёма (ёмкости) электрической батареи составил от 2 тыс. мА·ч до 5–6 тыс. мА·ч, а прирост мощности в скорости зарядки – примерно с 5–10 Вт до 60–100 Вт. При этом электронные устройства пропорционально стали «прожорливее» из-за расширенного функционала, связанного с IoT, ИИ и другими приложениями.

Ещё одна пока нерешённая проблема – взаимодействие двух (и более) датчиков в одной СЭМПЛ. Проблема касается не единичного, а условно массового контроля осуждённых, подозреваемых, заключённых или их действий. Так, СЭМПЛ, адаптированная в России, пока не может считывать и передавать данные с двух браслетов (к примеру, ограничены в правах действий и перемещения муж и жена, совместно проживающие, или группа мигрантов). Также возникают проблемы, если два или более подконтрольных лица с зафиксированными у них браслетами относятся к приёмному оборудованию (коммуникационный прибор контроля – СКУ) одного инспектора. Тогда в соответствии с принципами звонков по сотовой связи происходит та же ситуация, когда двое пользователей услуг сотовой связи совершают одномоментные звонки друг другу – соединения не произойдёт. Проблему решить можно, но пока это не сделано.

То же касается условной неготовности СЭМПЛ к применению устройств – глушителей радиосигнала и GPS. К это-

му мы ещё вернемся ниже. Сигнал от браслета или модема просто пропадёт, как будто прервалась связь. Соответственно, подконтрольное лицо теоретически может выйти из дома или определённого для него места, имея с собой мобильный «глушитель», совершить определённые действия и вернуться, затем устройство глушения выключить. В этом случае контролирующий инспектор будет иметь информацию только о пропаже сигнала связи в СЭМПЛ, но отследить по точкам (местам) перемещения «клиента» не сможет. В качестве варианта усовершенствования системы в браслет или модем СЭМПЛ уместно добавить карту памяти, на которую в автоматическом режиме будет фиксироваться информация о времени пропадания сигнала LTE и (или) GPS, включаться аудио- или видеозапись (при соответствующем оснащении в будущем), а при устранении помех связи, восстановлении канала передачи данных с карты памяти информация будет передана на сервер, пусть и с задержкой, но она останется зафиксированной.

В 2024 году мобильный Интернет и Wi-Fi не охватывают и не могут охватить всю территорию обширной России. По данным за прошлый год на постоянной основе выход в Интернет имеет только 70% людей в мире. Без связи остаются более 2 млрд людей. К качеству соединения тоже остаются вопросы. Даже в крупных городах есть места, где возможна беспрерывная сотовая связь только 3G или EDGE. Есть надежда, что в ближайшую декаду лет проблема с площадью покрытия решится с помощью внедрения спутникового Интернета с бóльшей областью покрытия, и тогда СЭМПЛ можно будет применять почти в любой точке планеты Земля.

Так, если вспомнить историю второй ссылки Наполеона Бонапарте на удалённый от цивилизации остров Святой Елены, в нынешних реалиях с помощью современной СЭМПЛ с выходом на спутниковую группировку можно будет контролировать и сосланного императора без обязательного содержания гарнизона для его охраны. Таким образом, современная электроника и в этой области представляет значительные перспективы для оптимизации оборудования и высвобождения людей для более квалифицированных действий.

Уже давно адаптация разных разъёмов и выяснение различий между USB-C, USB 3.0, USB 3.1 Gen 1, USB 3.1 Gen 2, USB 3.2 Gen 2, USB 3.2 Gen 1×1, USB 3.2 Gen 1×2 и USB 3.2 Gen 2×2 ни потребителей РЭА, ни разработчиков не радует. Что касается рассматриваемых устройств для СЭМПЛ производства КНР, то запатентованные стандарты зарядки и передачи данных различны, и это мешает унификации средств контроля.

Все эти и другие вопросы требуют решения.

Новые компоненты, беспроводные и сенсорные датчики

Как возможная элементная база перспективных разработок в СЭМПЛ, заслуживают внимание разработчиков новые микросхемы и модули для беспроводной передачи данных: как сборки, так и отдельные приёмопередатчики (трансиверы) в одном корпусе крайне малых размеров, но со встроенным микроконтроллером на базе ядер Cortex-M0 и 80c51. К примеру, особенностью линейки приёмников диапазона до 1 ГГц является широкий выбор технических решений с различными видами модуляции для современных способов пакетной обработки данных.

Для диапазона 2,4 ГГц (Wi-Fi) предлагаются микросхемы и модули стандарта Bluetooth Low Energy со встроенным микроконтроллером, имеющим ядро Cortex-M0+, и Wi-Fi-модули. Датчики влажности и температуры HopeRF представлены как микросхемами, так и миниатюрными модулями с шагом выводов 2,54 мм. Точность измерения температуры достигает ±0,15°C, а влажности – до ±2,0% RH. Датчики атмосферного давления (барометры) работают как альтиметр и с измерением относительного давления позволяют определять изменение высоты объекта над поверхностью земли.

Микросхема с крайне малым энергопотреблением 8,5 мА в режиме передачи – CMT2380F17-EQR с частотой до 1 ГГц с MCU 80C51 16 кбайт, TX PWR 20 дБм. Скорость передачи данных 0,5…300 кбит/с в режиме 64-byte Tx/Rx FIFO или CMT2380F32-EQR с MCU 32 МГц FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK, близкие аналоги – микросхемы CMT2300A-EQR, CMT2310A-EQR со скоростью передачи данных 1000 кбит/с, 128-byte Tx/Rx FIFO, в режиме RX ток потребления 9,6 мА. С теми же параметрами OOK/FSK можно рассматривать микросхему RF64, но она более экономичная – ток потребления в режиме RX всего 3 мА. Однако и скорость передачи данных не превышает 150 кбит/с. Есть и более экономичная RF63, работающая в диапазоне 863–960 МГц со скоростью передачи данных 200 кбит/с. Все они адаптированы к питанию с напряжением 1,8–3,6 В и имеют крайне малые размеры, не превышающие площадку 5×5 мм. Уместно обратить внимание на новую элементную базу на кристаллах для реализации проприетарных протоколов в диапазонах 433/868 МГц. Разумеется, все новинки в данной области охватить нельзя, тем не менее они есть, и китайская компания HopeRF, производящая микросхемы и модули для беспроводной передачи данных, а также датчики атмосферного давления, температуры и влажности, может рассматриваться как один из примеров поставщиков.

Особенности практического применения устройств с датчиками паров алкоголя

Употребление алкогольных напитков не всегда можно оправдать, особенно когда последствия касаются подконтрольного лица, отбывающего наказание или находящегося под домашним арестом. Именно поэтому перспективным шагом в развитии устройств контроля будут электронные устройства в системе ЭМПЛ, совмещённые с датчиками паров алкоголя или иными датчиками для контроля синтетических химических соединений. Такие электронные системы могут эффективно работать и для фиксации актов употребления наркотических веществ.

СЭМПЛ может совмещать электронные датчики с высокой или регулируемой чувствительностью различного назначения (контролировать и другие газы, к примеру углекислый газ или выхлопы бензина). Подробнее об этом можно прочитать в [4, 5, 9]. Для этого обратимся к технологии производства промышленных датчиков различных паров и примесей в воздухе. Профессиональными алкотестерами или «детекторами алкогольных паров» (Roadtest) укомплектованы медицинские и специальные службы, к примеру ГИБДД. Вариантов алкотестеров, выпускаемых разными фирмами, много, один из них, производства Финляндии, показан на рис. 16.

Устройство представляет собой анализатор паров спирта, толуола, ксилена и других летучих органических паров.

Рис. 16. Внешний вид финского алкотестера

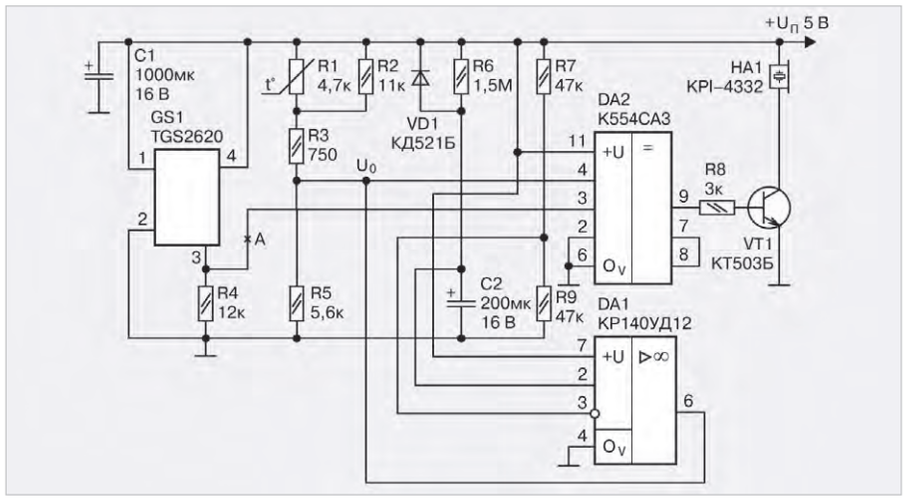


Рис. 17. Вариант электрической схемы устройства контроля и сигнализации паров алкоголя в воздухе (источник: qrz.ru)

В верхней части корпуса прибора расположена сменная стеклянная трубка, которая предназначена для вдувания воздуха ртом человека. При включении питания кнопкой «Power» загорается жидкокристаллический индикатор на передней панели прибора с мигающими цифрами (показаниями) до 000,1% ВАС. Одновременно раздается кратковременный звуковой сигнал. Через 1–2 с раздаётся второй (аналогичный первому) звуковой сигнал, и на индикаторе (внизу под цифрами) начинает мигать слово «Wait» (подождите). В этот период с продолжительностью 10–12 с происходит нагрев датчика и вхождение в режим анализа воздуха измерения. После этого третий звуковой сигнал (аналогичный первому) свидетельствует, что прибор готов к работе (к струе принимаемого воздуха). При этом на индикаторе (внизу под цифрами) слово «Wait» сменяется на «Ready». После третьего сигнала «не дуть в трубочку», прибор воспримет тот же воздух, который уже проанализирован, и, не найдя различий по составу воздуха, в течение 10–12 с выдаст отрицательный вердикт; в этой части медицинской диагностики отрицательный результат считается хорошим, не подтверждающим диагноз. Это состояние прибор показывает на индикаторе надписью «OFF» (без всяких звуковых сигналов). Система автовыключения отключит питание прибора самостоятельно спустя еще 1,5 мин. Это необходимо для экономии батарей.

В устройстве установлен специальный датчик примесей в воздухе типа TGS-2620, для эффективной работы требуется постоянное стабилизированное напряжение 3,9–5 В. Если при дыхании обнаружены примеси алкоголя, прибор выдаст на индикаторе цифровые показания (> 4000 – уже криминальный случай, когда надо забыть о вождении) и подтвердит исследование бесконечной серией звуковых сигналов, отключить которые можно кнопкой «Reset» или нажатием на кнопку «Power».

Практическое применение популярных датчиков спирта (паров алкоголя) типа TGS-822 и TGS-2620 фирмы Figaro Engineering Inc (Япония) и других, в том числе производства КНР, заслуживает отдельного внимания.

Первооткрывателем датчиков TGS (TGS – «Taguchi Gas Sensor») и их модификаций в 1962 году стал японский изобретатель Наойоши Тагучи.

Особенности практического применения устройств с датчиками паров алкоголя

Большинство датчиков TGS сделаны на основе оксида олова. Сопротивление этих датчиков постоянному току в обычном воздухе высоко, а при наличии в воздухе примесей (паров органического происхождения) у соответствующего датчика (они не универсальны, к примеру, датчик паров алкоголя не реагирует на утечку фреона) сопротивление резко снижается. Разработчик РЭА понимает, что если подключить такой датчик к компаратору (устройству сравнения напряжения), то последний среагирует так же, как параметрический сигнализатор на изменение сопротивление датчика.

Как вариант, электрическая схема устройства контроля и звуковой сигнализации примесей паров алкоголя в воздухе (с применением датчика алкогольных паров) TGS-2620 представлена на рис. 17.

При обработке выходного сигнала датчика используется микросхема-компаратор, которая сравнивает напряжения на двух своих входах. Напряжение питания для датчика подается на вывод 1. Общий провод подключают к выводу 2. Компаратор DA2 подсоединяют к выводу 3. Операционный усилитель DA1 с элементами VD1, R6, C2, R7, R9 обеспечивает задержку 1–1,5 мин, необходимую для устранения ложных срабатываний устройства при подаче питания. Диод VD1 препятствует току утечки оксидного конденсатора C2. Без этой задержки в течение 1–1,5 мин после подачи питания устройство может включить звуковой сигнал независимо от наличия паров алкоголя. Выходной сигнал датчика GS1 снимается с контрольной точки А.

В тот момент, когда напряжение (под воздействием паров алкоголя с концентрацией, равной или превышающей установленный предел) в точке А превысит заданную элементами внешней RC-обвески величину напряжения на входе U¬0, выходной сигнал с компаратора DA1 (его высокий уровень) обеспечит включение звукового капсюля со встроенным генератором HA1 (или иное устройство звуковой/световой сигнализации, подключённое с соблюдением полярности вместо капсюля HA1). Напряжение U0 может меняться в диапазоне 2,5–3,2 В при температуре окружающего воздуха +40°С и относительной влажности 65% и, соответственно, в диапазоне 1,9–3,1 В при температуре –10°С. Без термокомпенсирующей схемы график отклика мог бы изменяться в диапазоне 600–3400 ppm при заданном значении концентрации газа 1500 ppm (при окружающей температуре +20°С и влажности 65%). Для термокомпенсации служит термистор R1.

Таблица 1. Влияние компенсирующего терморезистора R1 на замер концентрации газа

Условия окружающей среды		Концентрация паров, ppm
Температура воздуха, °C	Относительная влажность, %	
–10	65	1400
0		1450
10		1475
20		1500
30		1505
40		1520

Некоторые результаты применения термокомпенсирующего резистора представлены в табл. 1.

Значимым показателем является концентрация газа, выражающаяся в миллионной доле (ppm). К примеру, концентрация газа в значении 20 ppm означает концентрацию паров алкоголя 20×10–6.

Кроме датчика TGS-2620 могут применяться датчики фирмы Murata TGS-880, TGS-2181 или, к примеру, датчик TGS-822 (который требует двухполярное напряжение питания).

Как один из альтернативных вариантов, можно рассмотреть применение в качестве электронных компараторов популярных и недорогих микропроцессоров фирм AMTEL, AVR. При соответственном программировании микропроцессоры способны выполнять автокалибровку и учитывать функцию температурной зависимости (термокомпенсацию) [4]. Подробнее об этом можно прочитать в [5].

Другие отличительные особенности СЭМПЛ будущего

Они касаются новых совмещённых с СЭМПЛ электронных устройств, среди которых системы распознавания лиц, алкотестеры, детекторы приближения на основе пироэлектрических и других электронных датчиков и другие. Как отдельная и реальная перспектива развития и совершенствования СЭМПЛ рассматриваются дополнения электронных модулей, идентифицирующие человека по биометрическим признакам. Это новое и следующее направление, исключающее фиксацию на конечностях подконтрольного человека радиоэлектронного браслета (РБ). С учётом новых возможностей единой биометрической системы (ЕБС) и модернизации СЭМПЛ, за что так ратует в своих инициативах ФСИН России, в будущем предполагается отказаться от РБ и заменить его мобильной (переносной, компактной) системой видеосвязи с подконтрольным лицом с функционалом LTE- и GPS-трекера. Для этого есть несколько предпосылок.

Системы распознавания лиц – Facial Recognition Technology (FRT) – обеспечивают автоматическую локализацию человеческого лица на изображении или видео и, при необходимости, идентификацию личности человека на основе имеющихся баз данных. Интерес к этим системам не ослабевает с начала XXI века в связи с широким кругом решаемых задач (в области идентификации), возникающими вызовами времени и систематическими усовершенствованиями (новыми версиями и направления развития). Этому условно противостоят дипфейки (Deep Learning – «глубокое обучение» и Fake – «подделка») – метод синтеза человеческого изображения на основе искусственного интеллекта. Он используется для объединения и наложения существующих изображений на видео.

В коммерческой сфере широкое распространение биометрических данных для аутентификации граждан происходит сравнительно недавно и не везде. Одним из пилотных проектов можно назвать оплату поездки в московском метро по лицевой биометрии, которую практически внедряют с 2019 года. В 2018 году по инициативе Минцифры создана Единая биометрическая система (ЕБС), где хранят биометрические персональные данные граждан в обезличенном и зашифрованном виде. Отсутствие консолидированных данных в открытом (незашифрованном) виде (ФИО, отпечатки пальцев, изображений лиц и др.) обеспечивает надёжность системы: в случае их утечки биометрия не может быть соотнесена с конкретным человеком. По этим данным электронная система строит уникальные эталонные векторы для идентификации лиц. В 2021 году ЕБС получила статус государственной консолидированной информационной системы с высоким уровнем защиты в России.

Федеральный закон о ЕБС (№ 572-ФЗ), принятый Государственной Думой РФ в 2022 году, определяет единые правила безопасного сбора, хранения и использования биометрических персональных данных граждан. Персональные данные в зашифрованном виде консолидированы в государственной системе с высоким уровнем защиты. Консолидация данных также снижает риски их попадания в руки злоумышленников. Уже декабре 2023 года в силу вступили нормы закона, касающиеся порядка сбора и обработки биометрии. В частности, введено понятие коммерческой биометрической системы (КБС) для обработки биометрических данных после прохождения многофакторной (сложной) процедуры идентификации.

Три основных способа предоставления сервисов на основе биометрических персональных данных после принятия ФЗ-572 включают транзакционную модель взаимодействия с ЕБС любой аккредитованной организации. По такой модели, согласно закону, должны работать государственные структуры, субъекты атомной промышленности, ТЭК, ОПК. Ограничения по аккредитации организаций оправданны. Собственный капитал аккредитуемой организации в государственном секторе или юридического лица должен превышать 500 млн рублей, применяться должны только российские алгоритмы, прошедшие тщательное тестирование специалистами Центра биометрических технологий (ЦБТ) – оператора ЕБС. По состоянию на конец 2023 года было аккредитовано только девять компаний, включая шесть банков («АК Барс», «Альфа-банк», ВТБ, «Почта Банк», РСХБ, Сбербанк), один оператор связи – МТС и компании, предоставляющие сервисы для работы в составе СКУД: Ovision и Pridex («Инновационные технологии»).

Сегодня заинтересованные компании и государственные организации, такие, к примеру, как ФСИН, приводят свои технические возможности в соответствие с нормами и условиями федерального закона о ЕБС. Отсюда логично, что спрос на консалтинг и внедрение отечественных технологий с конца 2023 года вырос в несколько раз. На рис. 18 представлена иллюстрация одной из перспективных моделей СЭМПЛ будущего. К слову, такие системы за рубежом начали применять почти 10 лет назад. Польза их в том, что подделать биометрию (изображение лиц и отпечатки пальцев) в системе ФСИН и СЭМПЛ пока не представляется возможным.

Типично подобные электронные устройства-идентификаторы изображений Face-ID в ЕБС используют точечный проектор, содержащий несколько компонентов: лазер, световод и дифракционный оптический элемент (ДОЭ). ДОЭ представляет собой особый вид линзы, который дробит лазерный луч на массив из примерно 32 тыс.

Рис. 18. Иллюстрация устройств СЭМПЛ, совмещённой с ЕБС

Рис. 19. Электронный блокиратор сигналов Wi-Fi и сотовой связи TG-120A

Рис. 20. Электронный блокиратор-глушитель сигналов GPS в трёх диапазонах

инфракрасных точек. Когда человек смотрит на заблокированный экран, система распознавания лиц проецирует массив точек на большую часть его лица, а камера устройства считывает шаблон, созданный для подтверждения личности. Однако системы точечных проекторов относительно велики для небольших устройств, таких как смартфоны.

Будущее за более мощными системами распознавания лиц с использованием плоской метаповерхности вместо относительно громоздких видеокамер и проекторов. По сообщению Американского химического общества (American Chemical Societ), такую систему распознавания лиц испытали на знаменитой статуе работы Микеланджело «Давид» исследователи из Национального университета Ян Мин Цзяотун в Тайване [13].

Авторы работы Ю-Хэн Хун, Хао-Чунг Куо, Яо-Вэй Хуан привели доказательства, что новая система визуальной идентификации проецирует 45 700 инфракрасных точек для распознавания, потребляя в 10 раз меньше энергии, чем традиционные 3D-системы. Миниатюризация позволяет уменьшить размер и энергопотребление РЭА. Устройство затрачивает меньше энергии, чем существующие системы трёхмерного изображения поверхности. Речь идёт об использовании структурированного светового потока на метаповерхности и задействовании PCSEL для монокулярного восприятия глубины и распознавания лиц [10].

Исследователи планируют использовать эту технологию в робототехнике, расширенной реальности и других областях, где требуются компактные и маломощные решения для получения изображений. Таким образом, совершенствуется трёхмерное изображение поверхности при более плоской и упрощённой оптике.

Трёхмерное изображение поверхности – распространённый инструмент, используемый в распознавании лиц смартфонов, а также в компьютерном зрении и автономном вождении. Исследователи заменили традиционный точечный проектор маломощным лазером и плоской поверхностью из арсенида галлия, что значительно уменьшило размер устройства формирования изображения и энергопотребление. Они нанесли на верхнюю часть этой тонкой металлической поверхности рисунок наностолбиков, который создаёт метаповерхность, рассеивающую свет при его прохождении через материал. В этом прототипе маломощный лазерный свет рассеивается на 45 700 инфракрасных точек, которые проецируются на объект или лицо, расположенное перед источником света. Как и система точечного проектора, новая система включает в себя камеру, считывающую узоры, созданные инфракрасными точками [13]. Уместить всё это удалось на платформе с площадью поверхности примерно в 230 раз меньшей, чем у обычной системы точечного проектора. Так доказали полезность метаповерхностей для создания эффективных решений визуализации для распознавания лиц, робототехники и расширенной реальности.

Средства подавления сигналов мобильных браслетов

То, что инструменты контроля (слежки) являются беспроводными, имеет важное значение. Предполагается, что подконтрольное лицо не сможет нарушить работу устройства, не понимая принцип функционирования РЭА. Если же лицо с ограничением к свободе передвижения и занятий всё же сумеет нарушить работу устройства, последнее незамедлительно сформирует сообщение по беспроводной связи. В данном случае можно блокировать каналы передачи данных (сотовой связи и GPS) с помощью специальных устройств. Из доступных и бытовых это устройства-блокираторы разной мощности и назначения, представленные, к примеру, на рис. 19 и рис. 20. Есть электронные системы и более мощные.

Среди средств из арсенала отечественных производителей для подавления сигналов GPS-трекеров применяют системы активной защиты информации «Гром-И-5», систему активной акустической и вибрационной защиты речевой информации «Шторм-10» и даже защитные экраны на окна: занавеси из многослойной, светонепроницаемой ткани. Сюда же относится комплект средств защиты акустической речевой информации и СВТ от ПЭМИН для мобильных объектов, стационарных и переносных систем подавления устройств сотовой связи и беспроводного доступа «Хамелеон» и другие. На рис. 21–23 представлены такие устройства производства АО «Инфопро», специализирующегося на разработке, внедрении и сопровождении комплекса средств автоматизации, создании локальных вычислительных сетей (ЛВС) различного масштаба.

Выводы

Разработчиками создаются специальные испытательные стенды для совершенствования СЭМПЛ, предназначенные для изучения проблематики глушения сигналов, несанкционированной подмены элементов СЭМПЛ и выявления электронных устройств, предназначенных для негласного получения информации. Однако техническая документация и спецификации создаются под одно учреждение – ФГУП «Центр информационно-технического обеспечения и связи» (ЦИТОС). Сторонее предприятие победить в конкурсе практически не может, ибо все прото-

Рис. 21. Системы активной защиты информации «Гром-И-5»

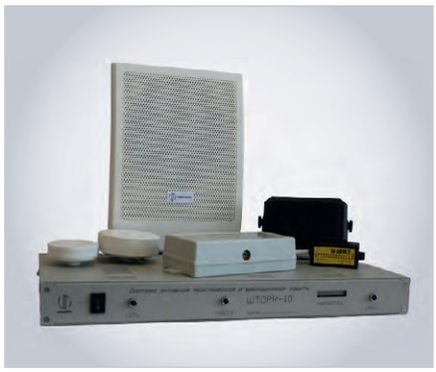


Рис. 22. Системы активной защиты информации «Шторм-10»

Рис. 23. Комплекс средств защиты информации «Хамелеон»

колы и пароли, необходимые для программирования браслетов, есть только у специалистов ЦИТОСа. При этом как такового производства как не было, так и нет, пока комплектующие системы поставляются из КНР.

Оборудование СЭМПЛ продолжает модифицироваться и совершенствоваться. В перспективе возможна разработка новых моделей с оснащением СКУ видеокамерой, а МКУ – алкотестером, чтобы контролируемый дышал в него перед камерой каждый вечер.

Эксплуатация браслета и устройств СЭМПЛ для подозреваемого или осуждённого в России является бесплатной (в отличие от стран Западной Европы и Америки). Государству электронный комплекс и его эксплуатация обходятся примерно в 111 тыс. руб., но уже заметна тенденция к снижению стоимости оборудования СЭМПЛ.

Использование передового зарубежного опыта применения СЭМПЛ послужит совершенствованию технических, организационных и правовых аспектов электронного мониторинга в России. Полномасштабное функционирование СЭМПЛ в России с учётом зарубежных инноваций существенно снизит нагрузку на правоохранительную и судебную системы, позволит уменьшить количество лиц, отбывающих наказания в исправительных учреждениях.

Технологические достижения за последние два десятилетия изменили нашу жизнь настолько, что это показалось бы невероятным человеку, жившему в нулевых. Что покажется более шокирующим, так это множество технических проблем, с которыми пользователи РЭА специального назначения всё ещё сталкиваются ежедневно. Многие из этих проблем существовали 30 лет в той или иной форме. Некоторые из этих проблем могут быть созданы искусственно, в то время как другие – препятствия технические (и не только), которые всё ещё трудно преодолеть. Возможно, вскоре новые «революционные» батареи, способные работать месяцы или даже годы без зарядки, помогут улучшить имеющиеся технологии.

Именно поэтому даже на государственном уровне понимают проблему и хотят мотивировать разработчиков РЭА (в своей системе) к усовершенствованию РБ для подконтрольных лиц, осужденных к домашним арестам.

Таким образом, в новых разработках стремятся реализовать проектный подход к внедрению цифровых технологий с формированием технической архитектуры СЭМПЛ, усовершенствованием и защитой канала беспроводной связи, созданием инфраструктурного и базового программного обеспечения, а также с конструированием систем хранения и анализа данных от РБ СЭМПЛ.

Литература

1. Браслеты для отбывающих наказание. URL: https://tass.ru/obschestvo/21482339.
2. *Дегтярёва О.Л.* Система электронного мониторинга подконтрольных лиц (сэмпл), как одна из форм контроля осуждённых к ограничению свободы // NovaInfo. 2015. № 33. URL: https://novainfo.ru/article/3521.
3. *Зараменских Е.П.* и др. Принципы построения электронного мониторинга подконтрольных лиц в России. Новосибирск: Сиб-Принт, 2011. 274 с.
4. *Кашкаров А.П.* 500 схем для радиолюбителей. Электронные датчики. Изд. 2-е, перераб. и доп. СПб.: Наука и техника, 2008. 288 с.: ил.
5. *Кашкаров А.П.* Датчик паров алкоголя // Радиолюбитель. 2008. № 1. С. 7.
6. Сигнализация G08B21, реагирующая на один определённый нежелательный или ненормальный режим работы, не отнесённая к другим группам. URL: https://poleznayamodel.ru/img_show/1006560.html.
7. Система защищённой мобильной связи «B-Force». URL: http://www.bnti.ru/des.asp?itm=7181&tbl=04.03.07.02.
8. Система электронного мониторинга подконтрольных лиц. Патент № 113394 / В.В. Определёнов, Н.В. Мартынов и др. URL: https://poleznayamodel.ru/model/11/113394.html.
9. *Суомалайнен А.* Электронные устройства специального назначения для выявления, диагностики, контроля ВВ и НС // Современная электроника. 2024. № 6. С. 7–17.
10. Структурированный свет на основе метаповерхности и PCSEL для монокулярного восприятия глубины и распознавания лиц. URL: https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.nanolett.3c05002.
11. Постановление Правительства Российской Федерации от 31.03.2010 № 198 «Об утверждении перечня аудиовизуальных, электронных и иных технических средств надзора и контроля, используемых уголовно-исполнительными инспекциями для обеспечения надзора за осуждёнными к наказанию в виде ограничения свободы».
12. *Тимофеева Е.А., Мотин О.А.* К вопросу о зарубежной практике применения системы электронного мониторинга подконтрольных лиц. Самара: Вестник Самарского юридического института ФСИН России, 2014.
13. A sleeker facial recognition technology tested on Michelangelo's David. URL: https://www.acs.org/pressroom/presspacs/2024/february/sleeker-facial-recognition-technology-tested-on-michelangelos-david.html.

Магнитотерапевтическая установка на базе промышленного программируемого реле

Сергей Шишкин

В статье представлена магнитотерапевтическая установка, выполненная на базе промышленного программируемого реле ПР205. Программа разработана на языке FBD в среде Owen Logic. Представлены структурная и принципиальная схемы установки.

Установка выполнена на базе программируемого реле ОВЕН ПР205-24.1211.02.2.0 (далее – программируемое реле или ПР205). 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;
- работа с удалённым сервисом Owen Cloud (тариф БАЗОВЫЙ – бесплатный) без дополнительного шлюза;
- обработка входных сигналов от датчиков;
- управление подключёнными устройствами с помощью дискретных или аналоговых сигналов.

Современная магнитотерапия – безболезненный и безопасный для пациентов способ лечения. В настоящее время накоплен значительный опыт научных исследований в области воздействия слабых магнитных полей на биологические структуры и организм человека, а также опыт лечебной практики при эксплуатации магнитотерапевтических установок в медицинских учреждениях. Приведём описание и работу магнитотерапевтической установки УМТИ-3Ф «Колибри» (далее – установка) производства завода «Авангард», г. Саров Нижегородской обл. УМТИ-3Ф – одна из наиболее массовых отечественных магнитотерапевтических установок. Её отличает мобильность, малые габариты и простота в применении. В табл. 1 приведены основные технические характеристики данной установки. Внешний вид установки УМТИ-3Ф представлен на рис. 1. Структурная схема установки, которая даёт общее представление об изделии, приведена на рис. 2.

Установка предназначена для лечения различных заболеваний путём воздействия на пациента охватывающими его перемещающимися в пространстве магнитными полями, порядка (1–3,5) мТл на всё тело человека или большую его часть, за счёт размещения пациента внутри индуктора большого диаметра. Такое воздействие позволяет одновременно влиять на основные системы организма, на различные виды обмена и окислительно-восстановительные процессы.

Установка состоит из двух составных частей (рис. 2): блок управления A1 и индуктор A2. Индуктор представляет собой комбинацию из трёх колец-соленоидов (L1, L2, L3) и крепёжных приспособлений, которые дают возможность компоновать

Рис. 1. Внешний вид установки УМТИ-3Ф

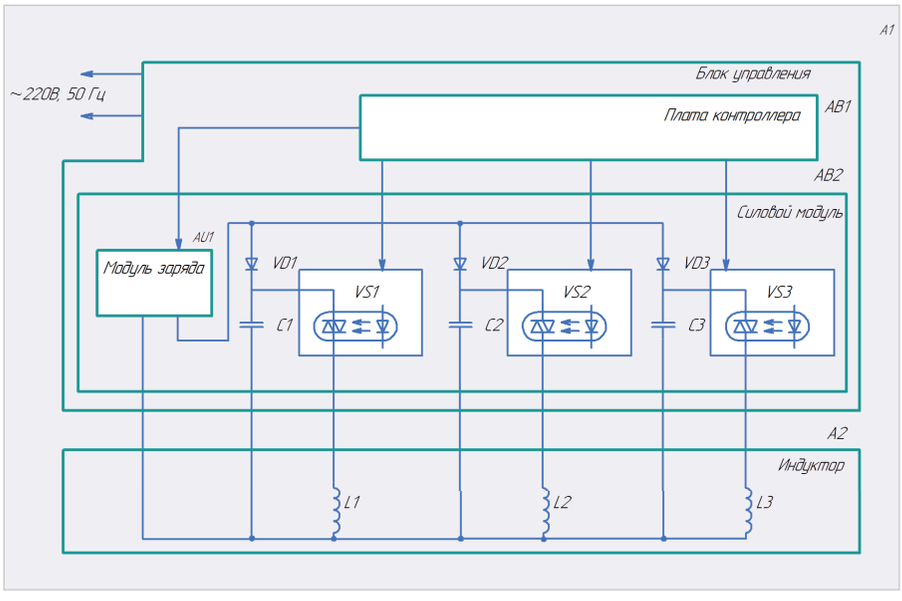


Рис. 2. Структурная схема установки

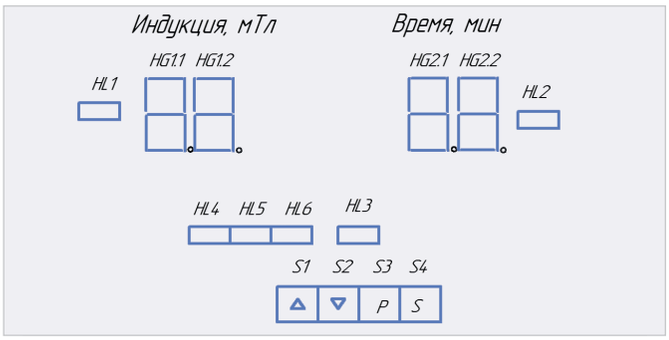


Рис. 3. Интерфейс управления установки УМТИ-3Ф

Табл. 1. Основные технические характеристики установки УМТИ-3Ф

Параметр		Значение
Сетевое напряжение питания, В		220 ±20%, 50 Гц
Потребляемая мощность, В·А, не более		150
Максимальная индукция ($B_{макс}$), мТл	в центре соленоида	4 ±0,7
	вблизи соленоида	26 ±6
Диапазон регулировки индукции в центре соленоида		от 0,5 $B_{макс}$ до $B_{макс}$
Дискретность задания индукции, мТл		0,5
Частота колебаний тока в соленоиде, Гц		100 ±15
Частота повторений импульсов тока в соленоиде, Гц		1 ±0,1
Максимальная длительность сеанса, мин		99
Дискретность задания сеанса, мин		1
Диаметр соленоида, мм, не более		800
Количество соленоидов, шт.		3
Вид поля при компоновке соленоидов	цилиндр	Бегущее поле
	призма	Вращающееся поле

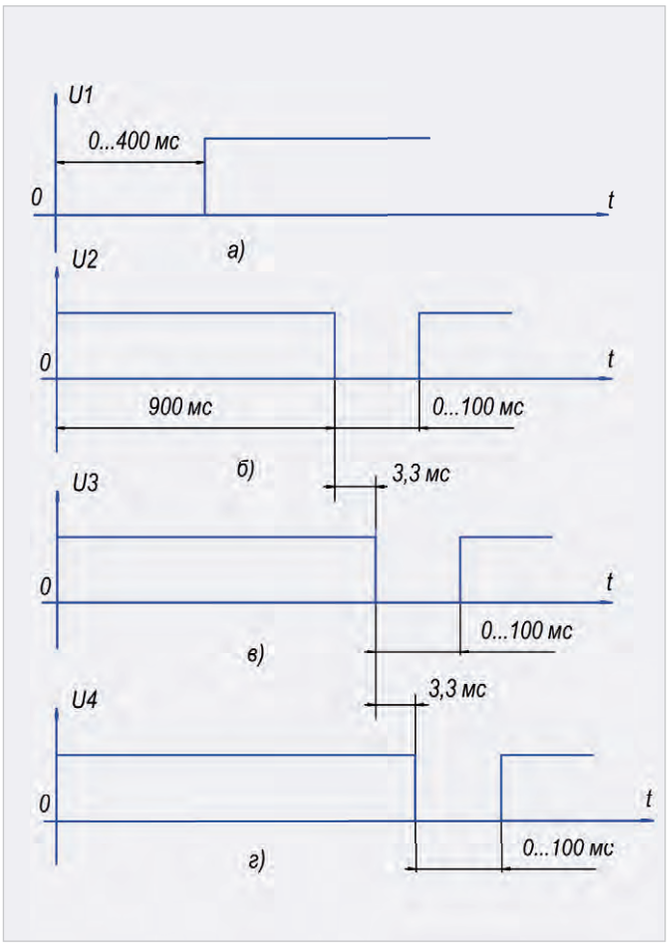


Рис. 4. Временны́е диаграммы, поясняющие алгоритм работы установки

соленоиды в цилиндр или призму и получать соответственно бегущее или вращающееся магнитные поля. Диаметр одного кольца-соленоида – 800 мм. На рис. 1 соленоиды индуктора скомпонованы в цилиндр.

Блок управления включает в себя плату контроллера AB1 (далее ПК) и силовой модуль AB2 (далее СМ). В состав СМ входят: модуль заряда AU1; конденсаторы C1–C3; диоды VD1–VD3; оптотиристоры VS1–VS3. В состав ПК входят следующие функциональные узлы: датчик сетевого напряжения (датчик перехода сетевого напряжения через нуль); источник питания; элементы интерфейса (кнопки, семисегментные индикаторы), а также микроконтроллер.

ПК гальванически развязана от СМ. Принцип действия установки заключается в следующем. ПК вместе с СМ осуществляют регулируемый заряд трёх накопительных конденсаторов C1–C3, затем ПК выдаёт три задержанных относительно друг друга импульса, управляющих соответственно оптотиристорами VS1–VS3. Через данные оптотиристоры осуществляется разряд вышеуказанных накопительных конденсаторов на три соленоида L1, L2, L3 индуктора A2. Разряд в каждом контуре носит характер свободно затухающих синусоидальных токов в LC-контуре, фазы которых смещены на 120 электрических градусов. Интерфейс управления установки УМТИ-3Ф приведён на рис. 3.

Элементы управления интерфейса имеют следующее назначение:

- S1 (▲) – кнопка увеличения задаваемых значений магнитной индукции и времени процедуры;
- S2 (▼) – кнопка уменьшения задаваемых значений магнитной индукции и времени процедуры;
- S3 (P) – кнопка выбора задаваемого параметра: индукции или времени процедуры;
- S4 (C) – кнопка (Старт/стоп). Кнопка запуска или останова процедуры. Изменение заданных параметров при выполнении процедуры невозможно. Для этого необходимо данной кнопкой остановить процедуру и изменить необходимый параметр;
- HG1 – сдвоенный семисегментный индикатор, отображающий значение заданной индукции;
- HG2 – сдвоенный семисегментный индикатор, отображающий значение времени до окончания процедуры;
- HL1 – индикатор выбора режима задания индукции;
- HL2 – индикатор выбора режима задания времени процедуры;
- HL3 – индикатор работы установки в рабочем цикле;
- HL4–HL6 – индикатор работы соленоидов № 1–3 в индукторе.

Временны́е диаграммы, поясняющие алгоритм работы установки, приведены на рис 4.

Принципиальная схема СМ устройства представлена на рис. 5.

Позиционные обозначения элементов принципиальной схемы СМ отличаются от позиционных обозначений в структурной схеме установки. Алгоритм работы установки в рабочем цикле следующий. После подачи питания необходимо с клавиатуры интерфейса блока управления задать необходимые параметры работы

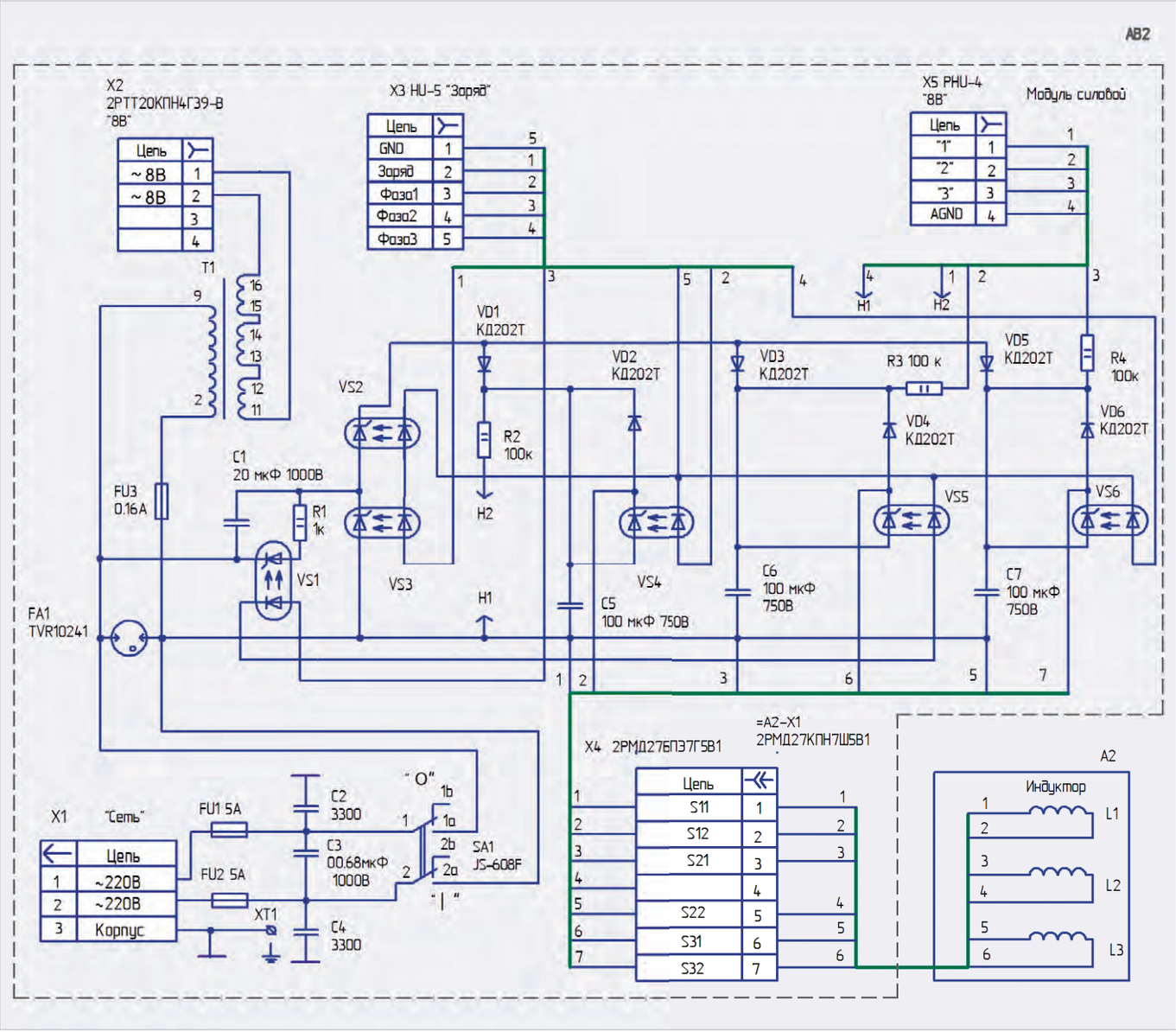


Рис. 5. Принципиальная схема СМ-устройства

канала – индукцию и время процедуры. Данные параметры постоянно индицируются на дисплее ПК (индикаторы HG1, HG2). Установка переходит в рабочий цикл сразу после нажатия на кнопку «Старт/стоп» (S4), при этом включится световая полоса HL3. Микроконтроллер ПК начинает опрашивать датчик сетевого напряжения. И по сигналу с данного датчика микроконтроллер ПК включает оптотиристоры VS2, VS3. Начинается заряд накопительных конденсаторов C5–C7. Заряд данных конденсаторов может продолжаться от 50 до 400 мс (рис. 4а), в зависимости от того, какая величина магнитной индукции установлена на дисплее блока управления. Через вышеуказанное время микроконтроллер выключает оптотиристоры VS2, VS3. Через 900 мс (рис. 4б) с момента начала заряда C5–C7 микроконтроллер включает оптотиристор VS4 первого разрядного контура. Начинается колебательный процесс разряда C5 через соленоид L1 индуктора. Разряд носит характер свободно затухающих синусоидальных токов. Через 3,3 мс (рис. 4в) с момента включения оптотиристора VS4 микроконтроллер включает оптотиристор VS5, а ещё через 3,3 мс (рис. 4г) – оптотиристор VS6 (оптотиристоры второго и третьего разрядных контуров). Конденсаторы C6 и C7 разряжаются через соленоиды L2 и L3 индуктора A2. Оптотиристоры VS4–VS6 открываются на 100 мс. За это время колебательные процессы в контурах заканчиваются. Рабочий цикл завершён. Следующий рабочий цикл начнётся сразу в момент прохождения сетевого напряжения через нуль, то есть после поступления сигнала на микроконтроллер с датчика сетевого напряжения. Такие циклы заряда и разряда накопительных конденсаторов C5–C7 продолжаются снова и снова, пока не заканчивается время процедуры.

Ёмкость конденсаторов C5–C7, диаметр колец, сопротивление и индуктивность соленоидов L1, L2, L3 рассчитаны таким образом, что при изменении величины напряжения заряда на накопительных конденсаторах от 70 В до 500 В индукция в центре соленоида может задаваться от 0,5 мТл до 4 мТл. Световые полосы HL4–HL6 служат для визуального контроля процессов заряда и разряда накопительных конденсаторов. Для уменьшения уровня помех каждый рабочий цикл начинается в момент перехода сетевого напряжения через нуль.

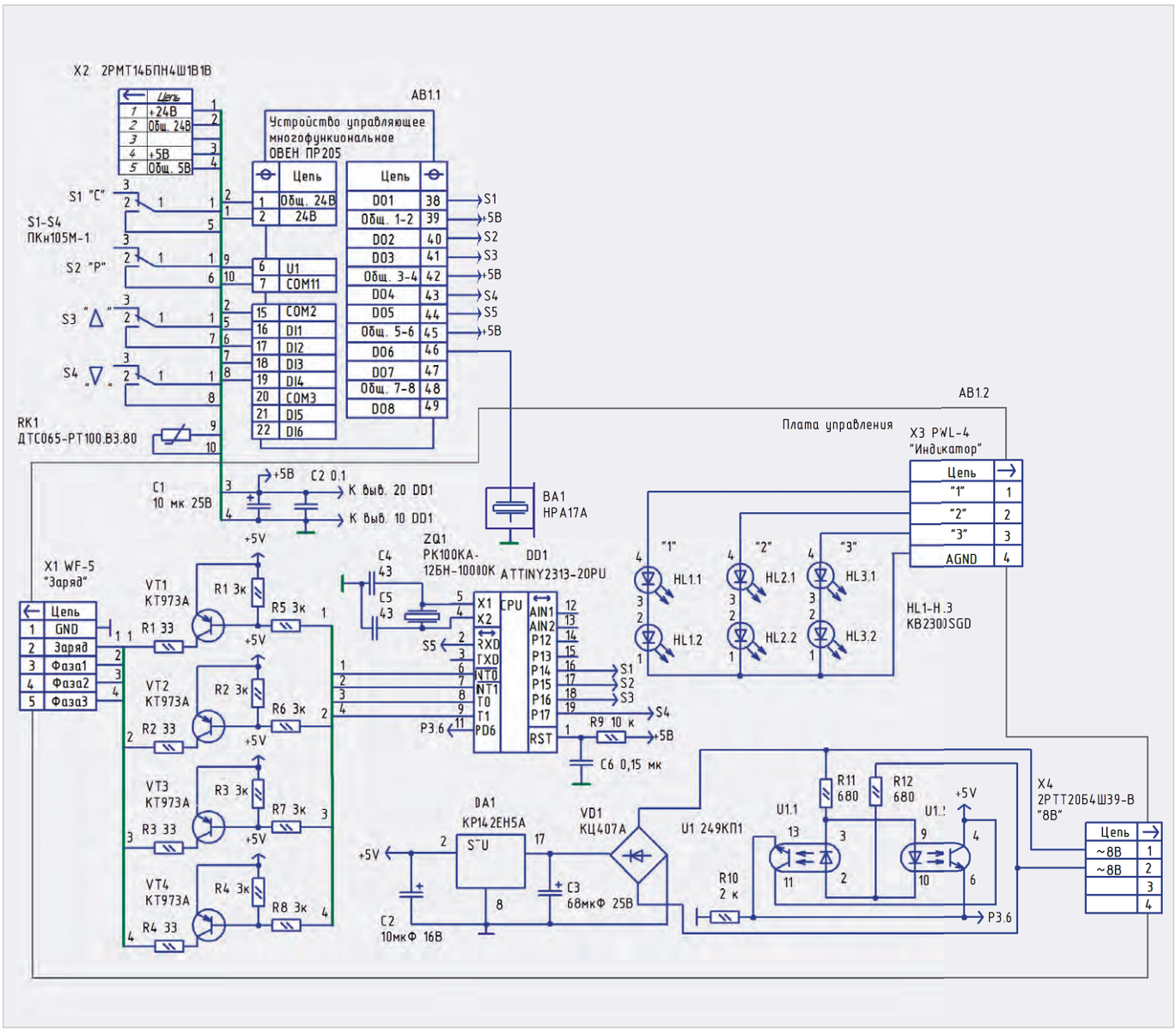


Рис. 6. Принципиальная схема модуля управления установки на базе ПР205

Фактически задача стоит так: необходимо разработать модуль управления на базе ПР205 как составную часть блока управления магнитотерапевтической установки УМТИ-3Ф без изменения СМ и алгоритма работы. Принципиальная схема модуля управления установки на базе ПР205 представлена на рис. 6.

На принципиальной схеме приведены только задействованные контакты ПР205. Общий интерфейс устройства будет следующим: интерфейс ПР205, выносные кнопки клавиатуры устройства S1–S4 и интерфейс платы управления (далее ПУ).

Интерфейс ПР205 включает в себя экран, кнопки ПР205, индикатор F1. Интерфейс ПУ включает в себя световые полосы HL1–HL3.

Параметры установки можно задать как с кнопок ПР205, так и с выносных кнопок S1–S4.

Выносные кнопки S1–S4 позволяют оперативно изменить задаваемые параметры. Их функциональное назначение такое же, как и у кнопок интерфейса УМТИ-3Ф, представленного на рис. 3. На рис. 7 приведён скриншот управляющей программы для ПР205 в среде OWEN Logic.

Модуль управления состоит из двух основных составных частей: реле ПР205 А1 с выносными кнопками S1–S4 и платы управления А2.

Реле ПР205 выполняет в устройстве следующие функции:

- задание времени процедуры;
- задание параметра магнитной индукции;
- отображение на дисплее ПР205 задаваемых параметров;
- отображение текущей температуры в помещении.

ПУ выполняет следующие функции в устройстве:

- управление силовой частью;
- визуальный контроль процессов заряда и разряда накопительных конденсаторов.

Реализовать только на ПР205 алгоритм работы магнитотерапевтической установки не представляется возможным. Временно́й сдвиг между импульсами, которые включают ключи в LC-контурах, должен быть порядка 3,3 мс (рис. 4). У модификации ПР205-24.12.11.06.2.0 (два выхода типа «транзистор n-p-n») минимальный импульс в режиме ШИМ – 50 мс. А минимальное время цикла выполняемой программы зависит от её сложности. Поэтому в устройстве для формирования сигналов, пред-

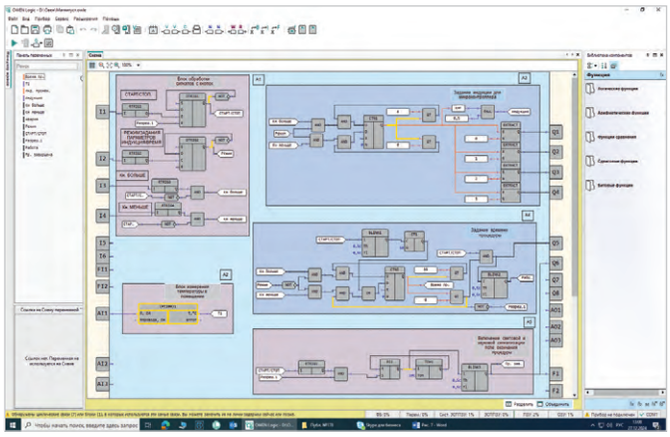


Рис. 7. Скриншот управляющей программы для ПР205 базового модуля в среде OWEN Logic

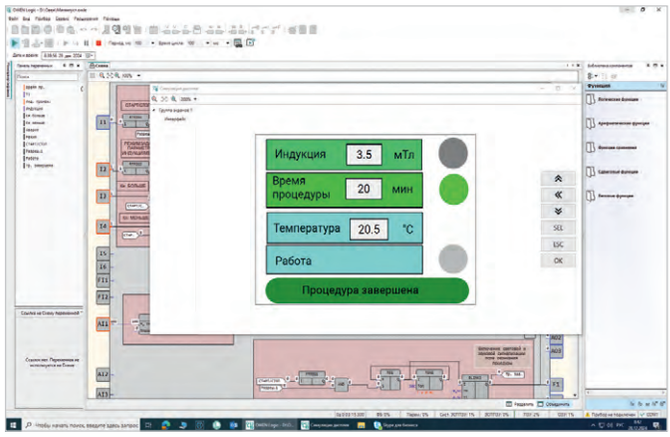


Рис. 8. Скриншот менеджера экранов в среде OWEN Logic, в режиме симуляции

ставленных на рис. 4, задействован микроконтроллер DD1 ATTINY2313-20PU.

В табл. 2 приведено функциональное назначение дискретных и аналоговых входов реле ПР205.

В табл. 3 приведено функциональное назначение дискретных выходов реле ПР205.

В модуле управления на базе ПР205 добавлена новая функция – измерение температуры в помещении (в магнитотерапевтическом кабинете). Рассмотрим работу принципиальной схемы модуля управления, представленной на рис. 6. Его составные части: реле ПР205 АВ1.1 и ПУ АВ1.2. К ПР205 подключаются выносные кнопки S1–S4, пьезоэлектрический излучатель BA1, термопреобразователь сопротивления RK1.

По факту, ПУ представляет собой «усечённый» вариант ПК. С ПК убраны все функциональные узлы, функции которых выполняет ПР205. Рассмотрим основные функциональные узлы принципиальной схемы ПУ. Она выполнена на микроконтроллере DD1, тактовая частота задаётся резонатором ZQ1 на 10 МГц. Микроконтроллер DD1 управляет оптотиристорами силового модуля через транзисторы VT1–VT4. На ПУ расположены источник питания (стабилизатор напряжения) +5 В, выполненный на микросхеме DA1, и датчик сети, выполненный на сдвоенном оптроне U1. Он отслеживает моменты перехода сетевого напряжения через нуль. Выходное напряжение датчика с резистора R10 поступает на вывод 11 микроконтроллера DD1. Световые полосы HL1–HL3 служат для визуального контроля процессов заряда и разряда накопительных конденсаторов C5–C7 СМ. Соединители ПУ подключаются к соединителям СМ согласно маркировке.

Табл. 2. Функциональное назначение дискретных и аналоговых входов реле ПР205

Тип входа ПР205	Вход ПР205	Обозначение в среде OWEN Logic	Функциональное назначение в устройстве	Примечание
Дискретный	DI1	I1	Подключение кнопки «СТАРТ/СТОП»	Кнопка S1
	DI2	I2	Подключение датчика «РЕЖИМ»	Кнопка S2
	DI3	I3	Подключение датчика «БОЛЬШЕ»	Кнопка S3
	DI4	I4	Подключение датчика «МЕНЬШЕ»	Кнопка S4
Аналоговый	U1	AI1	Подключение датчика температуры. Контроль температуры в помещении	Датчик RK1

Табл. 3. Функциональное назначение дискретных выходов реле ПР205

Тип выхода ПР205	Выход ПР205	Обозначение в среде OWEN Logic	Функциональное назначение выхода в ПР205
Дискретный	DO1	Q1	DO1–DO4 сигналы для микроконтроллера DD1, задающие параметр индукции (мТл): 0000 ➔ 0 0001 ➔ 0,5 0010 ➔ 1 0011 ➔ 1,5 0100 ➔ 2,0 0101 ➔ 2,5 0110 ➔ 3,0 0111 ➔ 3,5 1000 ➔ 4,0
	DO2	Q2	
	DO3	Q3	
	DO4	Q4	
	DO5	Q5	Сигнал разрешения работы микроконтроллера DD1 по заданному алгоритму
	DO6	Q6	Включение звуковой сигнализации после окончания процедуры. Сигнал с периодом 1 с и длительностью 10 с
Индикаторный	F1	F1	Включение световой сигнализации после окончания процедуры. Сигнал с периодом 1 с и длительностью 10 с

В скриншоте управляющей программы, представленной на рис. 7, можно выделить пять функциональных блоков:

- блок обработки сигналов с клавиатуры, включает в себя: D-триггеры DTRIG1, DTRIG2; детекторы переднего фронта RTRIG1–RTRIG4, а также логические элементы НЕ, 2И;
- блок измерения температуры в помещении, включает в себя: макрос Pt100;
- блок задания индукции, включает в себя: универсальный счётчик CTN1, модуль операции сравнения на равенство EQ, модуль сравнения на большее значение GT, элемент умножения чисел с плавающей точкой FMUL, модули чтения бита EXTRACT, а также логические элементы 2И. Диапазон задания от 0 до 4,0 мТл с дискретностью 0,5 мТл. Данный параметр отображается на экране ПР205 и в двоичном коде передаётся на микроконтроллер DD1;
- блок задания времени процедуры, включает в себя: генераторы импульсов BLINK1, BLINK2, инкре-

ментный счётчик с автосбросом CT1, универсальный счётчик CTN2, модули сравнения на большее значение GT, а также логические элементы 2И, НЕ;

- блок включения световой и звуковой сигнализации на заданный интервал после окончания процедуры, включает в себя: детектор заднего фронта FTRIG1, RS-триггер RS1, таймер с задержкой включения TON1, генератор импульсов BLINK3, а также элемент 2И.

На рис. 8 приведён скриншот менеджера экранов в среде OWEN Logic в режиме симуляции. Эта экранная форма будет отображаться на экране ПР205. В данном случае заданы следующие параметры: магнитная индукция 3,5 мТл, текущее, отображаемое время процедуры – 20 мин. Во время рабочего цикла индикатор «Работа» на дисплее ПР205 мигает с частотой 1 Гц. По окончании заданного времени процедуры на 10 с включается звуковая сигнализация – ВА1 на ПУ и световая сигнализация (сообщение «Процедура завершена» мигает также с частотой 1 Гц). Для того чтобы начать новую процедуру с теми же параметрами, необходимо просто нажать на кнопку S4 (Старт/стоп).

Заключение

ПР205 – готовое решение для типовых задач в локальной автоматизации. ПР205 при применении в магнитотерапевтической установке может выполнять следующие основные функции:

- задание и отображение на дисплее основных параметров (индукции и времени процедуры);
- управление силовой частью установки.

Интерфейс установки в целом становится более современным, удобным, информативным. Стоимость ПР205 составляет порядка 3% от стоимости магнитотерапевтической установки типа УМТИ-3Ф «Колибри». Фактически ПР205 может быть законченным модулем управления для магнитотерапевтической установки данного типа. Кроме того, наличие в приборе сетевых интерфейсов (RS-485, Ethernet) позволяет встроить его в локальную сеть магнитотерапевтического кабинета или в сеть лечебной организации. В актив ПР205 можно также записать работу с удалённым сервисом Owen Cloud.

При применении ПР205 в установке не требуется никаких настроек и регулировок. Если монтаж выполнен правильно, то устройство начинает работать сразу после подачи на него напряжения питания. Подключать индуктор к блоку управления можно только при выключенном сетевом выключателе. В установке имеется опасное для жизни напряжение до 1000 В, поэтому во время проверки при снятой верхней крышке необходимо соблюдать меры безопасности. Величину магнитной индукции поля можно контролировать миллитесламетром универсальным ТП2-2У.

Литература

1. *Масалов Ю.А., Свириденко С.А., Свириденко А.С.* Патент РФ № 2088278.
2. Руководство по эксплуатации. Устройство управляющее многофункциональное ПР205.

Интеллектуальное освещение

Олег Вальпа

Приведено описание, разработанной автором статьи системы интеллектуального управления освещением вивария для животных, созданное на базе панели оператора Weintek и модуля вывода.

Дополнительные материалы к статье вы можете скачать с нашего сайта по этой ссылке

Введение

В современном мире существуют такие замечательные устройства, как панели оператора, которые представляют собой компактные микропроцессорные пульты управления с цветным сенсорным графическим экраном, внутренними энергонезависимыми часами реального времени и несколькими последовательными интерфейсами типа RS-232, RS-485, USB и Ethernet. Такие панели можно встраивать в двери шкафов автоматики или непосредственно в стену помещения. Благодаря производительному процессору и большому объёму памяти эти панели оператора позволяют одновременно служить человеко-машинным интерфейсом и выполнять различные функции автоматического управления технологическими процессами.

Производятся данные панели компаниями многих стран, в том числе и дружественными для России. Сенсорный экран панели может иметь размеры: 4,3", 7", 10", 15" и т.д. Внешний вид панелей оператора представлен на рис. 1.

Стоимость панелей зависит от размера сенсорного экрана и составляет от нескольких десятков до нескольких сотен долларов, что вполне позволяет им конкурировать в области автоматизированных систем. К одним из самых распространённых панелей относятся панели компаний: Weintek [1], Kinco [2], Leadshine [3] и др.

Проект

Рассмотрим реализацию одной из автоматизированных систем управления с применением панели оператора на конкретном примере. Для большинства виварием, содержащих подопытных животных, таких как мыши, кролики, морские свинки и т.п., необходимы системы искусственного освещения с функциями плавного рассвета и заката. Такие системы исключают стрессовые ситуации для животных и приближают их жизнь к естественному существованию. Данную систему управления вполне можно реализовать на базе панели оператора, которая одновременно будет служить и человеко-машинным интерфейсом, и вычислительно-управляющим устройством. В качестве панели оператора применена 7-дюймовая модель MT8071iE компании Weintek с бесплатно предоставляемой средой разработки EasyBuilder Pro.

В качестве осветителя применён потолочный светодиодный светильник с регулированием яркости управляющим напряжением от 0 до 10 вольт. В отличие от систем с интерфейсом DALI, данная система значительно дешевле и доступнее.

Поскольку панель оператора имеет только последовательные выходные интерфейсы, дополнительно будет использован модуль вывода с аналоговым выходным сигналом от 0 до 10 вольт, подключаемый к панели оператора по интерфейсу RS-485. Управление таким модулем от панели оператора будет производиться с применением стандартного и широко распространённого промышленного протокола Modbus RTU. В каче-

Рис. 1. Внешний вид панелей оператора

Рис. 2. Структурная схема системы управления

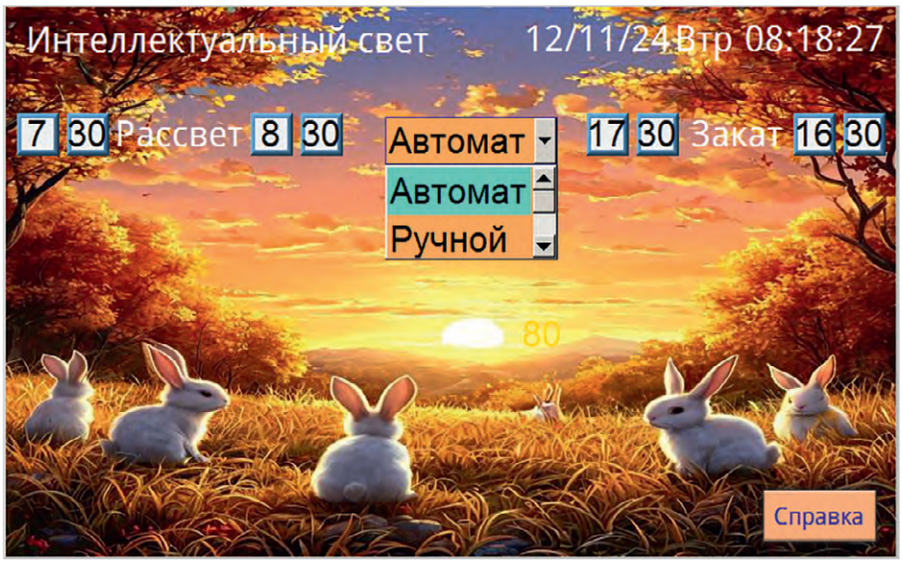


Рис. 3. Внешний вид главного экрана

Рис. 4. Главный экран среды разработки EasyBuilder Pro

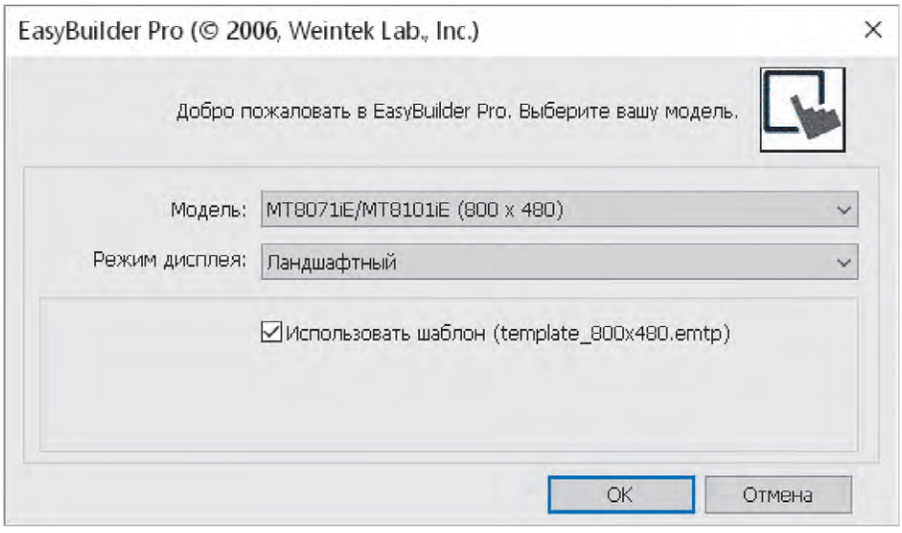


Рис. 5. Окно выбора модели панели оператора

ство готового модуля вывода можно использовать любой подходящий модуль, например, от компании КИП-Сервис [4], Контэл [5], IECON [6] и др. Кроме того, производители панелей операторов также производят модули ввода-вывода, и в проекте можно использовать любой из них.

Структурная схема системы управления приведена на рис. 2.

Среда разработки

Внешний вид главного экрана системы управления, получившей название «Интеллектуальный свет», создан в среде разработки EasyBuilder Pro и представлен на рис. 3.

На этом экране кроме названия системы отображаются календарь с часами текущего времени, значения установок для начала и окончания рассвета и заката, элемент выбора режима работы системы, цифровой индикатор уровня световой яркости, ползунок для настройки яркости света в ручном режиме и кнопка вызова справочного окна. Кроме того, на экран помещён рисунок с кроликами на природе для придания всему экрану программы красочного и эстетического внешнего вида.

Алгоритм работы программы простой, он производит сравнение текущего значения времени со значениями установок рассвета и заката. До начала рассвета управление светом имеет нулевой уровень, а после ежеминутно увеличивается до максимума, с дискретностью, равной отношению максимального значения к времени интервала рассвета. Далее сигнал управления сохраняет максимальное значение до начала заката, после чего плавно уменьшается до нулевого значения с дискретностью, равной отношению максимального значения к времени интервала заката. Таким образом, при изменении оператором времени начала или окончания рассвета и заката система автоматически будет формировать плавный рассвет и закат с заданным интервалом. При переключении системы в ручной режим, например, для уборки, ремонта или профилактических работ, система полностью передаёт управление оператору, который может произвольно регулировать освещённость вивария с помощью движка на экране панели оператора.

Процесс разработки программы для панели оператора представляет собой интересное и увлекательное творчество, которое сочетает в себе создание красочного интерфейса с органами управления, связываемыми настройками среды разработки.

После установки среды разработки на персональный компьютер в каталоге среды присутствует папка «project» с множеством готовых масштабных проектов для самых разных

сфер автоматизации. Изучение этих примеров поможет в ускорении освоения программирования панелей оператора.

Главный экран среды разработки EasyBuilder Pro представлен на рис. 4.

В центре находится поле для элементов главного экрана программы, на который размещают готовые библиотечные элементы текстовых меток, кнопок, индикаторов, часов с календарем, фоновых рисунков и т.п. из закладок «Объекты» и «Рисование». Слева отображается карта памяти панели оператора, состоящая из ячеек оперативной памяти LW, оперативной битовой памяти LB и постоянной энергонезависимой памяти RW, используемой в основном для установок. Также в левой области можно открыть вкладку окон программы и добавлять с её помощью новые окна. Справа отображается библиотека рисунков для разработки программ. Данную библиотеку можно свободно редактировать путём удаления и добавления рисунков. Сверху находятся главное меню среды разработки и панель с кнопками управления проектом.

Создание новой программы начинается с помощью меню: **Файл → Создать** или путём нажатия компьютерных клавиш **Ctrl+N**. При этом откроется окно выбора модели панели оператора (рис. 5).

В дальнейшем модель панели оператора можно будет изменить или трансформировать, и после компиляции проект будет нормально работать на другой модели.

После выбора модели откроется окно системных настроек, с помощью которых добавляется модуль вывода, выбирается номер последовательного порта панели для связи с добавленным модулем и определяются другие необходимые параметры панели оператора при необходимости. Данное окно приведено на рис. 6.

Модуль вывода можно выбрать после нажатия кнопки «Создать» из окна параметров устройства, приведённого на рис. 7. Если ни одно устройство не подходит для проекта, можно выбрать Free Protocol и в дальнейшем подстроить его под любой модуль вывода.

Далее открывшееся пустое поле заполняется необходимыми элементами, описанными ранее, и произво-

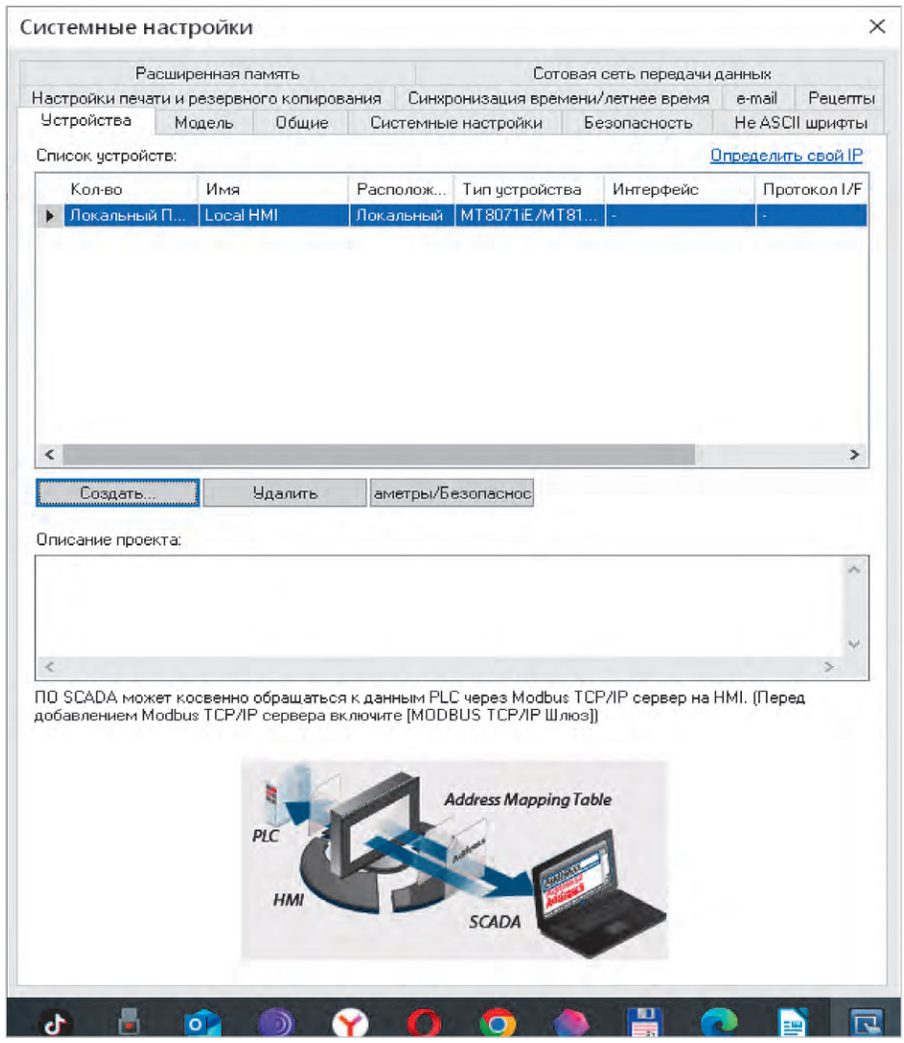


Рис. 6. Окно системных настроек панели оператора

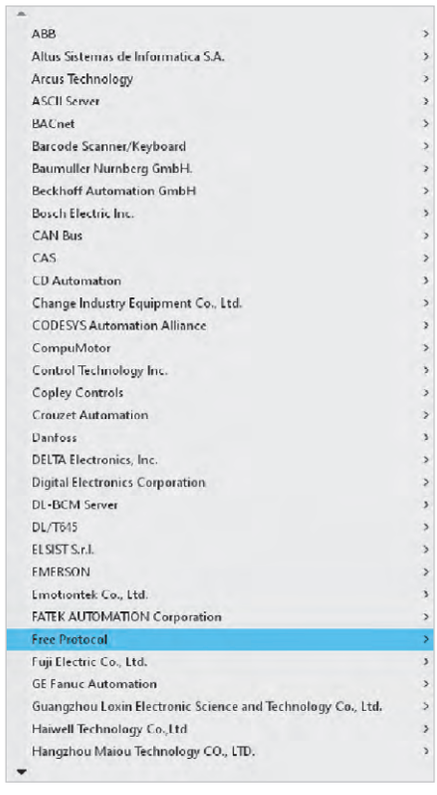


Рис. 7. Окно параметров устройства панели оператора

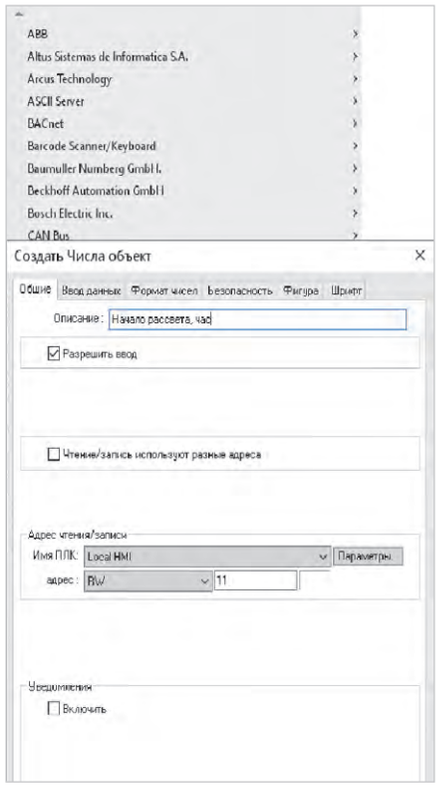


Рис. 8. Окно атрибута числового элемента панели оператора

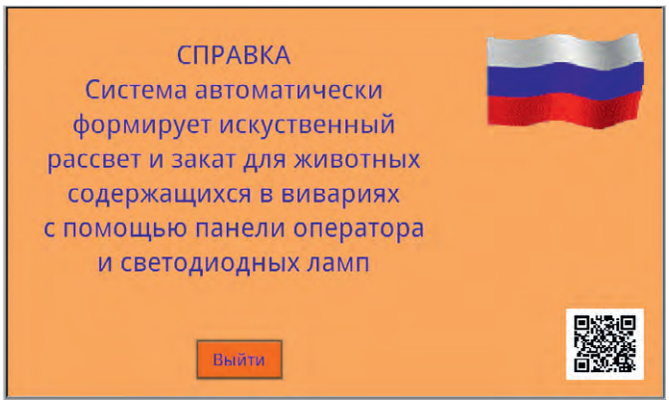


Рис. 9. Окно справки программы

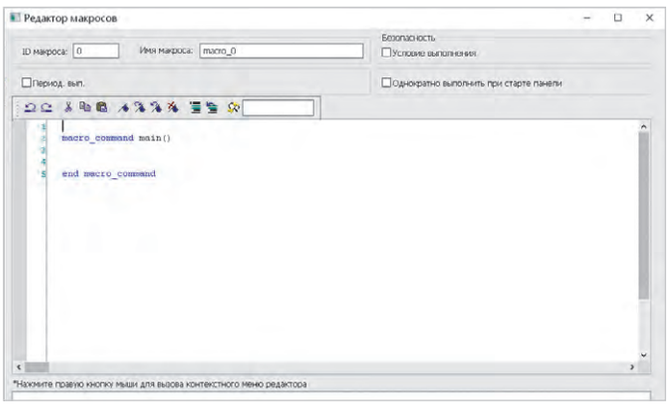


Рис. 10. Окно макросов панели оператора

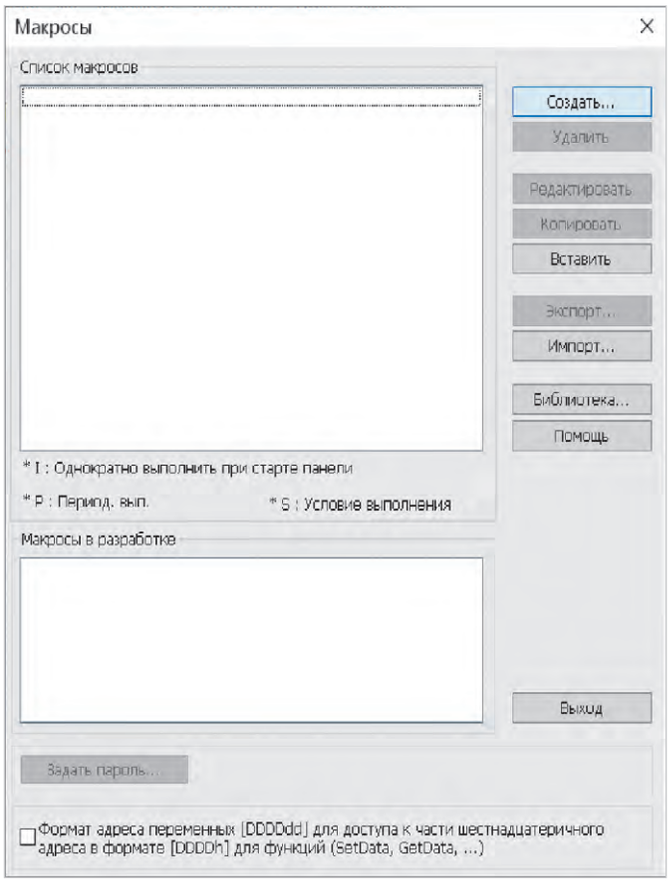


Рис. 11. Окно редактора макросов панели оператора

дится настройка некоторых из них путём привязки к определённому адресу памяти панели оператора через атрибуты элемента. В представленном здесь проекте числовые элементы установок начала и окончания рассвета в часах и минутах привязаны последовательно к ячейкам энергонезависимой памяти RW 11, 12, 13 и 14. Числовые элементы установок начала и окончания заката в часах и минутах привязаны последовательно к ячейкам памяти RW 21, 22, 23 и 24, соответственно. Пример такой привязки показан на рис. 8.

Элемент выбора режима работы привязан к ячейке памяти LW0, а движок и числовой элемент уровня освещённости привязаны к одной ячейке памяти LW1.

Первичную проверку работы программы можно проверить уже на этом этапе путём запуска программы с помощью меню: **Инструменты → Офлайн-симуляция** или клавишами **Ctrl+T**. При этом на экране монитора появится главное окно программы, и в ручном режиме изменения положения движка будут приводить к изменению цифрового индикатора освещённости от 0 до 100 процентов.

Справочное окно программы создаётся в левом поле среды разработки, на закладке «Окна», ниже названия главного окна. Название нового окна можно задать произвольным. После выбора нового окна на него аналогично размещаются необходимые элементы из закладок «Объекты» и «Рисование». Окно справки программы приведено на рис. 9.

Макрос

Для завершения разработки программы необходимо создать макрос, который будет ежесекундно производить операции, описанные в алгоритме работы программы, и отправлять вычисленное значение освещённости в модуль вывода через последовательный порт RS-485. Создание макроса начинается с помощью меню **Инструменты → Макросы** или клавишами Ctrl+M. При этом на экране монитора откроется окно макросов, показанное на рис. 10.

Далее необходимо нажать кнопку «Создать», и среда разработки автоматически сформирует заготовку макроса с именем macros_0 в окне редактирования, представленного на рис. 11.

Данный редактор содержит во вкладке «Функции» набор всех функций, необходимых для реализации любых программных алгоритмов, встроенную справочную помощь и кнопки инструментов разработки с отладкой. Код программы макроса, разработанный автором статьи, приведён в листинге 1.

Листинг 1. Код программы макроса

```
macro_command main() // Главный макрос
// Определение переменных
short mode, s, ao // Режим, сигнал регулировки и выходной сигнал
// Текущее время, начало и конец рассвета и заката в часах и минутах
short tvh, tvm, nrh, nrm, krh, krm, nzh, nzm, kzh, kzm
// Текущее время, начало и конец рассвета и заката в суммарных минутах
short tv, nr, kr, nz, kz
short dr, dz // Длительность рассвета и заката
GetData(mode, "Local HMI", LW, 0, 1) // Читать режим работы: 0-Автомат 1-Ручной
```

```
GetData(nrh, "Local HMI", RW,
11, 1) // Читать часы начала
рассвета
GetData(nrm, "Local HMI", RW,
12, 1) // Читать минуты начала
рассвета
GetData(krh, "Local HMI", RW,
13, 1) // Читать часы конца
рассвета
GetData(krm, "Local HMI", RW,
14, 1) // Читать минуты конца
рассвета
GetData(nzh, "Local HMI", RW,
21, 1) // Читать часы начала
заката
GetData(nzm, "Local HMI", RW,
22, 1) // Читать минуты начала
заката
GetData(kzh, "Local HMI", RW,
23, 1) // Читать часы конца за-
ката
GetData(kzm, "Local HMI", RW,
24, 1) // Читать минуты конца
заката
GetData(tvm, "Local HMI", LW,
9018, 1) // Читать минуты теку-
щего времени
GetData(tvh, "Local HMI", LW,
9019, 1) // Читать часы текуще-
го времени
// Вычислить суммарное значение
всех времен в минутах
tv = tvm + tvh*60
nr = nrm + nrh*60
kr = krm + krh*60
nz = nzm + nzh*60
kz = kzm + kzh*60
// Вычислить длительность вре-
мени рассвета и заката в мину-
тах
dr = kr - nr
if dr <=0 then // Защита от не-
верной настройки рассвета
 dr = 1
end if
dz = kz - nz
if dz <=0 then // Защита от не-
верной настройки заката
 dz = 1
end if
if mode==0 then // Если режим
0-Автомат
 if (tv <= nr) then // Если те-
кущее время до начала рассвета
 s = 0 // Минимальный сигнал ре-
гулировки = 0%
 else
 if (tv < kr) then // Если теку-
щее время до конца рассвета
 s = 100*(tv-nr)/dr // Вычислить
сигнал регулировки
 else
 if (tv <= nz) then // Если те-
кущее время до начала заката
 s=100 // Максимальный сигнал
регулировки = 100%
 else
 if (tv <= kz) then // Если те-
кущее время до конца рассвета
 s = 100-100*(tv-nz)/dr
 else
 s = 0 // Минимальный сигнал ре-
гулировки = 0%
 end if // Конец проверки (tv <=
kz)
 end if // Конец проверки (tv <=
nz)
 end if // Конец проверки (tv <=
kr)
 end if // Конец проверки (tv <=
nr)
SetData(s, "Local HMI", LW, 1,
1)
else // Иначе ручной режим
end if // Конец проверки mode==0
// Преобразование величины сиг-
нала в шкалу ЦАП модуля вывода
от 0 до 1023
ao=s*1023/100
SetData(ao, "Local HMI", LW, 2,
1) // Запись сигнала регулятора
в память панели оператора
// Отправка сигнала регулирова-
ния в модуль вывода
SetDataEx(ao, "MODBUS RTU", 4x,
1, 1)
end macro_command
```

Код программы снабжён подробными комментариями, которые позволяют легко понять назначение всех её строк.

Номера ячеек памяти LW 9018 и LW 9019 для внутренних часов времени панели оператора находятся в библиотеке адресных меток через меню: **Библиотека → Адрес**.

После копирования данного кода в макрос необходимо выполнить его сохранение и компиляцию соответствующей кнопкой редактора. Кроме того, требуется задать регулярную, ежесекундную периодичность выполнения макроса в виде записи 10×100 ms.

Теперь программа полностью готова к работе, и её можно загрузить в панель оператора. Загрузку можно осуществить с помощью USB-флешки или через порт Ethernet, предварительно назначив IP-адрес для панели оператора через системное меню. Вход в это меню производится с помощью нажатия стрелки в правом нижнем углу включённой панели оператора с последующим выбором кнопки-шестерёнки и вводом пароля по умолчанию 111111.

Для загрузки программы с помощью USB-флешки необходимо выполнить подготовку загрузочного кода программы с помощью меню: **Инструменты → Генерация** данных для USB-диска, предварительно подключив чистую отформатированную в FAT32 флешку к компьютеру, на котором выполняется разработка программы. При необходимости загрузочный код можно сохранить и на жёстком диске компьютера с последующим переносом его на флешку. Далее флешку с загрузочным кодом подключают к USB-порту включённой панели оператора и дожидаются появления окна загрузки, в котором необходимо нажать кнопку Download. После чего панель оператора запросит пароль, который по умолчанию имеет значение 111111, и отобразит на экране каталог флешки. Данный каталог необходимо развернуть с помощью кнопок «+» и выбрать загрузочный файл. Далее панель оператора автоматически выполнит загрузку и запустит программу. Теперь панель подключается в схему системы управления, и автоматический процесс управления освещением начинается.

Наличие Ethernet-порта в панели оператора и поддержка встроенного протокола Modbus TCP позволяют подключить её к системе диспетчеризации. Для этого назначается IP-адрес для панели оператора через её системное меню.

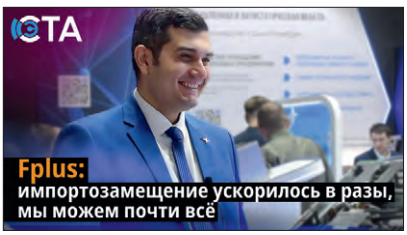
Файл проекта размещён на сайте журнала [7] и может быть использован для дальнейшего развития. Данный проект можно развивать, например, с помощью добавления новых окон с графиками, журналом событий и т.п.

Литература

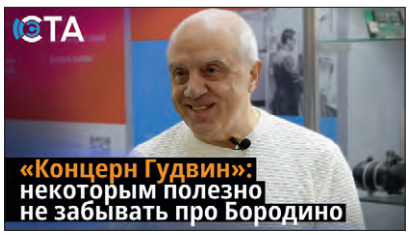
1. URL: https://www.weintek.com/globalw/.
2. URL: https://en.kinco.cn/product/hmi.html.
3. URL: https://leadshine.com/products/control/hmi.html.
4. URL: https://kipservis.ru/seneca/modul_analogovogo_signala-z-3ao.htm.
5. URL: https://kontel.ru/index.php?route=product/category&path=155_198.
6. URL: https://www.iecon.ru/catalog/moduli-vvoda-vyvoda/ebm-c/.
7. URL: https://www.cta.ru.

СЭТА
СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА
и ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ

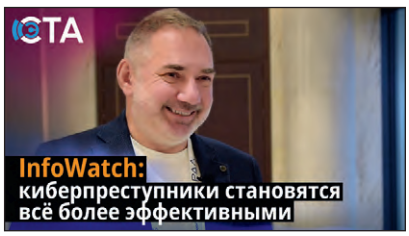
ЭКСКЛЮЗИВНЫЕ ИНТЕРВЬЮ



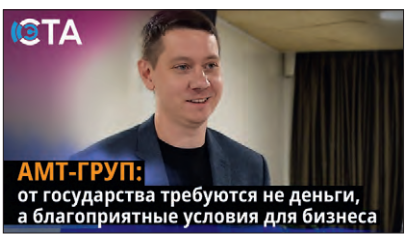
Интервью с Ильёй Левчуком, директором департамента индустриальных ПАК, Fplus



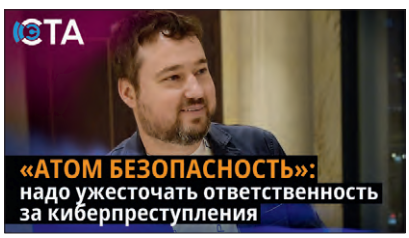
Интервью с Михаилом Нагорским, техническим директором, «Концерн Гудвин» (Гудвин Европа)



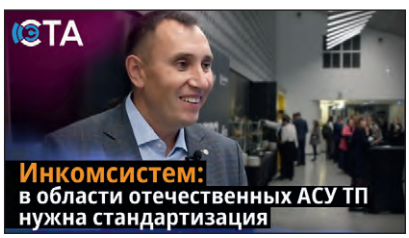
Интервью с Андреем Арефьевым, директором по инновациям, InfoWatch



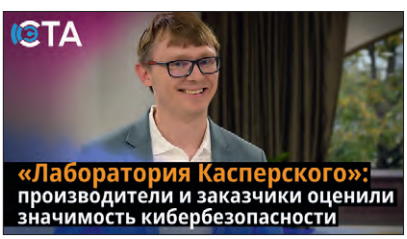
Интервью с Вячеславом Половинко, руководителем направления собственных продуктов, АМТ-ГРУП



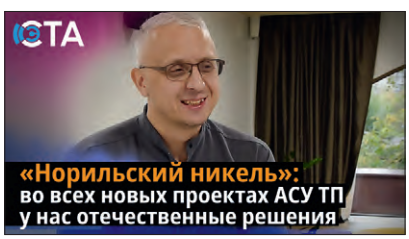
Интервью с Даниилом Бориславским, директором по продукту Staffcop, «АТОМ БЕЗОПАСНОСТЬ»



Интервью с Александром Тяплашкиным, директором департамента ПТК, Инкомсистем



Интервью с Артёмом Зиненко, руководителем отдела исследования и анализа уязвимостей, «Лаборатория Касперского»



Интервью с Евгением Куренкиным, начальником управления по экспертной поддержке производства, «Норникель Спутник»

СМОТРИТЕ НА КАНАЛЕ СЭТА

СЭТА · дзен · RUTUBE · вконтакте · YouTube

СЛУШАЙТЕ В ПОДКАСТЕ СЭТА

вконтакте · Яндекс Музыка · mave

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ
ПТА
ВЫСТАВКА

Специализированные конференции

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ 2025

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

12.02	20-я специализированная конференция **ПТА – ЕКАТЕРИНБУРГ**
02.04	6-я специализированная конференция **ПТА – КАЗАНЬ**
27.05	16-я специализированная конференция **ПТА – САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**
24.09	4-я специализированная конференция **ПТА – ЧЕЛЯБИНСК**
29.10	15-я специализированная конференция **ПТА – НОВОСИБИРСК**

www.pta-expo.ru

Колосова Надежда — kolosova@expotronica.ru — +7 (495) 234-22-10

12+