



Электронная  
версия этого  
журнала

**И ШВЕЦ, И ЖНЕЦ, И НА ДУДЕ ИГРЕЦ:  
большие возможности маленьких ПЛК**

**У ИСТОКОВ ТЕЛЕВИДЕНИЯ:  
радиоглаз С.И. Катаева**

**ФАНАТАМ ФАНАУТОВ:  
оптимизация разводки  
в современных САПР**

**ПИТАНИЕ ПИТАНИЮ РОЗНЬ:  
схемотехника и особенности  
DC/DC-модулей специального назначения**





ТОВАРИЩ!  
БИЗНЕС РОСТ ЗАМЕДЛИЛ?

**РАНО ВПАДАТЬ В СТУПОР!**

**НУЖНО КРИЧАТЬ О СЕБЕ НЕМЕДЛЯ,**

**А МЫ**

**ОБЕСПЕЧИМ РУПОР!**



### Журналы

Два наших журнала уважают в отрасли. Ваши статьи и рекламу в них увидят все наши читатели



### Видеоканалы

YouTube, RuTube, VK – предоставляют вам возможность интересно рассказать о себе



### Медиапортал

Это ваши новости и статьи, оперативно доставленные по адресу



### Конференции

На наших конференциях ПТА вы заведёте новые контакты и расскажете о себе специалистам

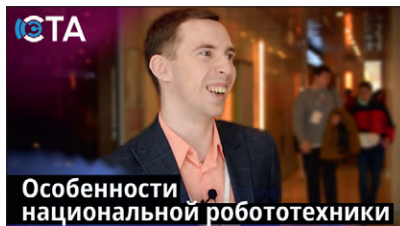


### Дизайн-студия

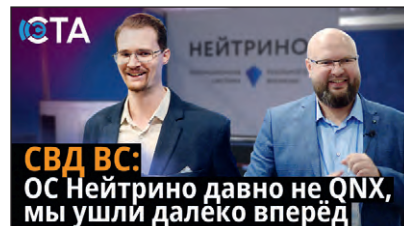
Дизайнеры и верстальщики сделают для вас эффективную рекламу, баннер, ролик



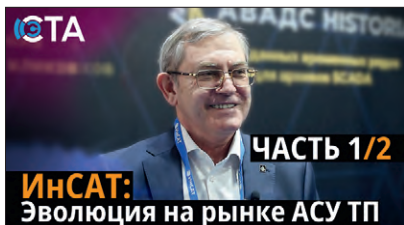
Вторая часть интервью с Владимиром Сауловичем Айзиным – генеральным директором группы компаний «ИнСАТ»



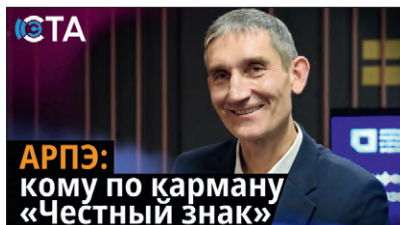
Интервью с Ильёй Бересневым, ведущим инженером по промышленной робототехнике «Макро Солюшнс»



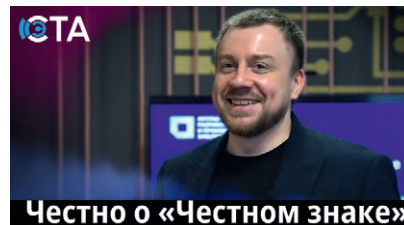
Интервью с Николаем Бабичем – руководителем отдела нейротехнологий «СВД ВС» и с Владимиром Махилёвым – руководителем отдела промышленных проектов «СВД ВС»



Первая часть интервью с Владимиром Сауловичем Айзиным – генеральным директором группы компаний «ИнСАТ»



Интервью с Иваном Покровским, исполнительным директором АРПЭ, исполнительным директором АСПЭК, генеральным директором Совэл



Интервью с Михаилом Денисенко – бизнес аналитиком по автоматизации компании «Клеверенс Софт»

## СМОТРИТЕ НА КАНАЛЕ СЭТА



## СЛУШАЙТЕ В ПОДКАСТЕ СЭТА





Здравствуйтесь, уважаемые друзья!

В этом номере журнала представлены материалы по современной силовой электронике и системам электропитания. Рассматриваются гибридно-плёночные DC/DC-модули повышенной мощности для аппаратуры специального назначения. Основное внимание уделено повышению удельной мощности, КПД и тепловой эффективности преобразователей при росте требований к энергетической плотности электронных систем.

Развитие темы продолжает статья о фазовом регулировании мощности в системах с симисторным управлением. Анализируются архитектуры регуляторов – от дискретных схем до решений на базе микросхем и микроконтроллеров, что отражает переход к интеллектуализированным системам управления энергией.

Материал по промышленной автоматике и электроприводам рассматривает современные системы управления, включая микроконтроллерные блоки преобразователей частоты для установок большой и сверхбольшой мощности. Отдельно анализируются локальные контроллеры с интерфейсом RS-485 для распределённых промышленных систем.

Практическая часть выпуска посвящена автоматическому управлению воздушным шлюзом для чистых помещений на базе отечественного контроллера. Решение иллюстрирует подходы к построению надёжной технологической автоматике с жёсткими требованиями к стабильности и контролю параметров среды.

Отдельный блок посвящён проектированию электронной аппаратуры и цифровым системам. Рассматривается задача оптимальной расстановки фанатов на печатных платах как сложная комбинаторная задача, требующая приближённых алгоритмов для повышения качества трассировки в САПР.

Также представлены новые направления человеко-машинного взаимодействия. Системы VAMN и AE-Skin – тактильные интерфейсы нового поколения, формирующие переход к сенсорным способам управления и находящие применение в медицине и реабилитации.

Завершают номер материалы научно-фундаментального и исторического характера. Обсуждается развитие концепции поляритонов, включая экситон- и фонон-поляритоны и их связь с поверхностными состояниями фотонных структур. В заключение вы прочтёте о вкладе С.И. Катаева в развитие электронно-лучевых трубок и телевизионной техники.

Спасибо, что остаётесь с нами. Надеемся, материалы выпуска будут полезны и интересны.

*Всего вам доброго.*

*Юрий Широков, главный редактор*

Журнал «Современная электроника»

Издаётся с 2004 года

Главный редактор Ю. В. Широков

Заместитель главного редактора А. В. Малыгин

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

С. А. Сорокин, Р. Х. Хакимов

Вёрстка М. Ю. Соколов

Распространение Ю. А. Фенчева (shop@cta.ru)

Реклама Н. А. Антипов +7 (968) 567-30-06 (antipov.n@cta.ru)

Учредитель и издатель ООО «СТА-ПРЕСС»

Генеральный директор К. В. Седов

Адрес учредителя и издателя:

117279, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 108,  
пом/ком/эт I/67/тех

Почтовый адрес: 117437, г. Москва,  
Профсоюзная ул., 108

Тел.: (495) 232-00-87

shop@cta.ru • www.cta.ru

Производственно-практический журнал

Выходит 9 раз в год. Тираж 10 000 экз.

Цена свободная

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

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».

Адрес: Москва, Сигнальный проезд, 19,  
бизнес-центр Вэлдан.

Тел./факс: (499) 903-69-52

Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции.

Ответственность за содержание рекламы несут рекламодатели.

Ответственность за содержание статей несут авторы.

Материалы, переданные редакции, не рецензируются и не возвращаются.

Мнение редакции не обязательно совпадает с мнением авторов.

Все упомянутые в публикациях журнала наименования продукции и товарные знаки являются собственностью соответствующих владельцев.

© СТА-ПРЕСС, 2026

## Мы в соцсетях





Вторая часть интервью с Владимиром Сауловичем Айзиным – генеральным директором ГК «ИнСАТ»

## Технологии «ВАУ-эффекта»

Рынок АСУ ТП перенасыщен типовыми панелями и модулями ввода-вывода, но действительно прорывных решений единицы. Российский разработчик рассказывает, как создать «ВАУ-эффект» там, где конкуренция, казалось бы, всё стандартизировала. Почему шестиядерный ARM (RK3399) и 4 ГБ ОЗУ в панели оператора – это не избыточно, а необходимо для комфортной работы полноценной SCADA (MasterSCADA) и встроенных архивов? В чем инженерный подвиг модуля с частотой опроса 2000 Гц (против 200 Гц у лидера рынка), индивидуальной гальванической развязкой и классом точности 0,02%? Как наличие веб-сервера и экранчика на каждом модуле меняет подход к наладке, отменяя шильдики и «бумажечки»?

Особое внимание – к схемотехнике: почему отказ от сквозного Ethernet-порта внутри модуля (в пользу внешнего коммутатора) позволяет реализовать горячую замену без разрыва цепочки, а PoE и резервированное питание решают проблемы «грязных» клеммников. Помимо «железа», обсуждаются архитектурные планы: создание полного комплекта PCU (от серверов до контроллеров) и открытость продукта АВАДС HISTORIAN для интеграции с любыми SCADA (включая SimpLight и SCADA Plus). Отдельный блок – реальная локализация: российская сборка, переход на отечественные процессорные модули с мая этого года и планы по входу в реестр Минпромторга. Парадоксальный ответ на вопрос о «Байкале» и честная оценка текущих ограничений тоже войдут в текст.

Это интервью – дорожная карта для главных инженеров и технологов, которые ищут мощную альтернативу Овену и готовы смотреть на рынок без иллюзий, но с амбициями.



## ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

- 4** Гибридно-плёночные DC/DC-модули электропитания повышенной мощности для применения в аппаратуре специального назначения

*Виктор Жданкин*

## ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

- 12** Реализация фазового регулирования мощности
- 20** Современные системы управления электроприводов: структура и конструкция. Часть 1

*Максим Сергеев, к. т. н.*

- 28** Система автоматического управления воздушным шлюзом

*Олег Вальпа*

- 32** Локальные микроконтроллеры с интерфейсом RS-485

*Олег Вальпа*

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- 36** Электронные системы диагностики, стимуляции и воздействия на человека на примере ВАМН и управления – на примере AE-Skin

*Андрей Кашкаров*

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- 46** Об оптимальной расстановке фанатов на печатных платах

*Александр Старков*

## СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

- 52** Телевизор с электронно-лучевой трубкой: разработки С.И. Катаева и их значение

*Вадим Экземплярский*

## ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

- 56** К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Часть 4. История возникновения концепции поляритонов

*Виктор Алексеев*

# Гибридно-плёночные DC/DC-модули электропитания повышенной мощности для применения в аппаратуре специального назначения

Виктор Жданкин (info@prochip.ru)

В статье рассматриваются технические характеристики гибридно-плёночных DC/DC-преобразователей напряжения с выходными мощностями 120 Вт китайских производителей для применения в аппаратуре специальной техники, аналогичные по многим параметрам популярным моделям американских производителей. Даны рекомендации для оптимального выбора моделей с учётом некоторых важных отличий в наборе сервисных функций и характеристик.

Общей тенденцией развития современной аппаратуры является непрерывное её усложнение и рост потребляемой мощности, поэтому для обеспечения питанием функциональных узлов аппаратуры необходимы источники питания с большей выходной мощностью. В связи с этим возрос спрос на преобразователи напряжения с выходными мощностями 120 Вт и выше с высокими показателями удельной мощности и КПД. В высоконадёжных системах вторичного электропитания для комплексов специального назначения применяются унифицированные силовые модули, разработанные с использованием гибридной технологии, которая обеспечивает высокую плотность упаковки компонентов бескорпусного исполнения. Использование бескорпусной элементной базы позволяет

исключить из конструкции источника питания ряд лишних конструктивных элементов: корпусов и деталей для их крепления, изоляции и т.п. Применение электропроводящей клеевой композиции для установки бескорпусных активных компонентов и пассивных компонентов на керамической подложке снижает массогабаритные характеристики изделий микросборочного производства, а также позволяет сохранить низкое тепловое сопротивление конструкции, обеспечить прочность, стабильность в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов и т.д. Благодаря интегральной гибридной технологии вполне возможно выполнить преобразователь напряжения в объёме, который полностью определяется необходимой поверхностью охлаждения.

Ускорению практического освоения научно-технических достижений в области создания перспективных микросборочных приборов способствует совмещение разработки собственных микросборочных приборов и комплектующих изделий (микросборок, микросхем) на одном и том же предприятии [1].

В течение длительного времени в аппаратуре российских предприятий, производящих военную и ракетно-космическую технику, применялись электронные компоненты и модули производства американских и европейских компаний, поставка которых с марта 2022 года значительно ограничена.

Российские производители серийных высокоэффективных источников электропитания специального назначения значительно увеличили объёмы производства продукции на основе отечественных электронных компонентов, обеспечивая импорто-независимость важнейших отраслей российской промышленности. Но не всегда удаётся подобрать точные аналоги для замены импортных изделий в выпускаемой серийной технике. При необходимости можно найти аналог по электрическим параметрам, но его массогабаритные характеристи-

Таблица 1. Номенклатура и общие характеристики DC/DC-преобразователей напряжения повышенной мощности предприятия СЕТС24

Модель	Диапазон входного напряжения, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	Нестабильность по напряжению, мВ	Нестабильность по току, мВ	Пульсации выходного напряжения (пик.), мВ	КПД, %	Габариты корпуса (макс.), мм	Аналог
SWH120-28S3R3MMb	16...40	3,3± 0,05	≤ 20	10	20	60	72	76,7×38,6×10,7	DVFL28R3S
SWH120-28S05MMb	16...40	5± 0,05	≤ 20	10	20	60	79	76,7×38,6×10,7	DVFL2805S
SWH120-28S12MMb	16...40	12± 0,12	≤ 9,2	10	20	60	86	76,7×38,6×10,7	DVFL2812S
SWH120-28S15MMb	16...40	15± 0,15	≤ 8	10	20	60	86	76,7×38,6×10,7	DVFL2815S
SWH120-28S28MMb	16...40	28± 0,3	≤ 4,28	10	20	100	85	76,7×38,6×10,7	–
SWH120-28D05MMb	16...40	5± 0,05/-5±0,2	≤ 10 / ≤ 10	20/50	50/100	80/80	79	76,7×38,6×10,7	DVFL2805D
SWH120-28D12MMb	16...40	12± 0,12/-12±0,2	≤ 4,6 / ≤ 4,6	20/50	50/100	80/80	79	76,7×38,6×10,7	DVFL2812D
SWH120-28D15MMb	16...40	15± 0,15/-15±0,2	≤ 4 / ≤ 4	20/50	50/100	80/80	85	76,7×38,6×10,7	DVFL2815D

ки, присоединительные размеры, расположение выводов и их функциональное назначение могут отличаться от требующей замены модели. Эта проблема рассматривалась в статье [2], где были предложены возможные пути решения этой проблемы применением полных аналогов американских изделий уровня качества Military, предлагаемых одной китайской компанией, входящей в Китайскую корпорацию электронных технологий (China Electronics Technology Group Corporation, CETC). Это решение позволяет сохранить серийные схемотехнические решения аппаратуры отечественных изготовителей электронной техники. Но при выборе взаимозаменяемых моделей китайских производителей следует внимательно изучать технические характеристики предлагаемых изделий. В каталогах китайских производителей, которые активно осваивают российский рынок, указываются в качестве аналогов предлагаемым моделям заказные коды американских производителей. Но при тщательном рассмотрении документации выясняется, что идентичными оказываются только габаритные размеры и расположение выводов, а набор сервисных функций и схемотехнические решения предлагаемых моделей отличаются от указанных американских аналогов. Далее будут рассмотрены DC/DC-преобразователи повышенной мощности (до 120 Вт) уровня качества Military, выпускаемые китайским предприятием Xi'an Microelectronics Technology Institute (XMTI), продукция которого успешно применяется в российских проектах по созданию космических аппаратов [3], и CETC24 («Научно-исследовательский институт технологий производства микросхем» Китайской корпорации электронных технологий), продукция которого малоизвестна российским специалистам (во врезке кратко представлен портрет этого предприятия).

### Гибридные DC/DC-преобразователи повышенной мощности предприятия CETC24

Предприятие CETC24 разработало и производит унифицированные модули DC/DC-преобразователей уровня качества Military в гибридно-плёночном исполнении, совместимые по своим электрическим параметрам,

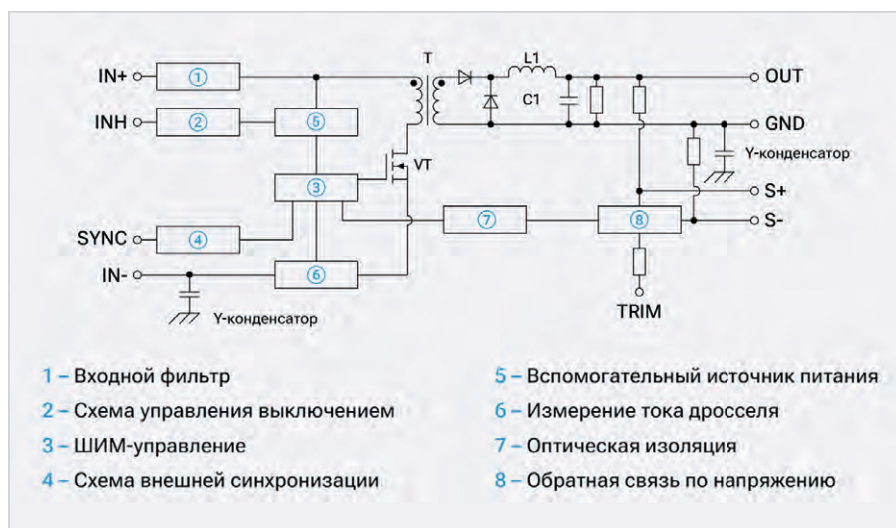


Рис. 1. Функциональная схема гибридного одноканального преобразователя SWH120-28S05MMb

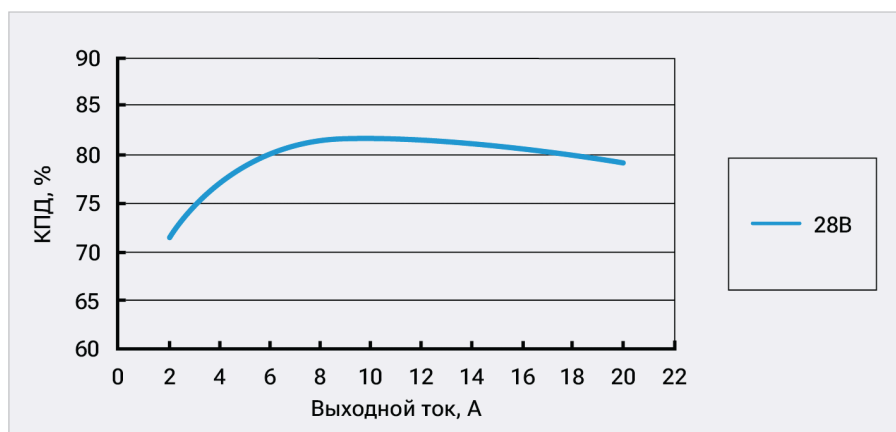


Рис. 2. Зависимость КПД от тока нагрузки для модуля SWH120-28S05MMb

габаритным характеристикам, расположению выводов и их функциональному назначению с изделиями известных американских компаний – VPT и Crane Electronics (Interpoint®).

Номенклатура и общие характеристики DC/DC-модулей преобразователей повышенной мощности с выходными мощностями от 66 до 120 Вт, предлагаемые в качестве замены модулям серии DVFL28 (VPT), приведены в табл. 1. Далее рассмотрим, насколько предлагаемые модули совместимы и взаимозаменяемы с аналогичными преобразователями серии DVFL28.

Функциональная блок-схема одноканального преобразователя SWH120-28S05MMb показана на рис. 1. Схема модуля выполнена на базе однотактного прямоходового преобразователя, который является наиболее эффективной структурой источника электропитания. Стабилизация выходного напряжения производится методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей

частотой (350 кГц), обратной связью по напряжению и дополнительной обратной связью по пиковому току дросселя. Силовой транзистор VT1 периодически открывается и закрывается ШИМ-контроллером, управляемым сигналами датчика тока и выходным сигналом усилителя ошибки. Применение для регулирования внутреннего контура и высокой рабочей частоты позволяет снизить габариты модуля. Токосное управление значительно улучшает переходную характеристику преобразователя при резких изменениях нагрузки или входного напряжения. Применение этого режима обеспечивает автоматическую защиту от короткого замыкания в нагрузке в пределах каждого цикла преобразования. Входное напряжение, модулированное силовым ключом, передаётся через трансформатор T, выпрямляется прямым диодом VD1, выходной фильтр L1, C1 формирует выходное напряжение на нагрузке, выделяя среднюю составля-

## «Научно-исследовательский институт чиповых технологий» Китайской корпорации электронных технологий (CETC)

Это научно-исследовательское предприятие, созданное с одобрения Центрального организационного управления. Институт основан на трёх основных позициях CETC: «главная сила в военной электронике, национальная команда в области кибербезопасности и информационных технологий, а также национальная стратегическая научно-техническая сила» и сосредоточен на решении проблемы «узких мест» в чиповых технологиях и эффективном обеспечении безопасности производственной и логистической цепочки. Институт объединяет научно-исследовательские ресурсы четырёх национальных научно-исследовательских институтов I класса CETC: 24-го, 26-го, 44-го и 58-го научно-исследовательских институтов.

Компания CETC Chip Technology (Group) Co., Ltd. и её научно-исследовательский институт чипов функционируют как единое целое, именуемое в совокупности «CETC Chip». В её состав входят 15 национальных и провинциальных инновационных платформ, 1 компания, акции которой котируются на бирже, и 17 непубличных холдинговых компаний второго уровня. Штаб-квартира компании находится в Чунцине, а её деятельность охватывает дельту реки Янцзы, регион Пекин-Тяньцзинь-Хэбэй, Большой залив Гуандун-Гонконг-Макао и экономический круг Чэнду-Чунцин.

### 24-й научно-исследовательский институт Китайской корпорации электронных технологий

Это один из старейших в Китае профессиональных научно-исследователь-

ских институтов полупроводниковых интегральных схем, занимающийся в основном исследованиями, разработкой и производством полупроводниковых аналоговых и смешанных интегральных схем, гибридных интегральных схем, модульных схем, компонентов и деталей. Он имеет полную производственную цепочку, включающую проектирование интегральных схем, производство, тестирование, упаковку, обеспечение надёжности и поддержку применения. В нём находится единственная в Китае национальная ключевая лаборатория по аналоговым интегральным схемам военного назначения. Он создал представительный передовой уровень в области высокопроизводительных аналоговых ИС, представляющий каждый этап развития технологии интегральных схем в Китае. Его продукция широко используется в электронном оборудовании в аэрокосмической отрасли, радиолокационной навигации, прецизионных измерениях, автоматике, автомобилестроении и связи.

### Обеспечение качества

Компания прошла сертификацию по системам управления качеством GB/T 19001-2016 IDT, ISO 9001:2015 и GJB9001C-2017. Эффективное управление качеством внедрено на всех этапах процесса, от проектирования и разработки продукции до производства. Уровень качества продукции достигает требований к компонентам, используемым в аэрокосмической отрасли, таким как LMS, CAST, SAST, YB и KJZ.

### Комплексная платформа для тестирования

Компания обладает полной системой стандартов на продукцию и комплекс-

ными методами тестирования продукции. Она внедрила систему управления качеством в соответствии с GJB2725A «Общие требования к испытательным и калибровочным лабораториям» и ISO/IEC17025 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий». Компания прошла национальную аккредитацию лабораторий и национальную метрологическую сертификацию, а также аккредитацию военной испытательной лаборатории.

### Разработка тестового программного обеспечения

Возможности и технический уровень предприятия являются одними из лучших в Китае в области тестирования высокоскоростных АЦП и ЦАП высокого разрешения, высокопроизводительных усилителей, интегральных схем смешанных сигналов, радиочастотных ИС и высокоскоростных делителей ECL. Возможно проводить тестирование электрических параметров и проверку на старение дискретных полупроводниковых приборов и пассивных компонентов (резисторов, конденсаторов, индуктивностей). Тестирование полупроводниковых интегральных схем и общая проверка электронных компонентов.

Предприятие специализируется на разработке программного обеспечения для тестирования интегральных схем, располагая почти 1000 программами и, в том числе программами для полнопараметрического тестирования АЦП и ЦАП, драйверов, аналоговых переключателей и других интегральных схем. Разработка программ тестирования.

### Портфолио продуктов

Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи и схемы смешанных сигналов



Внешний вид предприятия



Фото процессов

- Высокоскоростной АЦП ( $> 10$  МГц) Прецизионный АЦП ( $\leq 10$  МГц). Высокоскоростной ЦАП ( $> 10$  МГц). Прецизионный ЦАП ( $\leq 10$  МГц). Сверхширокополосная схема выборки/отслеживания и хранения.

#### Модули источников питания и изделия для управления питанием

- Линейные стабилизаторы, источники опорного напряжения, неизолированные импульсные преобразователи постоянного тока, контроллеры импульсных источников питания, схемы управления питанием, источники питания для нагрузки, универсальные гибридные преобразователи постоянного напряжения, универсальные модуль-

ные преобразователи постоянного напряжения, универсальные модульные преобразователи переменного тока, радиационно-стойкие источники питания, маломощные источники питания, специализированные источники питания, аксессуары для источников питания.

#### Схемы управления питанием и интерфейсные микросхемы

- Схемы управления питанием, аналоговые переключатели и мультиплексоры, транзисторы VDMOS, интерфейсные схемы, низкочастотные силовые схемы.

#### Схемы обработки аналогового сигнала

- Операционные усилители и компараторы, усилители с переменным коэф-

фициентом усиления, логарифмические усилители и другие микросхемы обработки аналоговых сигналов.

#### Интегральные схемы радиочастотного/микроволнового диапазона

- ВЧ усилители, ВЧ переключатели, цифровые управляемые аттенюаторы, ограничители, ВЧ входные каскады, регуляторы амплитуды и фазы, ВЧ усилители мощности, смесители, фазовые автоподстройки частоты, генераторы, делители частоты.

#### ASIC/SiP-схемы

- Микросистема предварительной обработки инфракрасного сигнала; микросистема обнаружения сигнала волоконно-оптического гироскопа.

ющую из импульсного напряжения. Функциональный узел гальванической развязки сигнала обратной связи реализован на основе оптоприбора. Оптоприборы характеризуются линейной передаточной характеристикой, имеют малые токи утечки, способны передавать статические сигналы. Но в то же время работающих в линейном режиме оптрон вводит полюс (постоянную времени) на частоте примерно 50 кГц. Особенно нежелательно использование оптопары в радиационно-стойких импульсных преобразователях напряжения, так как деградация параметров оптопары в узле гальванической развязки сигнала обратной связи при воздействии ионизирующих излучений существенно влияет на работоспособность преобразователя в целом или требует тщательного выбора оптопар с гарантированным уровнем дозовой стойкости и обеспечения оптимальных рабочих режимов оптопары.

Недостатком прямоходовой схемы является отсутствие у трансформатора средств естественного размагничивания, как в симметричных схемах. Для устранения этого недостатка предлагается множество механизмов сброса индуктивной энергии. Наиболее популярным способом является активное ограничение напряжения на силовом ключе, который позволяет также более полно использовать сердечник трансформатора, обеспечивая работу с симметричным перемагничиванием в первом и третьем квадрантах В-Н плоскости. Однако для активного ограничения требуется дополнительный силовой ключ с драйвером и резонансным конденсатором, то есть происхо-

дит усложнение и повышение стоимости силовой части [4].

В рассматриваемом преобразователе размагничивание сердечника трансформатора обеспечивается резонансным способом за счёт использования паразитных параметров. В этом случае индуктивность намагничивания трансформатора и паразитные ёмкости силового ключа образуют на трансформаторе параллельный резонансный контур. Отсутствие размагничивающей обмотки позволяет упростить трансформатор, а применение резонансного размагничивания сердечника трансформатора обеспечивает двунаправленную характеристику намагничивания сердечника трансформатора (трансформатор перемагничивается симметрично в двух квадрантах аналогично трансформатору двухтактного преобразователя), размеры трансформатора минимизируются [5]. Низкопрофильная конструкция трансформатора позволяет уменьшить высоту корпуса преобразователя и получить достаточно большую поверхность охлаждения. Применение для изготовления сердечника трансформатора магнитомягкого феррита с низкой величиной суммарных потерь мощности, большой индукцией насыщения и улучшенными тепловыми характеристиками позволяют обеспечить более высокую плотность проходной мощности. Дополнительного повышения КПД можно было бы достичь, применив схему синхронного выпрямления – вместо прямого и возвратного диода использовать полевые транзисторы. Но разработчики преобразователей отказались от этого схемотехнического реше-

ния. В результате, КПД модели с выходным напряжением 5 В составляет 79%, а модель SWH120-28S3R3MMb с выходным напряжением 3,3 В характеризуется значением КПД 72%.

Зависимость КПД от тока нагрузки для одноканальной модели с выходным напряжением 5 В показана на рис. 2. Уменьшение КПД при токе нагрузки, близком к максимальному, происходит из-за дополнительных потерь в компонентах модуля при подходе к их предельным энергетическим возможностям.

Модули содержат комплект сервисных и защитных функций, необходимых для безопасной эксплуатации. Встроенная схема блокировки при пониженных напряжениях на входе обеспечивает корректную работу преобразователя в случае питания от аккумуляторной батареи. Защита по току срабатывает при небольшом сопротивлении нагрузки и коротком замыкании. Функция удалённого включения/выключения внешним сигналом со стороны входа используется при формировании программного включения отдельных модулей в соответствии с необходимым алгоритмом подачи напряжения к отдельным функциональным узлам аппаратуры. Режим синхронизации частоты преобразования внешним синхросигналом позволяет синхронизировать частоту преобразования нескольких модулей в системе и уменьшить пульсации потребляемого тока. Функция особенно полезна при параллельном соединении нескольких модулей для повышения выходной мощности – исключается выброс в пульсации выходного напряжения в непрогнози-



Рис. 3. Внешний вид модуля гибридно-плёночного DC/DC-преобразователя серии SWH120



Рис. 5. Внешний вид плоского корпуса гибридно-плёночного модуля DC/DC-преобразователя серии LFL28

руемый момент времени. Отсутствие функции равномерного распределения тока (SHARE) между параллельно соединёнными модулями вынуждает точно устанавливать уровни выходного напряжения при параллельном соединении нескольких модулей.

Функция точной настройки выходного напряжения обеспечивается подключением регулировочного резистора между выходом TRIM и выходом положительного напряжения или общим проводом (в зависимости от направления регулировки). Общий диапазон регулирования выходного напряжения составляет  $\pm 4\%$  от номинального значения выходного напряжения. Для исключения влияния падения напряжения на соединительных проводах применяется внешняя обратная связь – обратная связь для стабилизации напряжения берётся непосредственно с входных контактов нагрузки и соединяется с выводами +S и -S.

Герметичность модуля обеспечивается применением для корпусирования системы шовно-роликовой сварки, интегрированной в атмосферную камеру с сухим азотом. Высокая герметичность изделия продлевает срок службы и уменьшает вероятность выхода из строя из-за замыкания внутренних контактов. Внешний вид

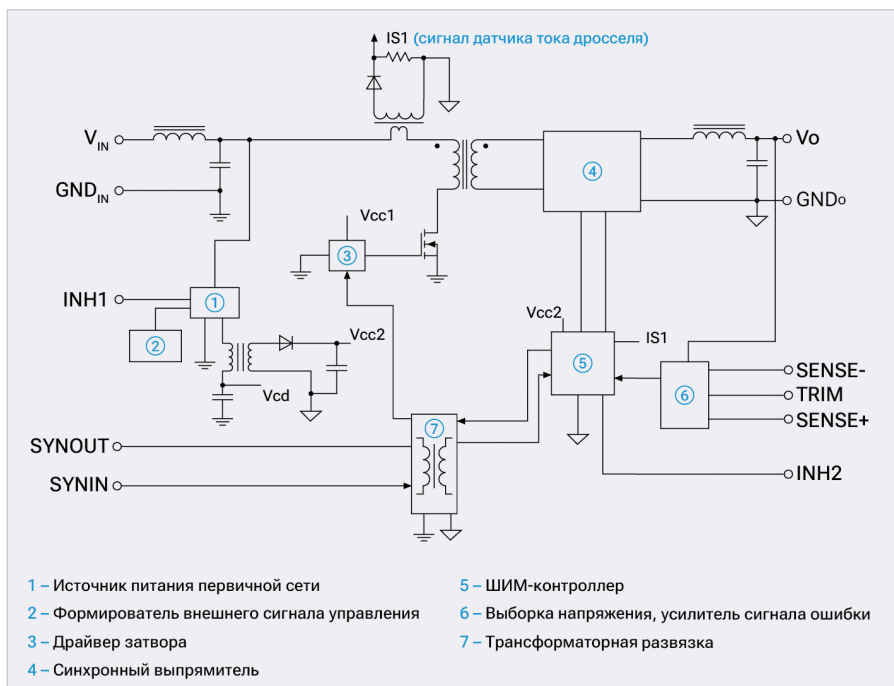


Рис. 4. Функциональная схема одноканального гибридно-плёночного DC/DC-преобразователя серии LFL28

гибридно-плёночного модуля SWH120-28S05MMb показан на рис. 3.

Производство и выходной контроль осуществляются в соответствии с требованиями национального стандарта GJB 2438B -2017 «Основная спецификация производства гибридных интегральных схем», который практически совпадает с американским стандартом MIL-PRF-35534 «Hybrid Microcircuits, General Specification For». Проверки и испытательные процедуры осуществляются согласно требованиям стандарта GJB548B-2005 «Методы и процедуры испытаний изделий микроэлектроники», который соответствует американскому стандарту MIL-STD-883H «Test Methods and Procedures for Microelectronics».

Модули стабильно функционируют в диапазоне температур корпуса от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  без понижения выходной мощности. Диапазон температур хранения от  $-60^{\circ}\text{C}$  до  $+150^{\circ}\text{C}$ .

Модули серии SWH120 можно применить для замены модулей серии DVFL28 только в тех случаях, где не требуются сервисные функции, отсутствующие у модулей серии SWH120.

Значения КПД одноканальных модулей одинаковы, габаритные характеристики, расположение выводов и их функциональное назначение идентичны. У модулей серии SWH120 нет возможности управлять выключением со стороны выхода, не форми-

руется сигнал синхронизации для осуществления взаимной синхронизации нескольких модулей, диапазон подстройки выходного напряжения немного меньше, масса модулей выше на 14%. Гальваническая развязка в контуре обратной связи у модулей DVFL28 трансформаторная, что обеспечивает повышенные требования по стойкости к дестабилизирующим факторам.

### 120-ваттные гибридные DC/DC-преобразователи предприятия XMTI

Компания XMTI (Xi'an Microelectronics Technology Institute), входящая в состав Китайской корпорации аэрокосмической науки и техники (CASC – China Aerospace Science and Technology Corp.), разрабатывает и поставляет гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи с выходными мощностями от 5 до 120 Вт для работы в бортовой аппаратуре специального назначения, авиационной и космической техники. Радиационно-стойкие гибридно-плёночные DC/DC-модули, выпускаемые предприятием, рассмотрены в статье [6], здесь же представлен краткий портрет предприятия и широкая номенклатура предлагаемой электронной продукции. Совмещение разработки и производства модулей и комплектующих изделий (транзисторов, микросхем, диодов) на предприятии гарантирует ускорение производ-

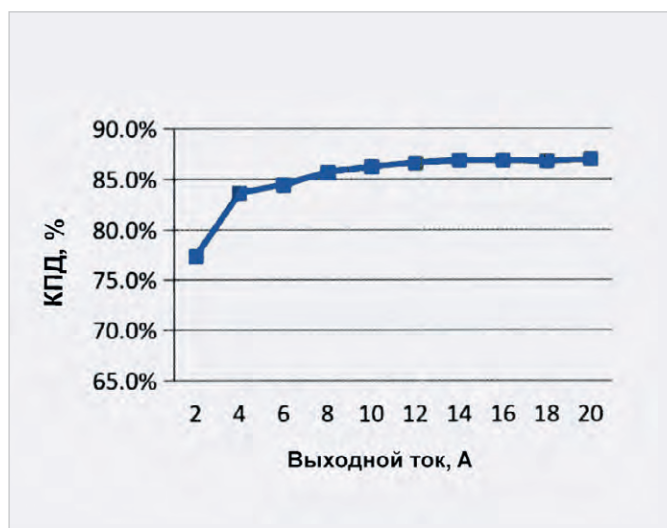


Рис. 6. Зависимость КПД от выходного тока для модуля LFL2805S-CH

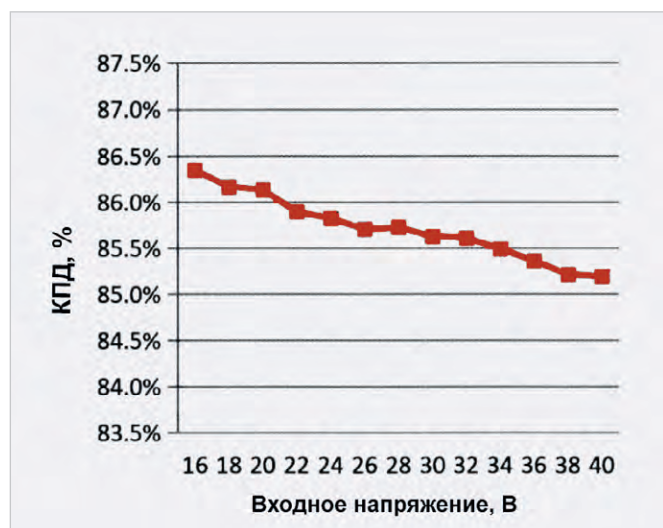


Рис. 7. Зависимость КПД от входного напряжения для модуля LFL2805S-CH

ства и достижение высокого уровня качества.

DC/DC-модули электропитания серии LFL с выходными мощностями 100 и 120 Вт для работы в бортовых сетях с диапазоном изменения напряжения от 16 до 40 В (номинальное значение 28 В) являются одной из недавних разработок. Выходные напряжения охватывают наиболее часто востребованные значения 5, 12, 15, 28,  $\pm 12$ ,  $\pm 15$  В. Модули предназначены для эксплуатации при температурах от  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  и стабильно функционируют без изменения технических параметров. Основные технические характеристики DC/DC-преобразователей серии LFL28 приведены в табл. 2.

Применяется энергетически эффективная однотактная прямоходовая структура с использованием регулирования методом широтно-импульсной модуляции и комбинацией обратной связи по напряжению и дополнительной обратной связи по току дросселя

(рис. 4). Преобразование осуществляется на частоте 200–400 кГц. Применение схемы синхронного выпрямителя обеспечивает эффективное управление переключающим транзистором цепи регулирования мощности, а небольшие потери синхронного выпрямителя увеличивают КПД. Транзисторы MOSFET синхронного выпрямителя индивидуальным образом оптимизированы для применения в качестве синхронного транзистора в целях максимизации КПД. Размещение ШИМ-контроллера со встроенным прецизионным источником опорного напряжения на вторичной стороне ближе к нагрузке и ключам синхронного выпрямителя позволяет уменьшить длительность фронтов управляющих напряжений на затворах транзисторов выпрямителя, что способствует увеличению КПД. Импульсы ШИМ для управления силовым ключом передаются на первичную сторону через малогаба-

ритный импульсный трансформатор. Этим достигается максимально возможное быстродействие контура регулирования и упрощается задача обеспечения его устойчивости независимо от уровня входного напряжения и тока нагрузки.

В режиме синхронизации частоты внешним синхросигналом (250–380 кГц) он подаётся на вход ШИМ-контроллера через развязывающий трансформатор, что исключает помехи от силовых цепей.

Для размагничивания трансформатора используется эффект резонансного переключения: во время запертого состояния силового ключа трансформатор размагничивается через резонансную цепочку, состоящую из индуктивности намагничивания и ёмкости, образованной ёмкостями силового ключа, первичной обмотки и всеми ёмкостями на вторичной стороне. Трансформатор перемагничивается симметрично в двух квадран-

Таблица 2. Основные параметры модулей DC/DC-преобразователей напряжения серии LFL28

Заказной номер	Выходная мощность, Вт	Диапазон входного напряжения, В	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	КПД (тип.), %	Вес (тип.), г	Аналог	Модель согласованного фильтра	Габаритный размер корпуса, мм
LFL2805S-CH	100	16...40*	5	20	87	75	DVFL2805S	LFE-102-CH	76,7×38,6×10,66
LFL2812S-CH	120	16...40*	12	10	89	75	DVFL2812S	LFE-102-CH	76,7×38,6×10,66
LFL2815S-CH	120	16...40*	15	8	90	75	DVFL2815S	LFE-102-CH	76,7×38,6×10,66
LFL2828S-CH	120	16...40*	28	4,29	89	76	DVFL2815S	LFE-102-CH	76,7×38,6×10,66
LFL2812D-CH	120	16...40*	$\pm 12$	$\pm 5$	89	76	DVFL2812D	LFE-102-CH	76,7×38,6×10,66
LFL2815D-CH	120	16...40*	$\pm 15$	$\pm 4$	90	76	DVFL2815D	LFE-102-CH	76,7×38,6×10,66

\* Допускаются импульсы напряжения до 80 В длительностью 1 с.

Таблица 3. Динамические параметры модуля LFL2805S-CH

Параметр	Обозначение	Условия измерения	Мин. значение	Макс. значение	Единица измерения
Изменение выходного напряжения при изменении нагрузки	$V_{LT}$	$T_A = 25^\circ$ ; $V_{IN} = 28$ В; 50% -> 100%; 100% -> 50% нагрузки	-1000	1000	мВ
Время переходного процесса к установившемуся значению при скачке тока нагрузки	$t_{LT}$	$T_A = 25^\circ$ ; $V_{IN} = 28$ В; 50% -> 100%; 100% -> 50% нагрузки	-	1000	мкс
Изменение выходного напряжения (пиковое значение) при изменении входного напряжения	$V_{VT}$	$T_A = 25^\circ$ ; входное напряжение $V_{IN}$ 16 ---> 40 В; входное напряжение 40 -> 16 В; $I_0 = 20$ А	-1000	1000	мВ
Время восстановления выходного напряжения при изменении входного напряжения	$t_{VT}$	$T_A = 25^\circ$ ; входное напряжение $V_{IN}$ 16 ---> 40 В; входное напряжение 40 -> 16 В; $I_0 = 20$ А	-	1000	мкс
Начальное перерегулирование (пиковое значение)	$V_{TO}$	Входное напряжение 0 -> 28 В, $I_0 = 20$ А	-	200	мВ
Задержка включения	$t_{TR}$	Входное напряжение 0 -> 28 В, $I_0 = 20$ А	-	50	мс
Время восстановления после сбоя нагрузки	$t_{LF}$	$I_0$ от тока короткого замыкания до 20 А	-	150	мс

тах с удвоенным размахом индукции. Подобная структура позволяет исключить размагничивающую обмотку и более эффективно использовать трансформатор для прямой передачи энергии на вторичную часть.

Использование магнитомягкого феррита с низкими магнитными потерями, высокой индукцией насыщения и температурной стабильностью позволило создать низкопрофильный трансформатор и плоскую конструкцию корпуса гибридного модуля (рис. 5). Показатель энергетической плотности модулей составляет 3802 Вт/дм<sup>3</sup>.

Модули серии LFL28 содержат набор сервисных и защитных функций, необходимых для безопасной эксплуатации. Схема блокировки при пониженных напряжениях на входе выключает модуль при снижении уровня входного напряжения ниже допустимого. Защита по току срабатывает при небольшом сопротивлении нагрузки и коротком замыкании.

При возникновении режима короткого замыкания нагрузки или перегрузки интегрированная схема защиты поддерживает режим работы с низким энергопотреблением (30 Вт для модуля с выходным напряжением 5 В) и автоматически перезапускает модуль после устранения неисправности. Время срабатывания защиты от короткого замыкания составляет приблизительно 2 мс, а время перезапуска при коротком замыкании – приблизительно 70 мс. Схема не может оставаться в состоянии защиты от короткого замыкания в течение длительного периода времени.

Выключение внешним сигналом со стороны входа и выхода повышает гибкость применения в системе элек-

тропитания, когда требуется подача питания к отдельным функциональным узлам аппаратуры по определённому алгоритму. Функция подстройки выходного напряжения внешним резистором позволяет регулировать выходное напряжение в диапазоне  $\pm 10\%$  от номинального значения. Применение внешней обратной связи компенсирует падение напряжения на соединительных проводах и обеспечивает стабильное напряжение на входных выводах нагрузки. Синхронизация от внешнего генератора либо взаимная синхронизация нескольких модулей позволяет уменьшить пульсации потребляемого тока.

График зависимости КПД от тока нагрузки показан на рис. 6 – при максимальных токах нагрузки практически не наблюдается уменьшения КПД, это означает, что силовая часть модуля имеет запас по мощности. Зависимость КПД от входного напряжения показана на рис. 7 – КПД уменьшается незначительно при максимальном входном напряжении (примерно на 1,3%).

В табл. 3 приведены динамические характеристики одноканального модуля LFL2805S-CH.

Для снижения уровня кондуктивных помех на входе модулей установлен помехоподавляющий LC-фильтр. Для дополнительного ослабления синфазных и дифференциальных помех предлагается применять внешний модуль помехоподавляющего фильтра LFE-102-CH с коэффициентом ослабления помех 40 дБ на частоте 1 МГц. Пульсация выходного напряжения модуля с выходным напряжением 5 В при максимальном токе нагрузки 20 А составляет 100 мВ (двойная амплитуда). Снижение пульсаций можно обе-

спечить дополнительным внешним LC-фильтром, при расчёте которого необходимо учитывать требования к перенапряжениям, возникающим на конденсаторе при работе на динамическую нагрузку, а также оптимизацию параметров индуктивности и фильтрующего конденсатора из условия минимизации их массогабаритных характеристик и обеспечения минимальной температуры перегрева конденсатора фильтра для увеличения его службы.

Производство модулей осуществляется в соответствии с требованиями национального стандарта GJB2438B-2017 «Основная спецификация для гибридных интегральных схем», которая идентична спецификации MIL-PRF-38534F «Hybrid Microcircuits, General Specification For» (США). Испытательные процедуры и проверки проводятся согласно требованиям национального стандарта GJB 548C-2021 «Методы и процедуры испытаний микроэлектроники», который практически идентичен американскому стандарту MIL-STD-883H «Test Methods and Procedures for Microelectronics».

По ключевым характеристикам – электрическим параметрам, габаритам, расположению и назначению выводов – модули серии LFL28 полностью соответствуют моделям DVFL28 производства VPT (США). При этом следует учитывать два существенных различия:

- у одноканальных модулей серии LFL28 отсутствует функция выравнивания токов на выходе при параллельном соединении;
- рабочая частота модулей DVFL28 находится в диапазоне 425–600 кГц, что выше, чем у модулей ХМТИ.

С другой стороны, модули серии LFL28 демонстрируют более высокий КПД – в среднем выше на 4–5%, что обусловлено применением современных эффективных схемотехнических решений.

## Заключение

Представленные гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи в модульном исполнении соответствуют требованиям, предъявляемым к системам электропитания современной аппаратуры специального назначения, и гарантируют высокую стабильность в жёстких условиях эксплуатации. Объём испытаний DC/DC-модулей электропитания на китайских предприятиях полностью соответствует американскому стандарту MIL-STD-883H и европейским стандартам ECSS, методики которых опубликованы. Тот факт, что электрические параметры, габаритные характеристики, расположение выводов и их функциональное назначение идентичны модулям американских производителей, позволяет существенно сократить временные

затраты при замене ранее применяемых модулей в серийной аппаратуре. Разумеется, для оптимального выбора требуется рассмотреть и учесть некоторые из указанных выше критериев и учитывать специфику каждого конкретного применения.

Ускорению сроков изготовления модулей способствует совмещение производства продукции и комплектующих изделий (микросхем ШИМ-контроллеров, драйверов затворов МОП-транзисторов, силовых транзисторов, диодов, микросхем источников опорного напряжения и др.) на одном и том же предприятии и кооперация многочисленных предприятий китайской электронной промышленности.

## Литература

1. Микроэлектронные электросистемы. Применения в радиоэлектронике / Ю.И. Конев, Г.Н. Гулякович, К.П. Полянин и др.; под ред. Ю.И. Конева. М.: Радио и связь, 1987. 240 с., ил.
2. Жданкин В. Гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи напряже-

- ния для применения в аппаратуре специального назначения // Электронные компоненты. 2023. № 2.
3. Сашин А. Импортозамещение по-русски: китайские ИС на российских КА // Компоненты и технологии. 2021. № 6.
  4. Дейнеко Д.С., Кастров М.Ю. Способы размагничивания трансформатора прямоходового преобразователя постоянного напряжения с помощью активного ограничителя // Практическая силовая электроника. 2010. № 1 (37).
  5. Герасимов А.А., Кастров М.Ю. Разработка прямоходового преобразователя постоянного напряжения с одним силовым ключом и резонансным размагничиванием // Практическая силовая электроника. 2011. № 1 (44).
  6. Жданкин В. Радиационно-стойкие гибридно-плёночные DC/DC-преобразователи с высокой удельной мощностью и выходными мощностями 120 Вт // Современная электроника. 2026. № 1.





# erkonmarket.ru

## Собственное производство:

- Аттенюаторы ПР1-25 (50-2000 Вт)
- Силовые резисторы Р1-150М (до 1500 Вт)
- Мощные наборы резисторов НР1-82
- Проволочные чип-индуктивности
- Прецизионные чип-резисторы Р1-8П (допуск от ±0,1%)
- Чип-резисторы Р1-8В стандарта АЕС-Q200

Все электронные компоненты в один клик 24/7

Удобные фильтры и информативное описание

Быстрая обработка входящих заказов

Возможность представить вашу продукцию на нашем сайте








# 8 800 550 39 09

г. Н. Новгород, ул. Нартова, д.6  
 info@erkonmarket.ru



Реклама

# Реализация фазового регулирования мощности

Сергей Шишкин

В статье рассматриваются различные варианты регуляторов с применением симисторов, где реализован фазовый способ регулирования. Представлены варианты на дискретных элементах, специализированных микросхемах и микроконтроллере.

## Введение

Функциональная схема однофазного симисторного регулятора мощности для активной нагрузки приведена на рис. 1.

Фазовые методы регулирования базируются на управлении действующим значением переменного напряжения на нагрузке путём изменения длительности открытого состояния симистора в течение полупериода частоты сети. Симистор VS1 можно заменить на два встречно-параллельных тиристора VS2 и VS3. В данном случае регулирование действующего значения переменного напряжения на нагрузке осуществляется путём изменения длительности открытого состояния одного из включённых встречно-параллельно тиристоров в течение полупериода частоты сети. При фазовом методе частота выходного напряжения соответствует частоте питающей сети, а регулирование производится путём изменения формы кривой выходного напряжения и тока. Форма тока зависит от характера нагрузки. Фазовое регулирование возможно с отстающим углом управления  $\alpha$ ; с опережающим углом управления  $\alpha$ ; либо с тем и другим (двустороннее фазовое управление). Суть фазового метода регулирования состоит в задержке на угол  $\alpha$  момента открывания симистора относительно точки его естественной коммутации. Для регулирования угла включения симистора необходимо управляющий сигнал сдвигать по фазе относительно сетевого напряжения. Системы управления в регуляторах, выполняющие эту функцию, называют фазосдвигающими устройствами ФСУ. Их работа синхронизирована с напряжением сети. На рис. 2 приведена временная диаграмма фазового регулирования с отстающим углом  $\alpha$ .

Симистор VS1 открывается в момент прихода импульса тока в

цепь управляющего вывода. Выходное напряжение такого регулятора

определяется фазовым углом отпира-ния симистора. Чем раньше относительно начала полупериода сетевого напряжения откроется симистор, тем бо́льшая часть полупериода напряжения поступит в нагрузку. Изменяя задержку момента открывания симистора (угол  $\alpha$ ), можно управлять,

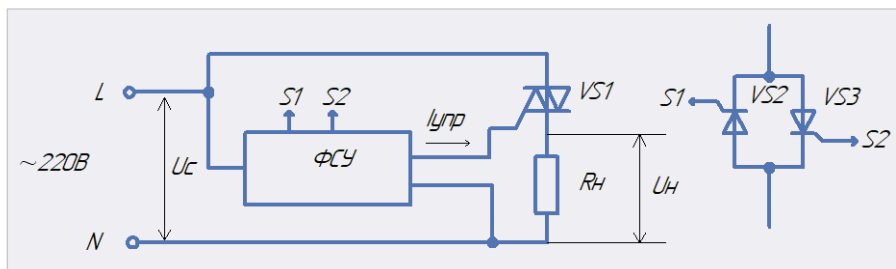


Рис. 1. Функциональная схема симисторного регулятора мощности

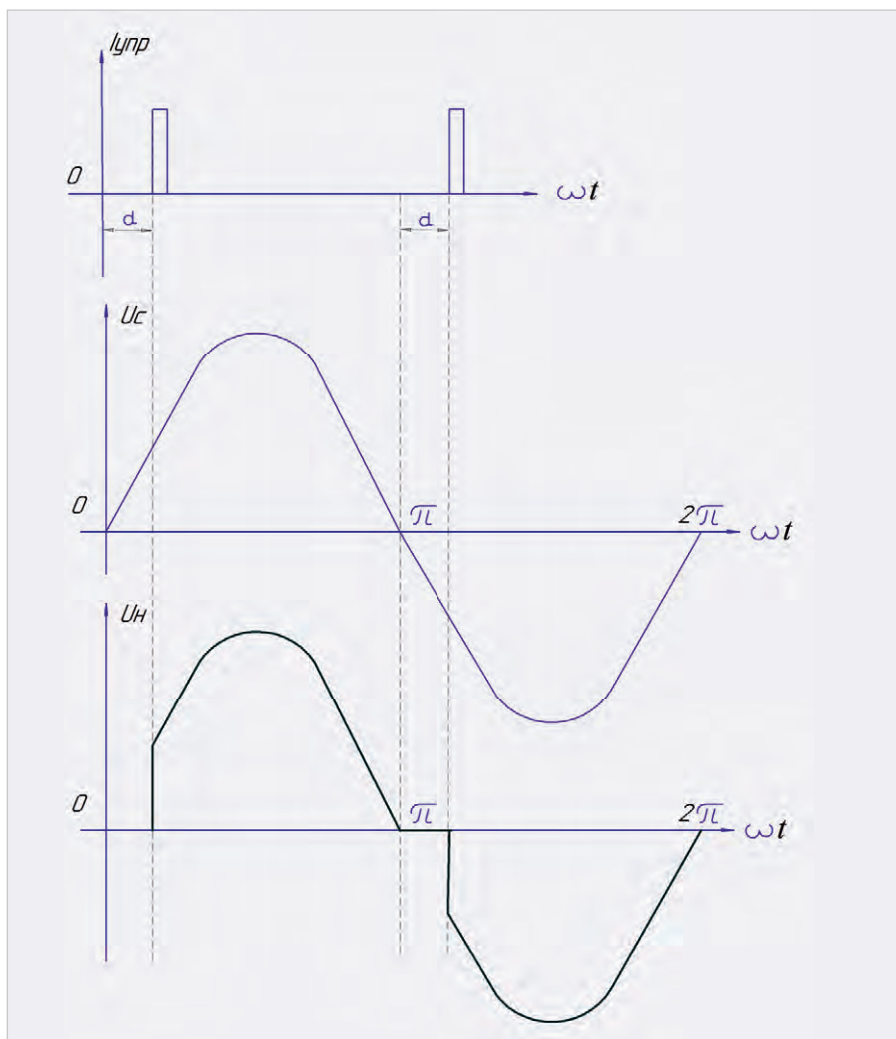


Рис. 2. Фазовое регулирование с отстающим углом  $\alpha$

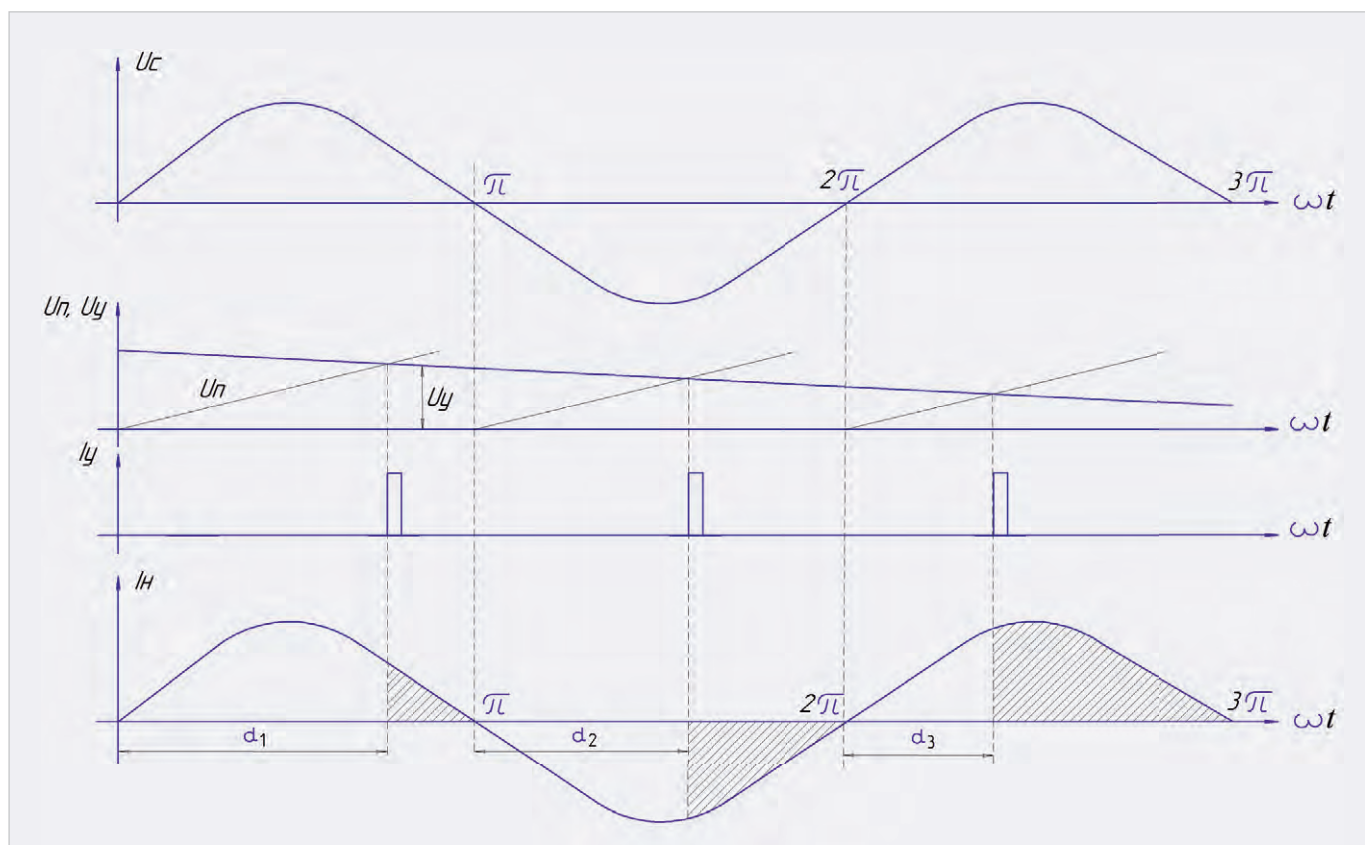


Рис. 3. Временные диаграммы работы ФСУ вертикального типа

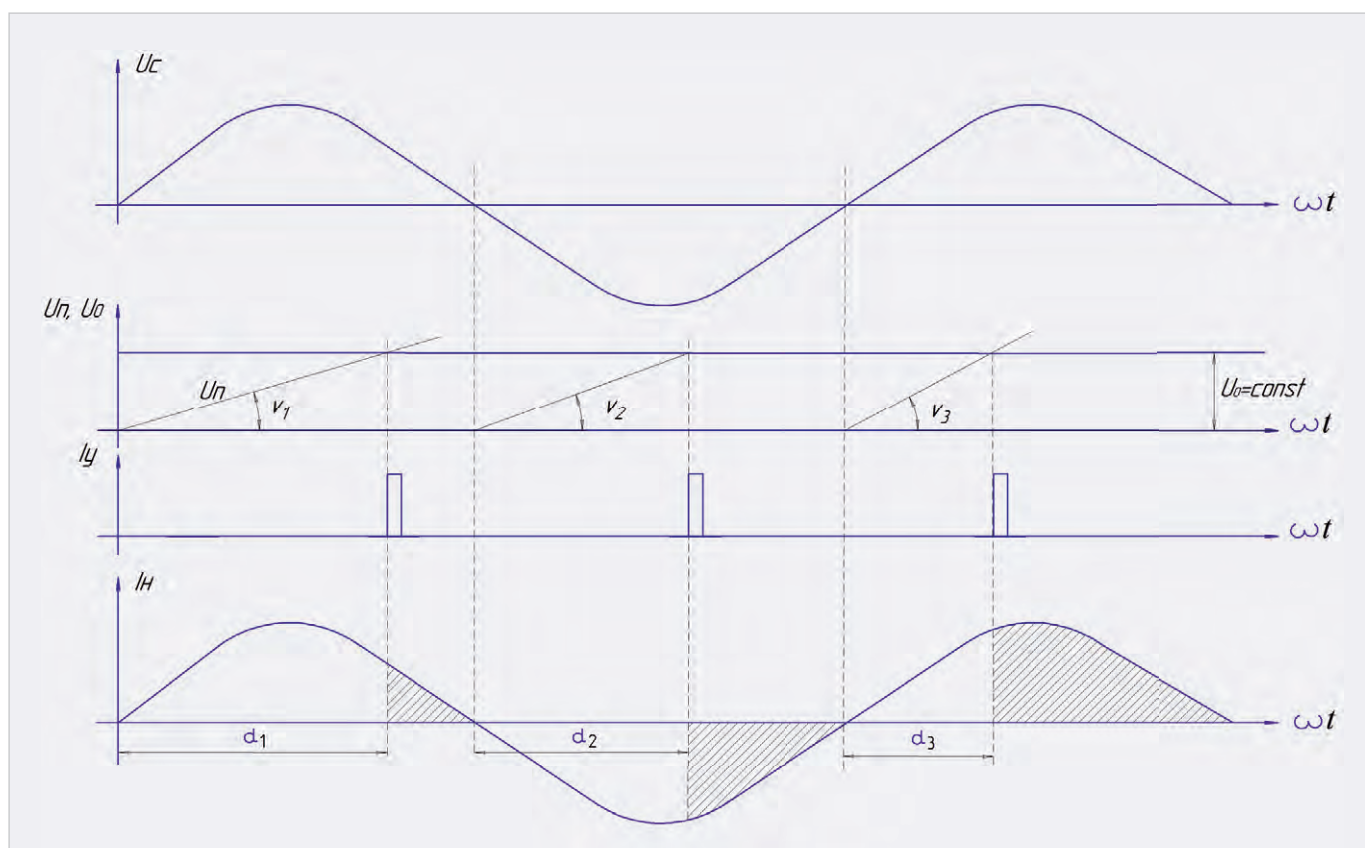


Рис. 4. Временные диаграммы работы ФСУ тангенциального типа

например, яркостью подключённой лампы накаливания. Симистор VS1 закрывается в точках естественной коммутации  $\pi$ ,  $2\pi$ ,  $3\pi$  и т.д. По прин-

ципу действия ФСУ могут быть следующие:

- вертикального управления;
- тангенциального управления;

- горизонтального типа.

Временные диаграммы работы ФСУ вертикального типа представлены на рис. 3.

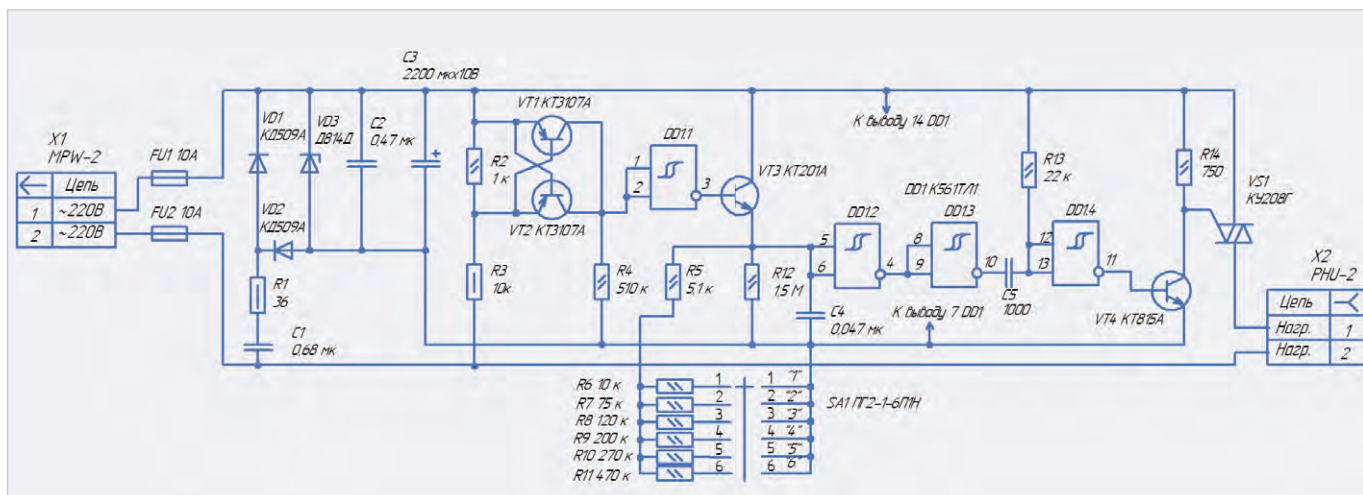


Рис. 5. Принципиальная схема фазового регулятора, выполненного на дискретных элементах

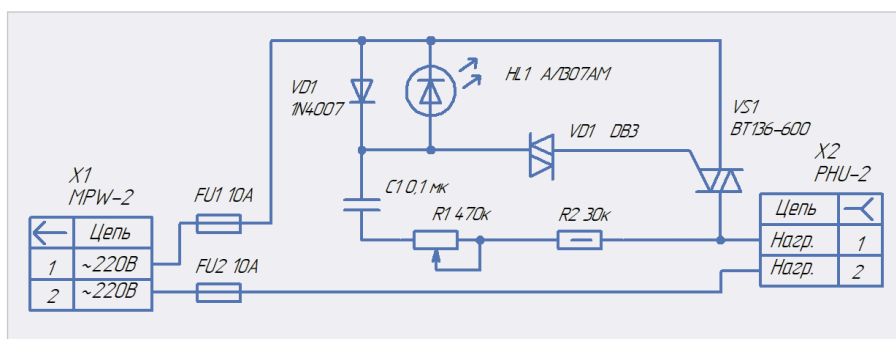


Рис. 6. Принципиальная схема фазового регулятора с применением динистора в цепи управления симистора



Рис. 7. Внешний вид микросхемы K1182PM1

Импульс управления симистором  $I_y$  формируется в момент равенства синхронизирующего напряжения пилообразной формы  $U_{\pi}$ , синфазного с напряжением сети  $U_c$  и управляющего напряжения  $U_y$ . При изменении величины  $U_y$ , то есть смещении его по вертикали, происходит изменение величины угла управления симистора  $\alpha$  ( $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$ ) и, соответственно, среднего значения тока в нагрузке  $I_n$ . Временные диаграммы работы ФСУ тангенциального типа представлены на рис. 4.

Импульс тока управления  $I_y$  формируется в момент сравнения пилообразного напряжения  $U_{\pi}$  с напряжением постоянного уровня  $U_0 = \text{const}$ . Изменяя угол наклона между  $U_{\pi}$  и  $U_0$  ( $v_1 < v_3 < v_3$ ), можно регулировать угол включения симистора  $\alpha$  ( $\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3$ ).  $U_{\pi}$  при этом должно быть синхронизировано с сетевым напряжением  $U_c$ .

ФСУ горизонтального типа используют принцип формирования импульса управления симистора по углу фазового сдвига управляющего напряжения. В качестве фазосдвигающих устройств применяются фазорегуляторы, различные фазосдвигающие цепочки.

### Фазовое регулирование с применением аналогового ФСУ

Принципиальная схема фазового регулятора мощности с фиксированными значениями установленной выходной мощности, выполненного на дискретных элементах, приведена на рис. 5.

Рассмотрим функциональные узлы устройства, представленного на рис. 5. Источник питания выполнен на следующих элементах: диоды VD1, VD2; стабилитрон VD3; конденсаторы C1...C2; резистор R1. Узел контроля перехода сетевого напряжения через «ноль» выполнен на транзисторах VT1, VT2 и резисторах R2...R4. Транзистор VT1 включён по схеме с общим эмиттером. При положительном полупериоде сетевого напряжения транзистор VT1 открыт и входит в насыщение. Напряжение на его коллекторе близко к эмиттерному. Транзистор VT2 при этом закрыт. При отрицательном полупериоде сетевого напряжения закрыт транзистор VT1. Транзистор VT2, включённый по схеме с общей базой, открыт и насыщен. Напряжение на его коллекторе имеет

тот же знак и амплитуду. Когда сетевое напряжение по абсолютному значению меньше, чем 40...50 В, VT1 и VT2 закрыты и напряжение на их коллекторах близко к значению напряжения на выводе 7 микросхемы DD1. Сигнал с выводов коллекторов VT1 и VT2 через инвертирующий элемент микросхемы DD1.1 и через эмиттерный повторитель, выполненный на транзисторе VT3, заряжает конденсатор C4 до уровня напряжения источника питания. Если переключатель SA1 установлен в положение «1», то конденсатор C4 разряжается через резисторы R5, R6, R12. При снижении напряжения на нём до определённого порогового значения элементы DD1.2 и DD1.3 переключаются. Спад импульса с выхода элемента DD1.3 дифференцируется цепью C5 R13 в виде импульса длительностью порядка 12 мкс. Данный импульс через инвертор DD1.4 и транзистор VT4 включает симистор VS1. Переключателем SA1 можно регулировать длительность разрядки конденсатора C4. То есть изменять момент включения симистора VS1 и эффективное напряжение на нагрузке. Принципиальная схема

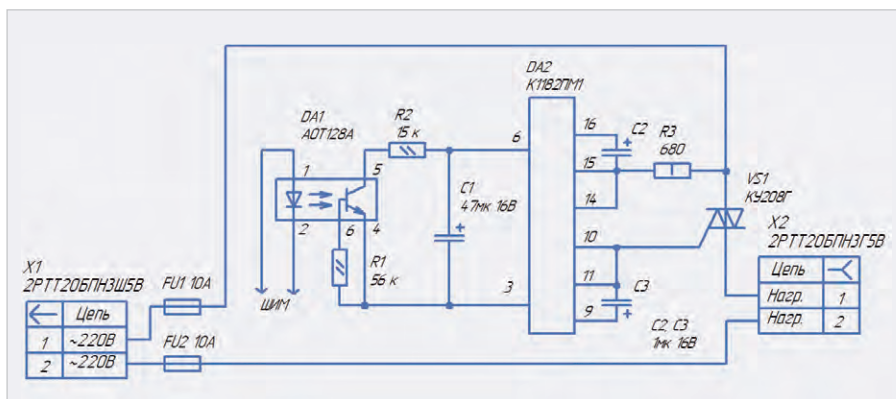


Рис. 8. Принципиальная схема фазового регулятора на базе K1182ПМ1 и симистора КУ208Г

Рис. 9. Внешний вид фазового регулятора PR-1500

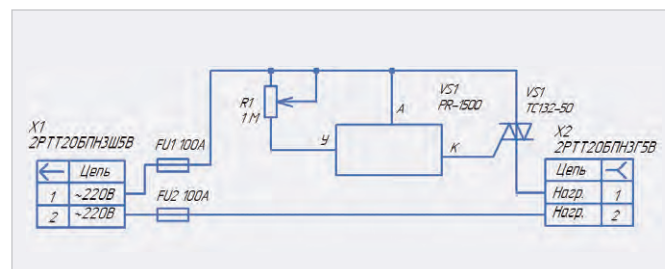
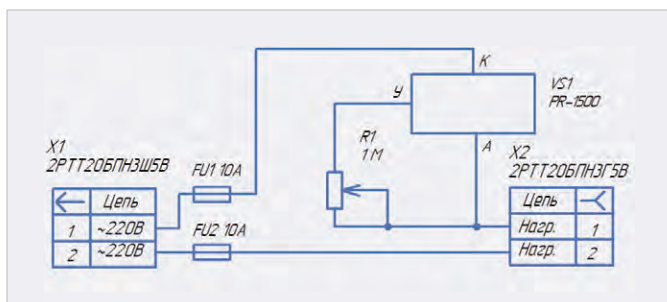


Рис. 10. Принципиальная схема регулятора PR-1500

Рис. 11. Принципиальная схема регулятора на базе PR-1500 и симистора TC132-50

Таблица 1. Предельно допустимые значения электрических параметров для K1182ПМ

№	Наименование параметра	Норма, не менее	Норма, не более
1	Напряжение сети, В	80	276
2	Ток нагрузки, А для Power DIP-(12+4) и DIP-8 для SO-8	–	1,2 0,3
3	Ток потребления, мА	–	5
4	Мощность нагрузки, Вт для Power DIP-(12+4) и DIP-8 для SO-8	–	150 40
5	Частота сети, Гц	40	70
6	Рассеиваемая мощность, Вт, при T <sub>выв</sub> = 90°C для Power DIP-(12+4) T <sub>кр</sub> = 70°C для Power DIP-(12+4) для DIP-8 для SO-8	–	4 1 0,6 0,5
7	Температура окружающей среды, °C	–40	70
8	Температура хранения, °C	–55	150
9	Допустимое значение статического электричества, В	–	500

фазового регулятора с применением динистора в цепи управления симистора приведена на рис. 6.

Данный фазовый регулятор функционирует следующим образом. В каждой полуволне сетевого напряжения заряжается конденсатор C1. Как только значение напряжения на нём достигнет напряжения пробоя динистора VD1, он пробивается. Пробой динистора – это его штатный режим (если, конечно, при этом не превышен

его максимально допустимый ток). При этом динистор VD1 откроется и подаст напряжение на управляющий электрод симистора VS1. Он откроется и подключит нагрузку к сетевому напряжению. Время заряда конденсатора C1 относительно начала полуволны сетевого напряжения определяется RC-цепью (конденсатор C1 и резисторы R1, R2). Данная схема позволяет регулировать мощность в нагрузке практически от нуля до 100%. Конденсатор

C1 типа K73-17, 400 В; резистор R1 типа СП-1, 1 Вт.

Микросхема K1182ПМ1 – готовое решение для реализации фазового регулирования. Её внешний вид в корпусе Power DIP-(12+4) приведён на рис. 7.

В настоящее время на рынке данная микросхема представлена в следующих корпусах: Power DIP-(12+4), DIP-8 и SO-8. Данная микросхема широко применяется для плавного включения и выключения ламп накаливания или регулировки их свечения, а также для регулировки скорости вращения электродвигателей (мощностью до 150 Вт) и управления силовыми элементами (тиристорами и симисторами). Количество подключаемых внешних элементов, необходимых для функционирования микросхемы в составе фазового регулятора, сравнительно небольшое. Предельно допустимые значения электрических параметров для K1182ПМ приведены в табл. 1.

Микросхема может применяться для регулировки мощности в нагрузке до 150 Вт. Для управления более мощной нагрузкой в принципиальную схему регулятора необходимо ввести мощный симистор. На рис. 8 приведена принципиальная схема фазового регулятора на базе микросхемы K1182ПМ1 и симистора КУ208Г.

В данном случае к регулятору может быть подключена нагрузка мощностью до 1 кВт. Конечно, симистор нужно установить на радиатор с соответствующим теплоотводом. В схеме реализованы функции дистанционного регулирования ШИМ-сигналом и плавного включения/выключения подключаемой нагрузки. Процесс включения будет происходить следующим образом. При выключении транзисторной оптопары DA1 конденсатор C1 будет плавно заряжаться от некоторого минимального напряжения до максимального. При этом микросхема K1182ПМ1 обеспечивает плавное нарастание тока в симисторе, а значит, и в нагрузке. Время плавного включения регулируется изменением ёмкости C1 и составляет от десятых долей секунд (для защиты лампы от перегорания) до нескольких секунд (визуальное восприятие плавности). Процесс плавного выключения выглядит так. При включении транзисторной оптопары DA1 конденсатор C1 будет разряжаться с постоянной времени, определяемой разницей между постоянной времени разряда конденсатора C1 через резистор R2 и постоянной времени заряда вытекающим током входа управляемого преобразователя (встроен в K1182ПМ1), что для визуального восприятия плавности может составлять несколько секунд. То есть время включения подбирают изменением ёмкости конденсатора C1 в пределах от 47 мкФ до 220 мкФ. А время выключения устанавливают подборкой резистора R1 в пределах от 0 кОм до 15 кОм.

К фазовому регулятору PR-1500 можно подключить нагрузку с номинальной мощностью до 1500 Вт. Его внешний вид приведён на рис. 9. Основные технические характеристики фазового регулятора PR-1500 приведены в табл. 2.

При работе на нагрузку мощностью 1500 Вт регулятор мощности PR-1500 должен быть установлен на радиатор с эффективной площадью рассеивания порядка 150 см<sup>2</sup>. На рис. 10 приведена принципиальная схема регулятора PR-1500.

Для регулирования более мощной нагрузки в схему регулятора на базе PR-1500 целесообразно ввести тиристор или симистор. На рис. 11 приведена принципиальная схема фазового регулятора на базе PR-1500 и симистора ТС132-50.

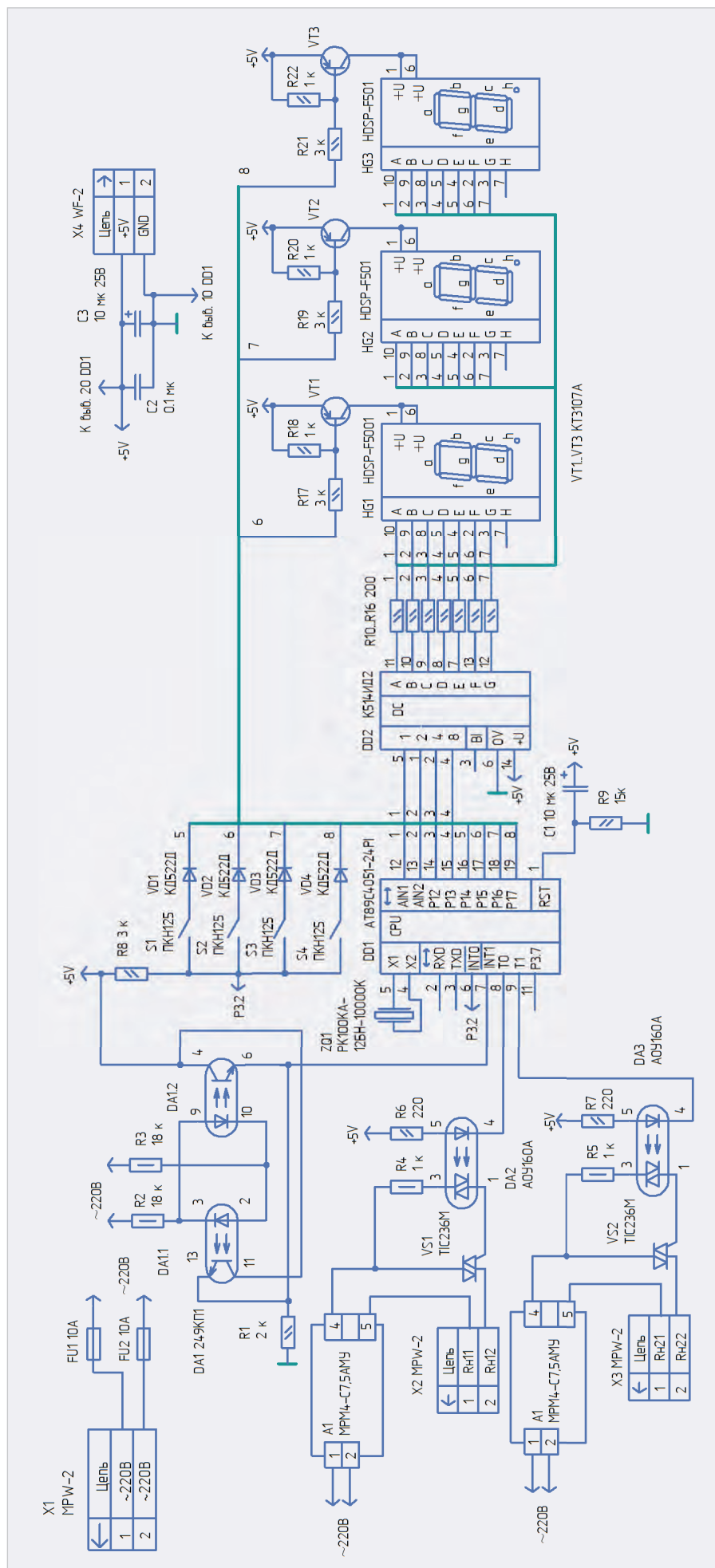


Рис. 12. Принципиальная схема двухканального фазового регулятора мощности

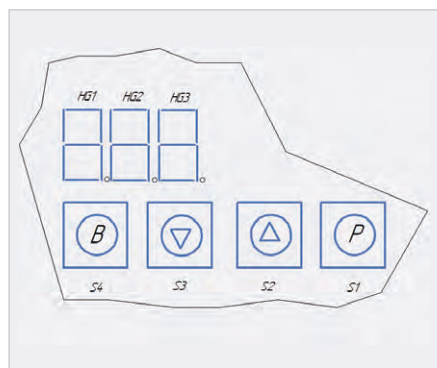


Рис. 13. Интерфейс управления устройства

Таблица 2. Основные технические характеристики фазового регулятора PR-1500

№	Наименование параметра	Значение
1	Номинальное напряжение сети, В	220
2	Частота сети, Гц	50
3	Максимальная мощность в нагрузке, Вт	1500
4	Действующее значение тока анода	7 А (при 80°C) 2 А (при 100°C)
5	Диапазон регулирования мощности, %	от 0 до 97
6	Падение напряжения в открытом состоянии (при $I = 8$ А), В	1,75
7	Диапазон рабочих температур корпуса, °С	-40...100
8	Вес, не более, г	15

Понятно, что в данном случае предельное значение тока в нагрузке определяется максимальным значением тока симистора. Для симистора ТС132-50 это значение равно 50 А, то есть к регулятору можно подключить нагрузку мощностью порядка 11 кВт. Симистор должен быть установлен на радиатор с соответствующим теплоотводом.

## Фазовое регулирование с применением микроконтроллеров

Применение микроконтроллеров в схемах управления фазовых регуляторов позволяет реализовать более функциональный интерфейс управления в устройстве. Принципиальная схема двухканального фазового регулятора мощности (далее – устройство) приведена на рис. 12, интерфейс управления приведён на рис. 13.

Устройство разработано на базе микроконтроллера фирмы ATMEL AT89C4051-24PI. Два независимых регулятора мощности (канал № 1,

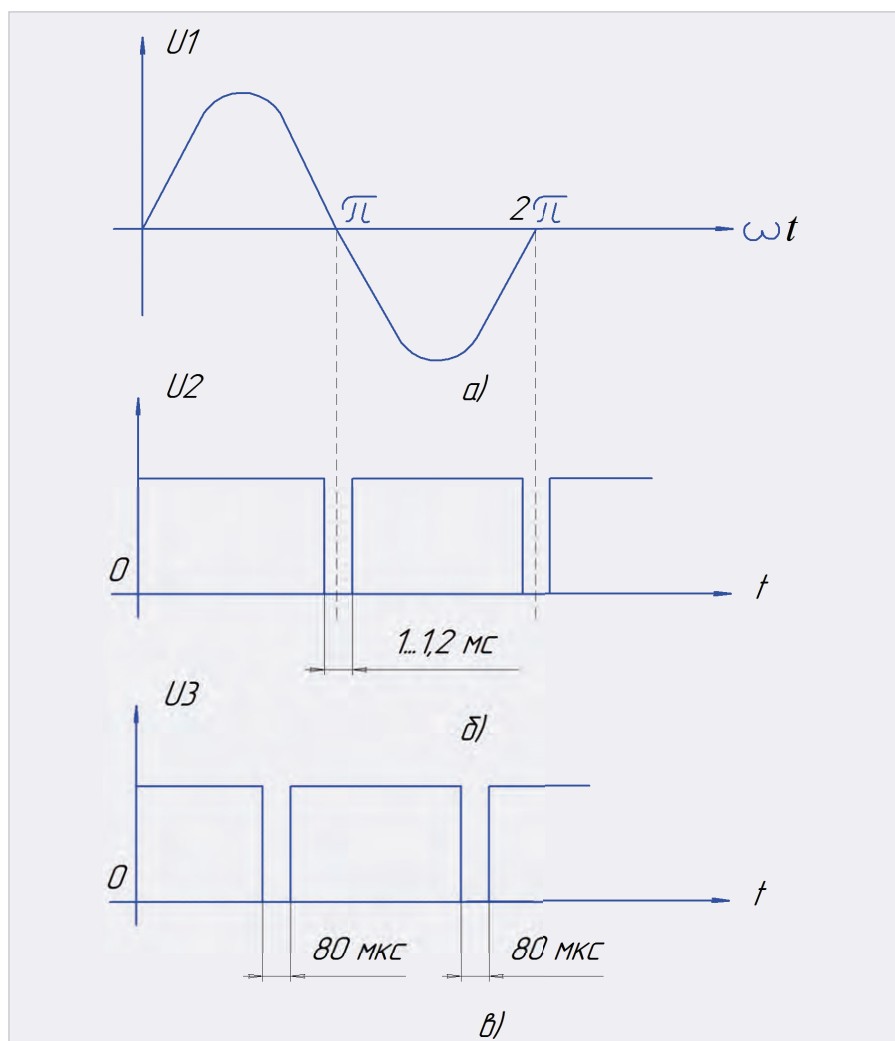


Рис. 14. Временные диаграммы работы канала № 1

канал № 2) собраны соответственно на симисторах VS1 и VS2. Схематика, алгоритм работы у каналов № 1 и № 2 – совершенно одинаковые.

Регулирование мощности осуществляется фазоимпульсным управлением данных симисторов. Диапазон регулирования выходной мощности каждого канала задаётся в относительных единицах от 0 до 99. В интерфейс управления (рис. 13) входят клавиатура (кнопки S1...S4) и блок индикации из трёх цифровых семисегментных индикаторов HG1...HG3.

В устройстве два режима работы: «регулятор 1» и «регулятор 2». Управление осуществляется с помощью клавиатуры, кнопки которой (по схеме S1...S4) имеют следующее назначение:

- S1 (P) – выбор режима работы устройства в замкнутом цикле («регулятор 1», «регулятор 2»). После подачи питания устройство сразу переходит в режим «регулятор 1», каждое нажатие данной кнопки переводит устройство в следующий режим;

- S2 (▲) – увеличение значения подключаемой мощности регуляторов в режимах «регулятор 1», «регулятор 2», нажатие на данную кнопку увеличивает на единицу индицируемое значение в вышеуказанных режимах;
- S3 (▼) – уменьшение значения выходной мощности регуляторов в режимах «регулятор 1», «регулятор 2», каждое нажатие на данную кнопку уменьшает на единицу индицируемое значение в вышеуказанных режимах;
- S4 (B) – отключение от сети нагрузок, подключаемых к соединителям X2, X3, независимо от текущего значения, индицируемого на индикаторах.

В любом режиме работы устройства каждая кнопка выполняет только одну предназначенную ей функцию. Разряды индикации интерфейса имеют следующее назначение (справа налево по рис. 13):

- 1-й разряд (индикатор HG3) отображает младший разряд задаваемого



Рис. 15. Фотография светильника устройства с заданным относительным значением –25 для канала № 1



Рис. 16. Фотография светильника устройства с заданным относительным значением –90 для канала № 1

значения подключаемой мощности регуляторов в режимах «**регулятор 1**» и «**регулятор 2**»;

- 2-й разряд (индикатор HG2) отображает старший разряд задаваемого значения подключаемой мощности регуляторов в режимах «**регулятор 1**» и «**регулятор 2**»;
- 3-й разряд (индикатор HG1) отображает текущий режим работы устройства: если устройство работает в режиме «**регулятор 1**» – отображается цифра «2»; **регулятор 2**» – отображается цифра «3».

После подачи питания устройство переходит в режим «**регулятор 1**» (на индикаторе HG1 индицируется «1»).

Для задания нужного значения в каком-либо канале необходимо кнопкой S1 (P) выбрать канал регулирования и кнопками S2 (▲), S3 (▼) установить требуемое значение. При нажатии на кнопку S4 (B) нагрузки, подключённые к устройству, отключаются от сети. При этом на выводах 8 и 9 микроконтроллера DD1 устанавливается сигнал уровня лог. 1.

Рассмотрим основные функциональные узлы принципиальной схемы устройства. Основой устройства служит микроконтроллер DD1, рабочая частота которого задаётся генератором с внешним резонатором ZQ1 на 10 МГц. На микросхеме DA1 собран датчик сетевого напряжения. Он отслеживает моменты перехода сетевого напряжения через нуль. Выходное напряжение датчика с резистора R1 поступает на вывод 7 микроконтрол-

лера DD1. Канал регулирования мощности № 1 собран на симисторе VS1 и оптроне DA2. Канал управляется с вывода 8 микроконтроллера DD1. Нагрузка подключается к соединителю X2. Канал регулирования мощности № 2 собран на симисторе VS2 и оптроне DA3. Канал управляется с вывода 9 микроконтроллера. Нагрузка подключается к соединителю X3. Для уменьшения уровня помех, создаваемых регуляторами, они включены в сеть через сетевые фильтры A1 и A2. Динамическая индикация собрана на микросхеме DD2; транзисторах VT1...VT3; цифровых семисегментных индикаторах HG1...HG3. Резисторы R10...R16 ограничивают ток через светодиоды индикаторов. Цифровая часть принципиальной схемы устройства гальванически развязана от сети.

Программное обеспечение микроконтроллера обеспечивает реализацию фазоимпульсного управления симисторного регулятора мощности. В цикле в подпрограмме обработки прерывания таймера TF0 через каждые 80 мкс микроконтроллер опрашивает состояние вывода 7. Прерывания от таймера TF0 обеспечивают функционирование динамической индикации, а также работу клавиатуры. Алгоритм работы фазового регулятора рассмотрим на примере канала № 1. Временные диаграммы, поясняющие его работу, приведены на рис 14.

В каждом полупериоде сетевого напряжения (рис. 14а) микроконтроллер запускающим импульсом с выво-

да 8 длительностью 80 мкс (рис. 14в) включает симистор VS1 через оптрон DA1. Значение мощности в нагрузке, подключённой к соединителю X2, зависит от того, как долго симистор будет включён в течение каждого полупериода сетевого напряжения. Для того чтобы значение подключаемой мощности в нагрузке возрастало с увеличением значения задаваемой мощности на индикаторе устройства, а также для получения дискретности регулирования 1% необходимо, чтобы импульс включения симистора смещался с шагом 100 мкс с момента прохождения сетевого напряжения через нуль, справа налево по рис. 14в, при увеличении на единицу значения задаваемой мощности на индикаторе устройства.

Запускающий импульс подаётся с некоторой задержкой с момента прохождения сетевого напряжения через «нуль». Моменту перехода соответствует лог. 0 на выводе 7 микроконтроллера DD1 (рис. 14б). Время задержки определяется числом на индикаторе устройства в режиме «**регулятор 1**», которое может принимать значение от 0 до 99. Подпрограмма преобразует данное двухразрядное двоично-десятичное число в однобайтовое двоичное. Это число загружается в счётчик (регистр R7), который реализует временную задержку. Как уже упоминалось выше, микроконтроллер опрашивает каждые 80 мкс выход датчика сети. В момент прохождения сетевого напряжения через нуль и происходит запуск счётчика. При изменении кнопкой индицируемого на индикаторе числа в режиме «**регулятор 1**» изменяется время задержки включения управляющего импульса на включения симистора VS1. То есть меняется момент включения симистора в каждом полупериоде сетевого напряжения и эффективное напряжение на нагрузке, подключённой к соединителю X2. Аналогичным образом работает канал регулирования мощности № 2, регулирующий мощность в нагрузке, подключённой к соединителю X3 устройства. Угол регулирования симистора в зависимости от тока нагрузки будет неодинаковым. Например, реально в устройстве диапазон регулирования лампочки накаливания мощностью 100 Вт по индикатору составляет от 18 до 97. То есть можно задать 79 уровней яркости светового излучения.

В устройстве использованы резисторы C2-33H-0.125, подойдут любые другие с такой же мощностью рассеивания и погрешностью 5%. Конденсаторы C1, C3 – K50-35. Конденсатор C2 – K10-17. Он устанавливается между цепью +5V микроконтроллера DD1 и общим проводником.

Индикатор HG1 – HDSP-F001 красного цвета, индикаторы HG2, HG3 – HDSP-F501 зелёного цвета. Элементы R9 и C1 при подаче напряжения питания +5V осуществляют системный аппаратный сброс микроконтроллера DD1. Ток через каждый канал регулирования мощности ограничен предельно допустимым током 7,5А через сетевые фильтры МРМ4-С7,5АМУ. При небольших нагрузках, а также если требования по уровню помех не очень высокие, сетевые фильтры можно исключить из схемы. Нагрузки подключаются к устройству через соединители (вилки) X2, X5 типа МРW-2 (ответная часть – розетки МНУ-2). Сетевое напряжение поступает на устройство через соединитель X1 типа МРW-2. Питающее напряжение +5 В поступа-

ет на плату устройства через соединитель X4 типа WF-2 (ответная часть розетка НУ-2).

Если номинальная мощность нагрузки в канале регулирования превышает 100 Вт, симистор лучше установить на радиатор с соответствующим теплоотводом. Симистор TIC236M, допустимый ток которого 12 А, позволяет управлять нагрузкой до 1,5 кВт. Фотография светильника устройства с заданным относительным значением –25 для канала № 1 приведена на рис. 15.

Фотография лампы светильника с заданным относительным значением –90 для канала № 1 приведена на рис. 16.

В устройстве нет никаких настроек и регулировок. Если монтаж выполнен правильно, оно начинает работать сразу после подачи на него напряжения питания. При проверке каналов регулирования мощности первое включение лучше сделать при небольшой нагрузке в каждом канале регулирования мощности, например, с лампой накаливания мощностью 20...40 Вт.

## Заключение

Современные фазовые регуляторы могут менять мощность в подключаемой нагрузке в достаточно широком диапазоне. Их отличительная особенность – сохранение фазового угла при колебаниях сетевого напряжения, плавное регулирование при малых углах проводимости. Существенная проблема при работе фазовых регуляторов – сравнительно высокий уровень помех, отдаваемых в сеть. Она решается установкой сетевых фильтров. И хотя в настоящее время лампы накаливания (яркость которых можно менять фазовым регулятором) уже не «в тренде», но исполнительных устройств, нагрузок, где нужно регулировать мощность, предостаточно. С помощью фазовых регуляторов можно регулировать:

- частоту вращения коллекторного электродвигателя переменного тока (электроинструмент, пылесосы, электромиксеры и т.п.);
- мощность в электронагревательных приборах (паяльники, ТЭНы, обогреватели теплиц и помещений и т.п.).





РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

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

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



Реклама

# Современные системы управления электроприводов: структура и конструкция. Часть 1

Максим Сергеев, к. т. н. (smumail@yandex.ru)

Статья посвящена системам управления электроприводов, которые в настоящее время являются основным средством приведения в движение рабочих машин и других технических устройств. Приводятся основные сведения об электроприводах и их системах управления, предназначенных для управления преобразователем электрической энергии и электродвигателем – главными составными частями электропривода. Рассматриваются различные варианты структуры и конструкции систем управления электроприводов. Приводится описание универсального микроконтроллерного блока управления БУПЧ, который является основой систем управления преобразователями частоты для электроприводов большой и сверхбольшой мощности концерна «Русэлпром».

## Введение

С объектами, приводимыми в движение электрическими двигателями (электродвигателями), мы постоянно сталкиваемся не только в промышленности и на транспорте, но и в бытовой сфере. В нашу жизнь прочно вошли такие устройства с электродвигателями, как стиральная машина, вентилятор, лифт, кондиционер, кофемолка, пылесос и др. В промышленности электродвигатели приводят в движение станки, грузоподъемные механизмы, компрессоры, конвейеры, лебедки и т.д. Можно с уверенностью сказать, что в настоящее время основным средством приведения в движение рабочих машин и других технических устройств является электродвигатель, и основным типом привода является электрический привод или, сокращённо, электропривод.

Растёт количество фирм-производителей регулируемых электроприводов, расширяются объём производства и номенклатура полупроводниковой преобразовательной техники для электроприводов, улучшаются её массогабаритные и энергетические характеристики, повышаются электромагнитная совместимость, надёжность, качество функционирования и сервисные возможности электропривода. Интенсивному развитию этого направления способствуют значительные успехи в совершенствова-

нии силовых полупроводниковых приборов и интегральных схем, развитие цифровых информационных технологий и систем микроконтроллерного управления.

Совместные усилия специалистов различного профиля привели к созданию специализированных микроконтроллеров, предназначенных для применения в электроприводах. Микроконтроллеры стали адаптированными для управления электродвигателями за счёт интеграции на кристалле центрального процессора и специальных периферийных устройств, предназначенных для его сопряжения с преобразователем электрической энергии и электродвигателем. Специализированные микроконтроллеры для применения в электроприводах получили общепринятое название Motor Control (управление двигателями) [1, 9, 17].

## Общие сведения об электроприводах и их системах управления

Электроприводом (ЭП) называется управляемая электромеханическая система, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую и обратно с целью приведения в движение исполнительного органа (ИО) рабочей машины, а также для управления этим процессом. Рабочая машина – устройство, которое использует механическую энергию для преобразования формы, свойств,

состояния и положения объектов труда. Структурная схема ЭП приведена на рис. 1.

Любой ЭП состоит из двух частей (каналов): силового (голубой и зелёный цвета, широкие линии на рис. 1) и информационного (красный и жёлтый цвета, тонкие линии на рис. 1). По первому каналу осуществляется передача преобразуемой энергии, по второму каналу – управление потоком энергии, а также сбор и обработка информации о состоянии ЭП [7, 8].

Силовой канал ЭП состоит из двух частей: электрической (голубой цвет на рис. 1) и механической (зелёный цвет на рис. 1), которые имеют связующее звено – электромеханический преобразователь (ЭМП).

ЭМП – электротехническое устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в механическую или механической энергии в электрическую. Основным видом ЭМП являются электродвигатели (ЭД), которые по роду тока можно разделить на ЭД постоянного и переменного тока. ЭД переменного тока подразделяются в основном на асинхронные (АД) и синхронные (СД). Если в ЭП применяется ЭД постоянного тока, то он называется ЭП постоянного тока, а если ЭД переменного тока – ЭП переменного тока.

В электрическую часть силового канала ЭП входят следующие два устройства:

- СПУ – силовое преобразовательное устройство (преобразователь электрической энергии);
- ЭД.

В двигательном режиме работы они преобразуют электрическую энергию, поступающую из источника электрической энергии (ИЭЭ), в механическую энергию на валу ЭД. В генераторном режиме работы (например, при рекуперативном торможении) они преобразуют механическую энергию в электрическую, которая поступает обратно в ИЭЭ. В качестве источника электрической энергии используется электри-

ческая сеть или накопитель электрической энергии.

СПУ – электротехническое устройство, предназначенное для преобразования параметров электрической энергии (род тока, напряжение, частота, число фаз), основой которого являются полупроводниковые приборы: транзисторы, тиристоры и диоды. СПУ состоит из одного или нескольких полупроводниковых преобразователей и определённого набора электротехнических элементов и устройств: конденсаторов, резисторов, дросселей, трансформаторов, предохранителей, автоматических выключателей и др. Полупроводниковые преобразователи бывают управляемые – транзисторные или тиристорные, и неуправляемые – диодные (выпрямители). В ЭП переменного тока СПУ называется преобразователем частоты (ПЧ), который изменяет частоту и амплитуду (действующее значение) подаваемого на ЭД напряжения [4].

Механическая часть силового канала ЭП состоит из следующих двух устройств:

- подвижная часть ЭД (ротор);
- ПМ – передаточный механизм.

Они передают механическую энергию от ротора ЭД к ИО рабочей машины, который совершает полезную работу.

ПМ – механическое устройство, предназначенное для передачи и преобразования механической энергии от ЭД к ИО рабочей машины. Возможны три варианта передачи и преобразования механической энергии:

- вращательное движение ротора ЭД передаётся к ИО без преобразования;
- вращательное движение ротора ЭД передаётся к ИО с изменением скорости вращения и крутящего момента;
- вращательное движение ротора ЭД преобразуется в поступательное движение ИО.

Информационный канал ЭП состоит из двух частей – системы управления электропривода (СУ ЭП) и следующих устройств сопряжения СУ ЭП с силовым каналом (жёлтый цвет на рис. 1) [2, 3]:

- ДР – драйверы полупроводниковых приборов (транзисторов или тиристоров)<sup>1</sup>;
- ДЭ – датчики электрических параметров (напряжений и токов на входе и выходе СПУ)<sup>1</sup>;

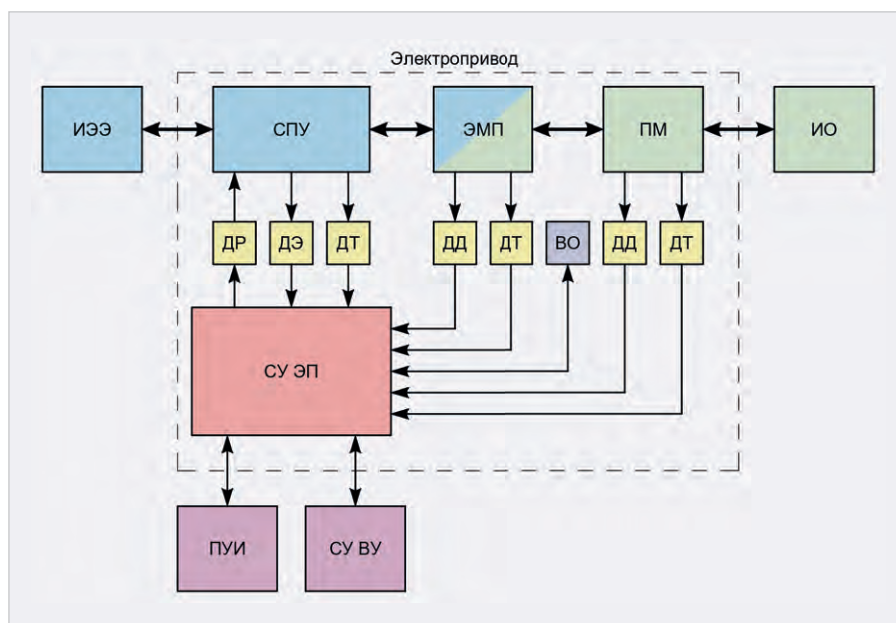


Рис. 1. Структурная схема ЭП

● ДД – датчики параметров движения (угла поворота, скорости вращения, углового ускорения и крутящего момента ЭД или ИО)<sup>2</sup>;

● ДТ – датчики температуры (полупроводниковых приборов, обмоток и сердечников дросселей и трансформаторов СПУ, обмоток, сердечников и подшипников ЭД, редуктора ПМ). Кроме того, в состав ЭП входит вспомогательное оборудование (ВО) – различные устройства, которые поддерживают работу основного оборудования ЭП: системы охлаждения СПУ и ЭД, коммутационные и защитные устройства и т.д.

СУ ЭП предназначена для управления СПУ и ЭД с целью обеспечения заданного движения ИО и состоит из следующих трёх частей (подсистем):

- измерительно-информационная, обеспечивающая приём и обработку сигналов от датчиков параметров движения, электрических параметров и температуры;
- информационно-управляющая, которая реализует определённые алгоритмы управления, контроля и защиты СПУ и ЭД, и формирует сигналы управления транзисторами (тиристорами) и другими устройствами, входящими в состав ЭП;
- информационно-коммуникационная, осуществляющая информационное взаимодействие с пультом управления и индикации (ПУИ), системой управления более высокого уровня (СУ ВУ) и другими внешними по отношению к ЭП устройствами<sup>3</sup>.

Драйверы полупроводниковых приборов – устройства, которые предназначены для управления, контроля и защиты транзисторов (тиристоров). Драйверы обеспечивают гальваническую изоляцию и усиление по напряжению и току маломощных сигналов управления, поступающих из СУ ЭП, в более мощные сигналы, необходимые для включения/выключения транзисторов (тиристоров), а также их выключение при возникновении аварийных ситуаций. Драйверы транзисторов (тиристоров) можно рассматривать не только как устройства сопряжения с силовым каналом ЭП, но и как СУ этими полупроводниковыми приборами.

ПУИ предназначен для ручного управления и контроля ЭП: включения/выключения, задания режимов работы и параметров ЭП с помощью

<sup>1</sup> Драйверы транзисторов (тиристоров) и датчики электрических параметров входят в состав СПУ.

<sup>2</sup> В случае поступательного движения ИО вместо датчиков угловых перемещения, скорости, ускорения и крутящего момента ИО применяются датчики линейных перемещения, скорости, ускорения и тягового усилия ИО.

<sup>3</sup> СУ ЭП может осуществлять информационное взаимодействие не только с ПУИ и СУ ВУ, но и с другими внешними устройствами, например, главным распределительным устройством (ГРУ, ГРЩ) и рабочей машиной, которые не показаны на рис. 1.

органов управления (кнопок, переключателей и/или сенсорного жидкокристаллического дисплея), а также наблюдения за состоянием ЭП с помощью приборов индикации (ламп и/или жидкокристаллического дисплея). ПУИ может входить в состав СПУ (встроенный ПУИ) или располагаться на расстоянии от него (выносной ПУИ).

СУ ВУ предназначена для управления технологическим процессом, рабочей машиной как его частью и, соответственно, ЭП, который приводит в движение ИО рабочей машины. СУ ВУ называется СУ электроприводом – она является внешней для ЭП системой и осуществляет автоматическое управление и контроль ЭП: включение/выключение, задание режимов работы и параметров движения ЭП, контроль и наблюдение за его состоянием (мониторинг).

Таким образом, ЭП осуществляет энергетическое взаимодействие с источником электрической энергии и рабочей машиной, информационное взаимодействие с СУ ВУ, а также имеет возможность взаимодействовать с человеком-оператором через ПУИ, когда требуется вручную изменить какие-либо параметры ЭП или наблюдать за его состоянием.

СУ ЭП, как правило, входит в состав СПУ, и вместе они представляют собой регулируемый источник питания (ИП), который изменяет параметры источника электрической энергии (напряжение и частота) в соответствии с определённым алгоритмом. Поэтому можно считать, что в ЭП постоянного тока ЭД подключается к регулируемому ИП, который изменяет среднее (действующее) значение напряжения, подаваемого на него, а в ЭП переменного тока регулируемый ИП изменяет частоту и амплитуду (действующее значение) подаваемого на ЭД напряжения.

По мощности ЭП можно условно разделить на следующие группы [11]:

- малой мощности (до 10 кВт);
- средней мощности (10–250 кВт);
- большой мощности (250–1000 кВт);
- сверхбольшой мощности (более 1 МВт).

В настоящее время ЭП с ЭД переменного тока и полупроводниковыми ПЧ занял лидирующее положение среди других типов регулируемого ЭП в промышленности. Расширение рынка ПЧ обусловлено растущей промыш-

ленной автоматизацией и совершенствованием подходов к повышению энергоэффективности. Среди ЭД переменного тока самыми распространёнными являются АД. Это связано с простотой конструкции, высокой надёжностью и экономичностью АД. Хотя достаточно часто в промышленности применяются и СД.

В качестве полупроводниковых ПЧ наиболее широкое применение получили ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока на основе двух полупроводниковых преобразователей: управляемых (АВН) или неуправляемых (НВ) выпрямителей напряжения и автономных инверторов напряжения (АИН). АВН и АИН реализованы в основном на базе IGBT-транзисторов, а НВ – на базе диодов. АВН являются намного более перспективными, чем НВ, так как могут обеспечить заданный коэффициент мощности, меньше искажают электрическую сеть и позволяют рекуперировать накопленную при движении ИО кинетическую энергию обратно в источник электрической энергии при торможении ИО (если имеется техническая возможность рекуперации) [6].

Учитывая изложенное в предыдущих двух пунктах, в данной статье рассматриваются ЭП переменного тока с ПЧ на основе АВН и АИН, в которых применяются IGBT-транзисторы. Несмотря на то, что главное внимание в данной статье уделено ЭП переменного тока, основные принципы построения СУ ЭП, особенности их структуры и конструкции, рассмотренные в ней, могут быть использованы при проектировании и ЭП постоянного тока.

ЭП, в зависимости от типа регулируемого параметра движения, бывают позиционными, скоростными и моментными. Система автоматического регулирования (САР) стабилизирует или изменяет по заданному закону положение (угол поворота или линейное перемещение), скорость (скорость вращения или линейную скорость) или момент (крутящий момент или тяговое усилие) ИО. В ЭП применяются в основном системы подчинённого регулирования параметров движения, когда САР имеет несколько контуров, каждый из которых имеет свой регулятор и подчиняется вышестоящему контуру. Например, позиционные СУ ЭП имеют три контура регулирования: положения, скорости

и тока (момента). Контур регулирования положения является внешним и самым медленным, а контур регулирования тока (момента) – внутренним и самым быстрым [13].

Современные СУ ЭП построены в основном на базе микроконтроллеров (МК) и, как любая микроконтроллерная система управления (МКСУ), состоят из аппаратной и программной частей: аппаратного обеспечения и программного обеспечения (ПО). Разработка ПО для СУ ЭП является сложной технической задачей, и её решение основано на применении специальных алгоритмов управления ЭП. Поэтому, кроме аппаратного и программного обеспечения, для СУ ЭП имеет важное значение алгоритмическое обеспечение, которое можно рассматривать как составную часть ПО или как отдельную часть, входящую в состав СУ ЭП.

Современные СУ ЭП имеют полное цифровое управление (без аналоговых регуляторов), их аппаратное обеспечение реализовано либо на базе высокопроизводительных МК с RISC-архитектурой (например, ARM и RISC-V), либо на базе специализированных (для управления ЭП) цифровых сигнальных контроллеров (ЦСК или, в зарубежной литературе, DSC) [2, 3, 10].

В современных СУ ЭП внутренние контуры регулирования (тока или момента) всё чаще выполняют на основе программируемых логических микросхем (ПЛИС или, в зарубежной литературе, FPGA и CPLD), которые имеют максимальное быстродействие за счёт параллельного выполнения вычислений, или специализированных для этого применения микросхем (СИС или, в зарубежной литературе, ASIC). ПЛИС являются полностью цифровыми устройствами и не имеют встроенного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), поэтому к ним необходимо подключать внешний АЦП. СИС могут иметь встроенный АЦП, но чаще им тоже требуется подключение внешнего АЦП [12].

Учитывая изложенное в предыдущих двух пунктах, современные СУ ЭП правильнее называть не микроконтроллерными, а цифровыми, так как они могут быть построены на базе не только МК или ЦСК, но также ПЛИС или СИС. Поэтому цифровые СУ ЭП – более широкое понятие, а микрокон-

троллерные – более узкое, являющееся частью цифровых.

В настоящее время для автоматического управления промышленным оборудованием и технологическими процессами широко применяются специальные электронные устройства – программируемые логические контроллеры (ПЛК). В СУ ЭП они используются для выполнения вспомогательных задач: приёма и обработки сигналов от дискретных и аналоговых датчиков, управления исполнительными устройствами, реализации интерфейсов для связи с другими устройствами управления [5].

Данная статья написана автором на основе изучения соответствующей технической литературы, современных российских и зарубежных СУ ЭП, а также его личного опыта разработки СУ ЭП и СУ ИП.

## Структура современных систем управления электроприводов переменного тока

В настоящее время существует большое разнообразие СУ ЭП переменного тока, которые применяются в различных областях промышленности. Но если проанализировать их состав, схемотехнику, конструкцию и выполняемые функции, то можно прийти к выводу, что они имеют в основном распределённо-централизованную структуру и состоят из следующих частей (рис. 2):

- ЛСУ – локальные СУ, осуществляющие управление, контроль и защиту одного из транзисторных преобразователей (ТП), входящих в состав ПЧ (например, АВН или АИН);
- ЦСУ – центральная (главная) СУ, которая управляет ЛСУ и координирует их работу, осуществляет информационное взаимодействие с ПУИ, СУ ВУ и другими внешними устройствами, приём и обработку сигналов от датчиков (температуры ПЧ и ЭД, давления и расхода охлаждающей жидкости, концевых выключателей и т.д.), контроль и управление системами охлаждения и антиконденсатного подогрева ПЧ и ЭД посредством дискретных и аналоговых сигналов, цифровых и аналоговых интерфейсов. Кроме того, ЦСУ управляет входным автоматическим выключателем, устройством предварительного заряда конденсаторов в звене постоянного тока и выполняет другие вспомогательные функции. ЦСУ принимает из ПУИ или СУ ВУ команды управления, заданные режимы работы и значения параметров движения ЭП и передаёт обратно измеренные значения параметров движения, а также информацию о состоянии ЭП для его контроля и мониторинга. ЦСУ содержит внешний, самый медленный, контур регулирования – положения<sup>1</sup> (в позиционных ЭП) и контур регулирования скорости<sup>2</sup>.
- ПЛК – программируемый логический контроллер, который расширяет возможности ЦСУ по дискретным и аналоговым входам/выходам, цифровым и аналоговым интерфейсам, увеличивая их количество, если оно недостаточно для управления ЭП.

ЛСУ принимает и обрабатывает сигналы от датчиков напряжения, тока и температуры транзисторного преобразователя, формирует по определённому алгоритму сигналы управления IGBT-транзисторами для регулирова-

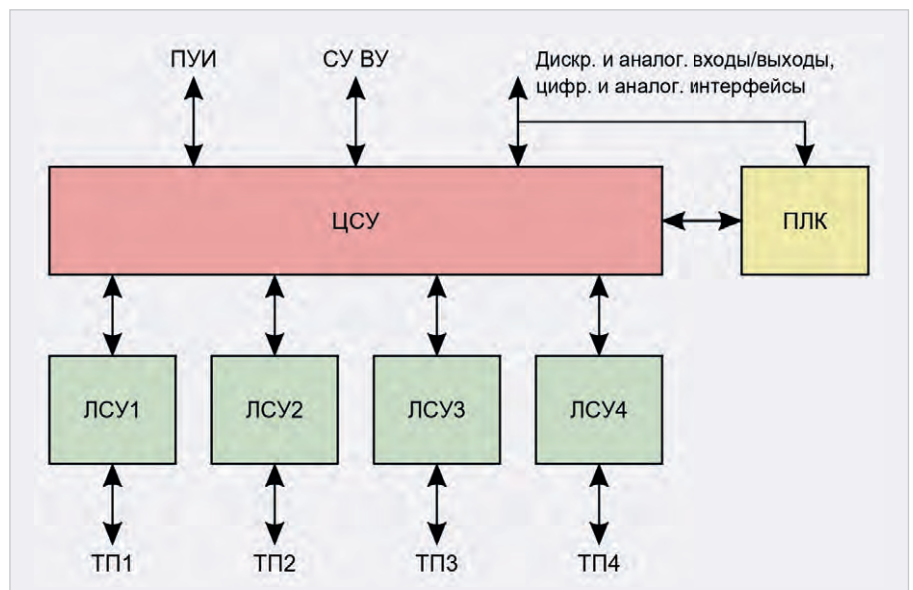


Рис. 2. Структурная схема распределённо-централизованной СУ ЭП

ния параметров движения и электрических параметров в соответствии с заданными значениями, поступающими из ЦСУ, а также выключает транзисторный преобразователь при возникновении аварийных ситуаций в ЭП. ЛСУ обязательно имеет внутренний, самый быстрый, контур регулирования – тока (момента).

ЦСУ осуществляет информационное взаимодействие с ЛСУ, ПУИ, СУ ВУ и другими внешними устройствами, приём и обработку сигналов от датчиков (температуры ПЧ и ЭД, давления и расхода охлаждающей жидкости, концевых выключателей и т.д.), контроль и управление системами охлаждения и антиконденсатного подогрева ПЧ и ЭД посредством дискретных и аналоговых сигналов, цифровых и аналоговых интерфейсов. Кроме того, ЦСУ управляет входным автоматическим выключателем, устройством предварительного заряда конденсаторов в звене постоянного тока и выполняет другие вспомогательные функции. ЦСУ принимает из ПУИ или СУ ВУ команды управления, заданные режимы работы и значения параметров движения ЭП и передаёт обратно измеренные значения параметров движения, а также информацию о состоянии ЭП для его контроля и мониторинга. ЦСУ содержит внешний, самый медленный, контур регулирования – положения<sup>1</sup> (в позиционных ЭП) и контур регулирования скорости<sup>2</sup>.

Для увеличения количества входов/выходов и интерфейсов вместо ПЛК можно применять специальные платы расширения, например, плату рас-

ширения дискретных входов/выходов, плату расширения аналоговых входов/выходов и т.д. Однако применение ПЛК является более универсальным подходом, так как в настоящее время рынок ПЛК предлагает большой выбор таких устройств, а использование плат расширения требует их разработки и изготовления, что может оказаться экономически невыгодным из-за увеличения их стоимости и срока поставки по сравнению с ПЛК.

Управление ЭП является сложной задачей – многоуровневой и иерархической, которую осуществляет комплекс управления ЭП, имеющий как минимум четыре уровня. Нижний его уровень образуют драйверы IGBT-транзисторов, более высокий уровень занимают ЛСУ, далее следует ЦСУ и на самом высоком уровне находится СУ ВУ. Однако в сложных технологических процессах верхний уровень управления ЭП может иметь несколько подуровней, и тогда СУ ВУ сама может являться подсистемой для СУ ещё более высокого уровня [8].

ЛСУ и ЦСУ являются обязательными частями СУ ЭП. Каждый ПЧ имеет несколько ЛСУ (как минимум, две) – их количество соответствует количеству транзисторных преобразова-

<sup>1</sup> В некоторых ЭП контур регулирования положения реализован в СУ ВУ, которая передаёт в ЦСУ заданное значение угловой (линейной) скорости ИО.

<sup>2</sup> Контур регулирования скорости может быть реализован либо в ЦСУ, либо в ЛСУ – в зависимости от структуры и схемотехники СУ ЭП.

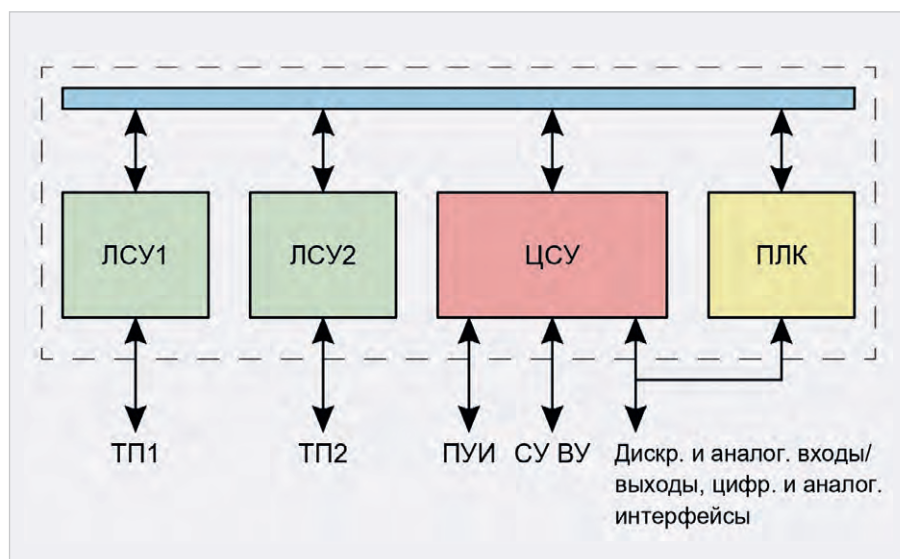


Рис. 3. Структурная схема централизованной СУ ЭП (ВБУ ЭП)

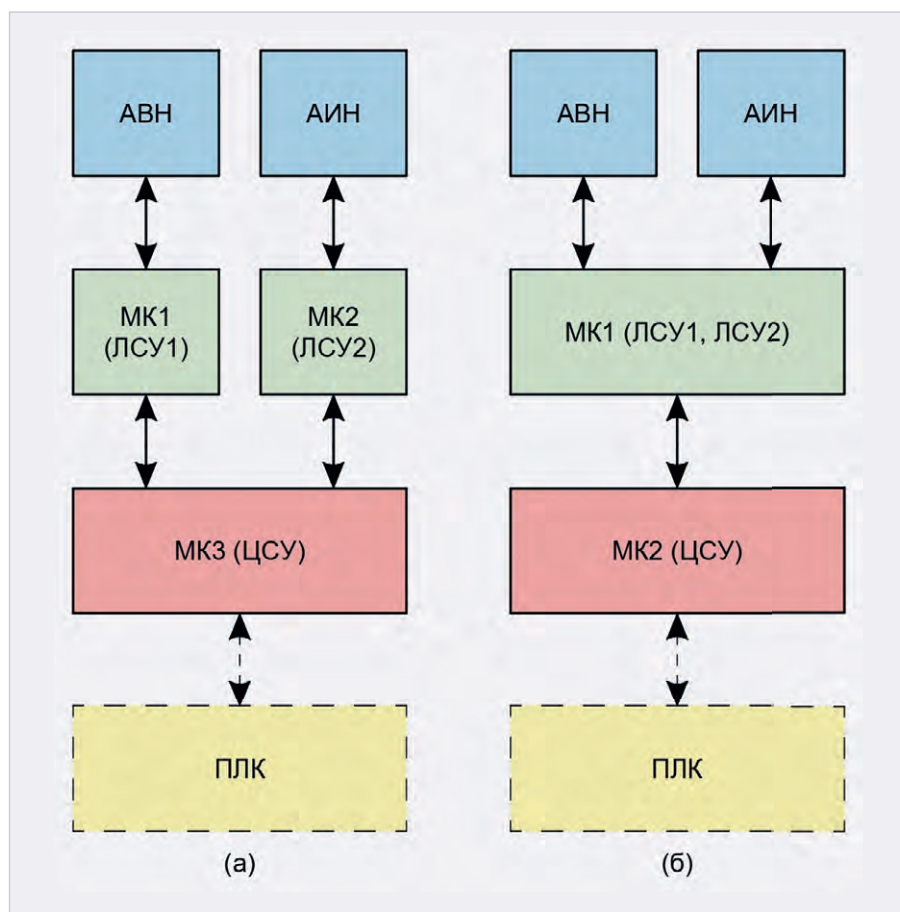


Рис. 4. Структура СУ ЭП – вариант 1

лей. Например, ПЧ для обычного АД имеет две ЛСУ: одна управляет АВН, а другая – АИН. А ПЧ для двухобмоточного АД имеет четыре ЛСУ: две из них управляют двумя АВН, а две другие – двумя АИН.

ПЛК является необязательной частью СУ ЭП: он используется в тех случаях, когда ЦСУ имеет недостаточное количество дискретных и анало-

говых входов/выходов, цифровых и аналоговых интерфейсов, и их необходимо увеличить. Однако в случае применения высокопроизводительного ПЛК, который сможет выполнять функции ЦСУ, он позволяет значительно упростить структуру СУ ЭП – она будет состоять только из ЛСУ и ПЛК.

Если повысить степень интеграции СУ ЭП и объединить ЛСУ, ЦСУ и ПЛК в

одном корпусе, то получится устройство, которое можно назвать высокоинтегрированным блоком управления ЭП (ВБУ ЭП), выполняющим все функции СУ ЭП (рис. 3) [14].

ВБУ ЭП имеет централизованную структуру с внутренним распределением функций, состоящую из нескольких частей – СУ (контроллеров). Каждый контроллер выполняет определённую функцию, например, контроллер ТП1 (ЛСУ1), контроллер ТП2 (ЛСУ2), главный контроллер (ЦСУ) и ПЛК.

Преимуществами ВБУ ЭП являются повышение помехозащищённости, снижение массогабаритных характеристик и стоимости за счёт расположения всех его частей в одном корпусе, а недостатками – высокая трудоёмкость разработки такого устройства, небольшое количество ЛСУ, входящих в его состав (из-за габаритных ограничений), а также более высокая сложность разработки и тестирования ПО.

Для реализации современных алгоритмов управления ЭП переменного тока, требующих быстродействующих контуров регулирования тока (момента), ЛСУ должны иметь высокое быстродействие, поэтому их можно реализовать либо на базе высокопроизводительных МК с RISC-архитектурой или специализированных ЦСК, либо на базе ПЛИС или СИС. Для ЦСУ быстродействие не является очень важным, поэтому они могут быть реализованы на базе МК с RISC-архитектурой, имеющих среднюю производительность, но достаточное количество входов/выходов и интерфейсов.

СУ ЭП как объект проектирования включает в себя следующие пять составляющих:

- структура;
- элементная база;
- схемотехника;
- конструкция;
- ПО.

**Примечание:** СУ обычно являются составной частью ПЧ, поэтому приведённые выше составляющие СУ ЭП как объекта проектирования нужно рассматривать с учётом структуры, элементной базы, схемотехники и конструкции ПЧ.

Процесс проектирования СУ ЭП включает все эти составляющие, между ними существует определённая взаимосвязь (в большей или меньшей степени), но начинается он всегда с создания структуры на основании заданных технических требо-

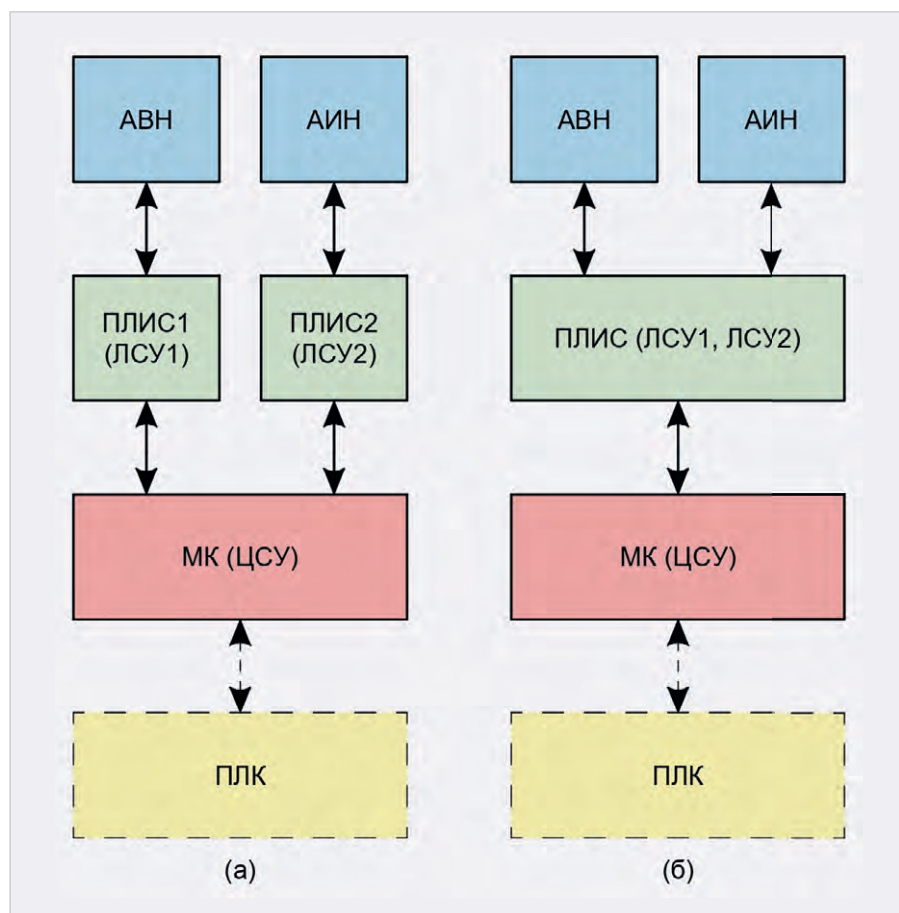


Рис. 5. Структура СУ ЭП – вариант 2

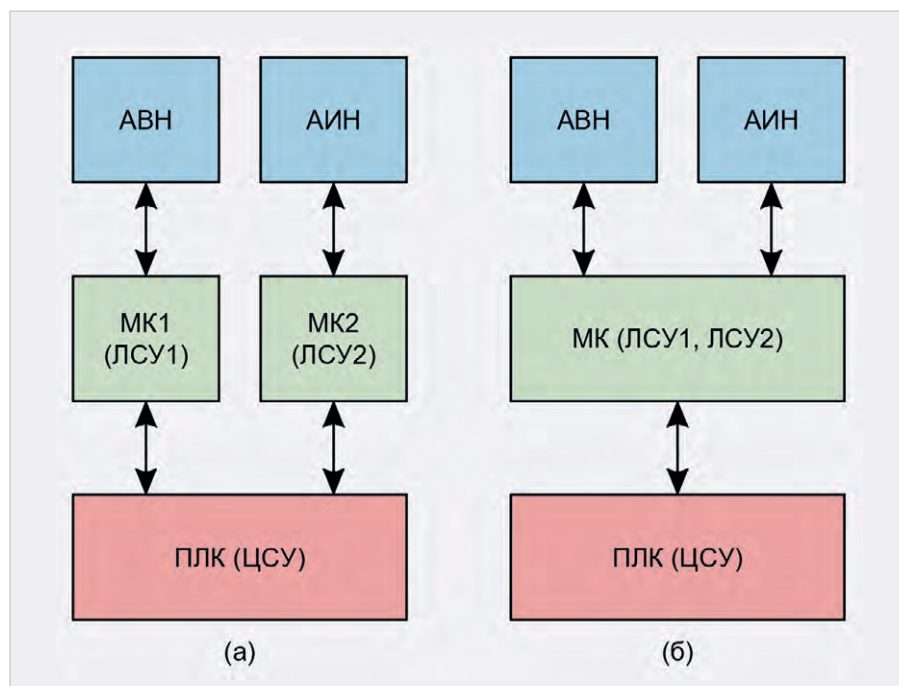


Рис. 6. Структура СУ ЭП – вариант 3

ваний, с учётом элементной базы, схемотехники и конструкции, которые в начале определяются приблизительно, а затем (в процессе проектирования) уточняются. Несмотря на большое количество вариантов построения СУ ЭП, можно выделить следующие

основные пять вариантов их структуры, отличающихся элементной базой, схемотехникой и конструкцией (рис. 4–7):

- ЛСУ и ЦСУ реализованы на базе двух или трёх МК: МК1 управляет АВН, МК2 – АИН, а МК3 выполняет функ-

ции ЦСУ (рис. 4а), или МК1 управляет АВН и АИН, а МК2 выполняет функции ЦСУ (рис. 4б);

- ЛСУ реализованы на базе одной или двух ПЛИС (СИС), а ЦСУ построено на базе МК: ПЛИС1 управляет АВН, ПЛИС2 – АИН, а МК выполняет функции ЦСУ (рис. 5а), или ПЛИС управляет АВН и АИН, а МК выполняет функции ЦСУ (рис. 5б);
- ЛСУ реализованы на базе одного или двух МК, а ЦСУ построено на базе ПЛК: МК1 управляет АВН, МК2 – АИН, а ПЛК выполняет функции ЦСУ (рис. 6а), или МК управляет АВН и АИН, а ПЛК выполняет функции ЦСУ (рис. 6б);
- ЛСУ реализованы на базе одной или двух ПЛИС (СИС), а ЦСУ построено на базе ПЛК: ПЛИС1 управляет АВН, ПЛИС2 – АИН, а ПЛК выполняет функции ЦСУ (рис. 7а), или ПЛИС управляет АВН и АИН, а ПЛК выполняет функции ЦСУ (рис. 7б);
- ЛСУ и ЦСУ реализованы на базе одного МК, который управляет АВН, АИН и выполняет функции ЦСУ (рис. 7в).

**Примечание:** в вариантах 1, 2 и 5 к ЦСУ может быть подключён ПЛК (пунктирные линии на рис. 4, 5 и 7), который будет расширять её возможности по входам/выходам и интерфейсам. В вариантах 3, 4 ЦСУ реализована на базе ПЛК, поэтому она не имеет ограничений по входам/выходам и интерфейсам.

Приведённые выше варианты структуры СУ ЭП имеют несколько подвариантов, которые отличаются конструкцией, – в зависимости от количества плат, на которых они расположены. Например, в первом и втором вариантах в случае применения трёх МК или двух ПЛИС (СИС) и МК они могут быть расположены на трёх платах (рис. 8а), двух платах (рис. 8б) или одной плате (рис. 8в). При использовании двух МК или одной ПЛИС (СИС) и МК они могут быть расположены на двух платах (рис. 8г) или одной плате (рис. 8д).

В третьем и четвёртом вариантах в случае применения двух МК или двух ПЛИС (СИС) они могут быть расположены на двух платах (рис. 9а) или одной плате (рис. 9б). При использовании одного МК или одной ПЛИС они располагаются на одной плате.

Пятый вариант построения СУ ЭП является одноплатным, и он требует применения высокопроизводительного МК, имеющего достаточное коли-

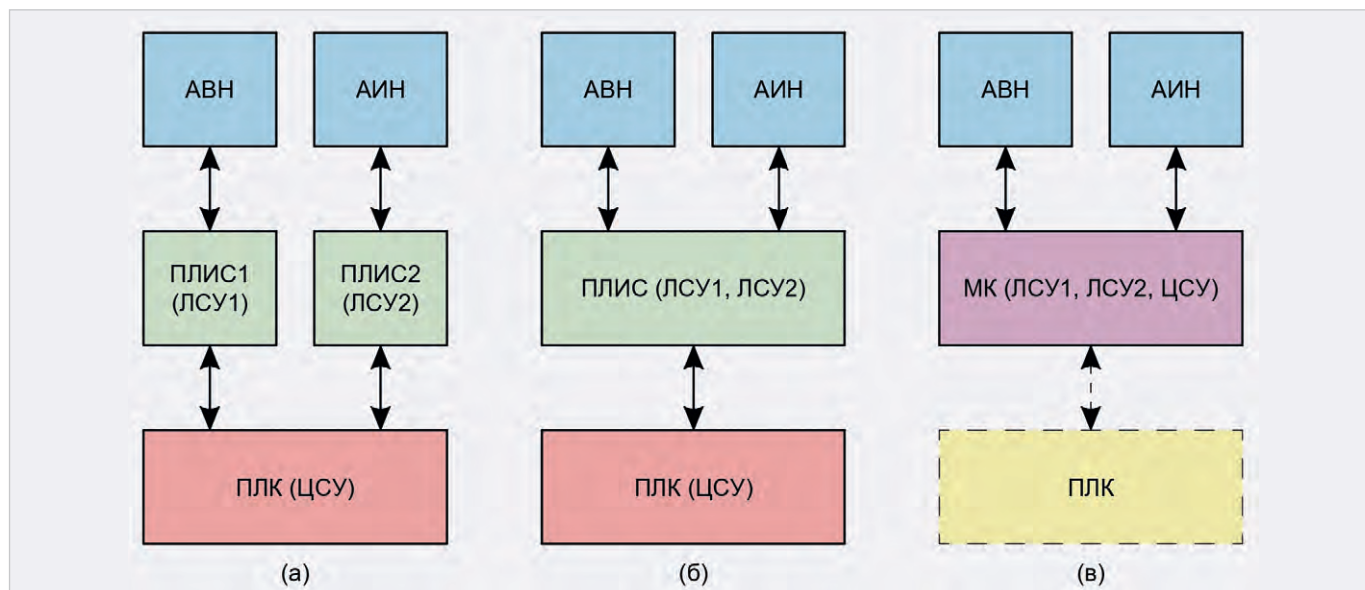


Рис. 7. Структура СУ ЭП – варианты 4, 5

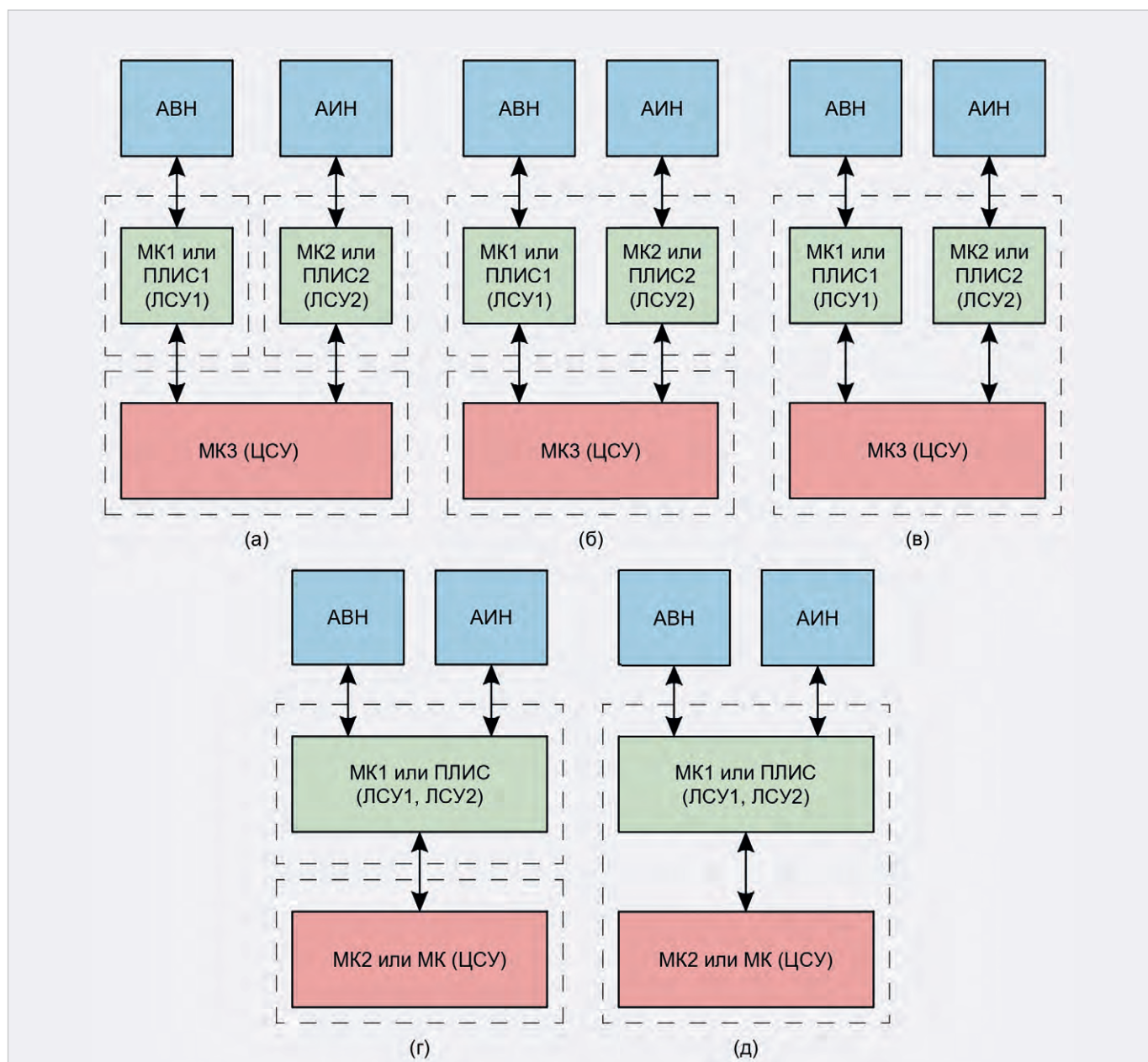


Рис. 8. Структура СУ ЭП – варианты 1, 2 с разным количеством плат

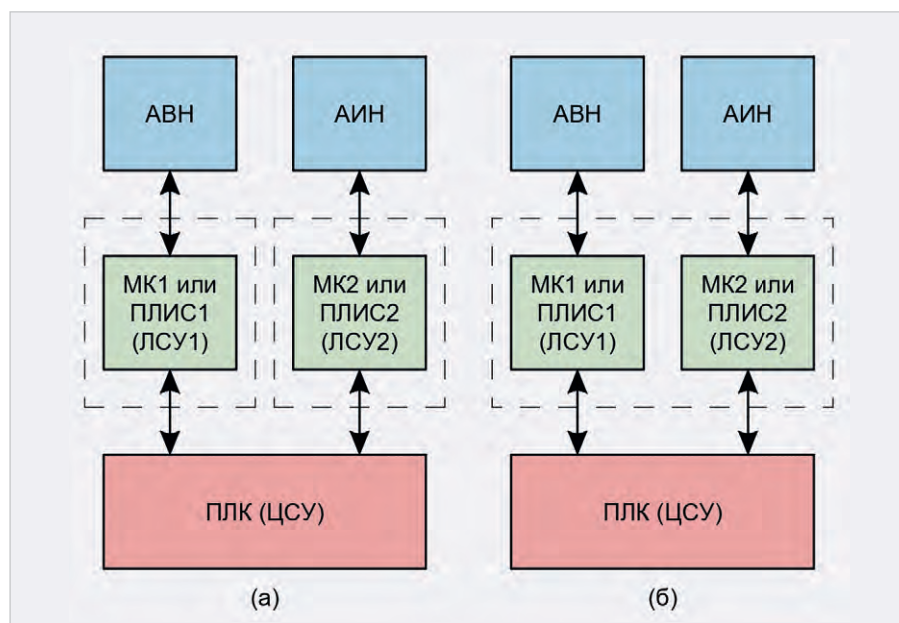


Рис. 9. Структура СУ ЭП – варианты 3, 4 с разным количеством плат

чество периферийных устройств и интерфейсов, необходимых для управления ПЧ и информационного взаимодействия с ПУИ и СУ ВУ.

**Примечание:** на рис. 8, 9 пунктирными линиями показаны платы, на которых расположены ЛСУ и ЦСУ.

Обмен информацией между ЛСУ и ЦСУ осуществляется обычно по последовательному интерфейсу. Хотя, если ЛСУ и ЦСУ расположены на одной плате, для обмена информацией между ними может использоваться и параллельный интерфейс. ЦСУ и ПЛК осуществляют информационное взаимодействие друг с другом по последовательному интерфейсу.

Каждый из приведённых выше вариантов структуры СУ ЭП имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Для каждого проекта желательно создать оптимальную структуру СУ ЭП на основе анализа технических требований к ней с учётом элементной базы, схемотехники и конструкции как СУ, так и ПЧ. Критериями оптимальности СУ ЭП могут быть следующие её характеристики и показатели: массогабаритные характеристики, себестоимость, удельная функциональность<sup>1</sup> и функциональная себестоимость<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Удельная функциональность – отношение количества функций, выполняемых СУ ЭП, к её объёму.

<sup>2</sup> Функциональная себестоимость – отношение количества функций, выполняемых СУ ЭП, к её себестоимости.

## Заключение

Вторая часть статьи будет посвящена конструкции СУ ЭП. В последнее время совершенствованию конструкции ПЧ и СУ, которые ими управляют, уделяется повышенное внимание инженеров. Это происходит благодаря основным тенденциям в силовой электронике и микропроцессорной технике: повышению степени интеграции и функциональности и снижению массогабаритных характеристик.

## Литература

1. Абакумов А.М. Электрический привод. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока: учеб. пособ. / А.М. Абакумов, П.В. Тулупов, Ю.А. Чабанов. Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. 123 с.
2. Анучин А.С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. 373 с.
3. Баховцев И.А. Микропроцессорные системы управления устройствами силовой электроники: структуры и алгоритмы: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 219 с.
4. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. 425 с.
5. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудова-

нием. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 606 с.

6. Ефимов А.А., Шрейнер Р.Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ, 2001. 250 с.
7. Ильинский Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2003. 224 с.
8. Ильинский Н.Ф., Козаченко В.Ф. Общий курс электропривода: учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 544 с.
9. Козаченко В.Ф. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам // Новости о микросхемах. CHIP NEWS. 1999. № 1 (34). С. 2–10.
10. Козаченко В.Ф. Микроконтроллерные системы управления электроприводами: современное состояние и перспективы развития. URL: <http://www.motorcontrol.ru>.
11. Медведев В.А. Конструирование преобразователей: электронное учеб. пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. 159 с.
12. Мелишин В., Овчинников Д. Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
13. Москаленко В.В. Электрический привод: учебник для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 368 с.
14. Сергеев М.Ю. Современное состояние и перспективы развития преобразователей частоты для судовых систем электродвижения // Российская Арктика. 2025. Т. 7. № 2. С. 23–36.
15. Сергеев М., Улитовский Д. БУПЧ – высокоинтегрированный микропроцессорный блок управления для судовых преобразователей частоты // Силовая электроника. 2025. № 2. С. 22–29.
16. Сергеев М., Никулкин К., Максимов А. ТТМ-1000 – высокоинтеллектуальный силовой модуль для судовых преобразователей частоты // Силовая электроника. 2025. № 3. С. 28–35.
17. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург: УРО РАН, 2000. 654 с.

# Система автоматического управления воздушным шлюзом

Олег Вальпа

Приведён проект системы автоматического управления воздушным шлюзом для персонала чистых помещений, разработанный автором статьи на основе современного контроллера.



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

## Введение

В современном мире создано множество производств с технологическими процессами, требующими особой чистоты производственных помещений. К числу подобных производств относятся такие отрасли современной области деятельности человека, как медицина, фармацевтика, микроэлектроника, животноводство, космическая отрасль и т.п.

Проход в чистые помещения и выход из них должен осуществляться через специальные шлюзы для персонала. Основное назначение таких шлюзов заключается в обеспечении защиты от загрязнения чистых помещений. Это производится путём поочерёдного прохождения персонала через небольшое помещение-шлюз, в котором с одежды персонала воздушным потоком удаляются пыль и вредные вещества и утилизируются с помощью фильтров. В некоторых шлюзах происходит помывка персонала водой и переодевание.

Входная и выходная двери шлюза не должны открываться одновременно, чтобы избежать переноса пыли и вредных частиц с помощью воздушного потока.

Для организации таких шлюзов разрабатываются специальные системы

автоматического управления. Пример такой системы управления шлюзом предлагается к рассмотрению в данной статье.

## Проект

Базовым узлом системы управления шлюзом в данном проекте был выбран новый современный контроллер SMH5 компании Segnetics [1]. Данный контроллер имеет достаточные вычислительные ресурсы, 5-дюймовый цветной графический сенсорный дисплей и все необходимые порты для работы шлюза. Кроме того, у контроллера имеются коммуникационные интерфейсы RS-485 и Ethernet, с помощью которых можно легко организовать диспетчеризацию шлюза.

Внешний вид контроллера SMH5 представлен на рис. 1.

Шлюз представляет собой небольшое помещение с двумя дверьми, оснащёнными доводчиками и датчиками состояния двери в виде герконов. Обе двери могут автоматически закрываться и открываться с помощью электромагнитных замков. Возле каждой двери с внешней и внутренней стороны шлюза располагаются индикаторы зелёного и красного цвета, предназначенные для сигнализации персонала о свободном и рабочем режиме шлюза.

за. Внешний вид воздушного шлюза показан на рис. 2.

Исходным свободным состоянием шлюза является отсутствие в нём персонала и закрытые двери. При этом с обеих сторон и внутри шлюза будут светиться все зелёные индикаторы, сигнализируя о его готовности к работе. Электрические замки дверей при этом открыты.

После открытия одной из дверей происходит автоматическое закрытие замка противоположной двери и смена свечения индикаторов закрытой двери на красный цвет. После прохода персонала внутрь шлюза и закрытия двери за собой шлюз готов к выполнению процедуры по очистке одежды путём обдува вентиляторами.

Сама обработка обдувом запускается персоналом с экрана контроллера на время, необходимое для данной процедуры.

После завершения обработки шлюз возвращается в исходное состояние, позволяя тем самым персоналу пройти в следующую дверь, за которой находится чистое помещение.

Обратный переход из чистого помещения наружу через воздушный шлюз выполняется при необходимости аналогичным образом либо без обработки воздушным потоком.



Рис. 1. Внешний вид контроллера SMH5



Рис. 2. Внешний вид воздушного шлюза

### Схема проекта

Схема автоматической системы управления шлюзом разработана на основе одного контроллера SMH5 и нескольких легкодоступных и недорогих электротехнических элементов. Функциональная схема шлюза приведена на рис. 3.

Герконы дверей подключены к первым двум входам DI1 и DI2 контроллера. Ещё один дискретный вход DI5 подключается к замкнутому контакту пожарной сигнализации, обеспечивая тем самым слежение за пожарной системой для экстренного отключения электромагнитных замков дверей

шлюза при возникновении пожара. К трём дискретным выходам DO1-DO3 контроллера подключаются три электромагнитических реле для управления сильноточными электромагнитными замками и вентиляторами воздушного душа. К нормально замкнутым контактам первого и второго реле подключаются зелёные индикаторы, а к нормально разомкнутым контактам реле подключаются параллельно красные индикаторы и замки. Таким образом, в исходном состоянии шлюза будут светиться зелёные индикаторы, а замки и красные индикато-

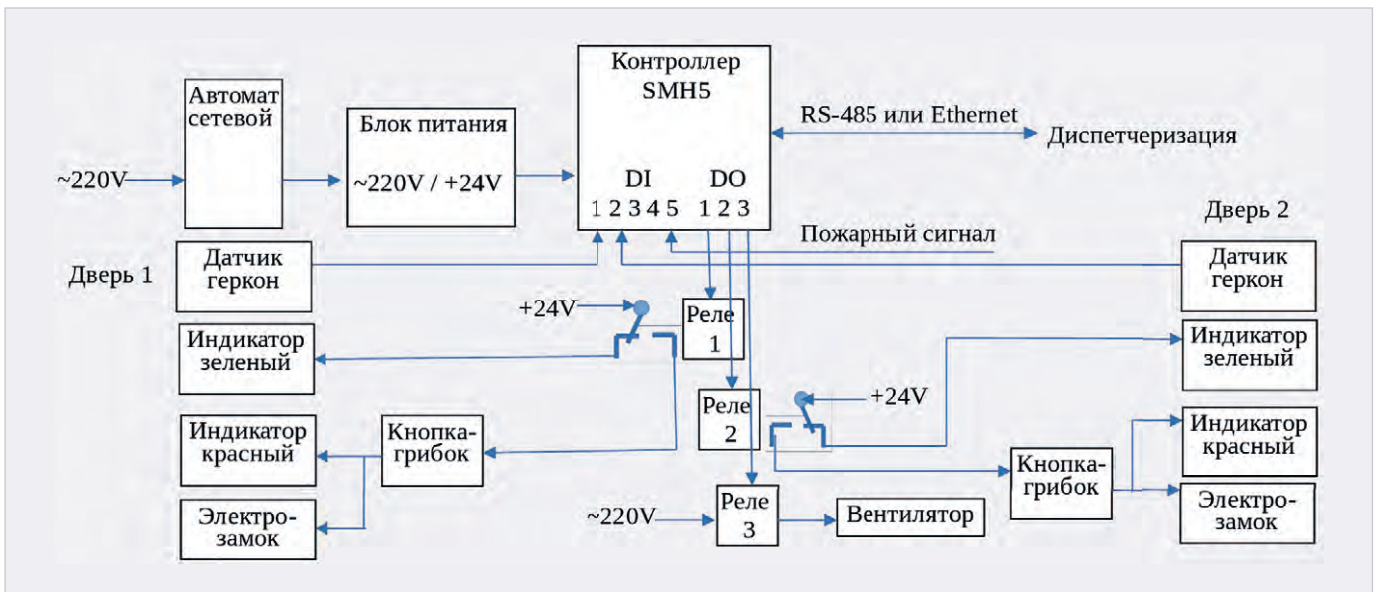


Рис. 3. Функциональная схема шлюза

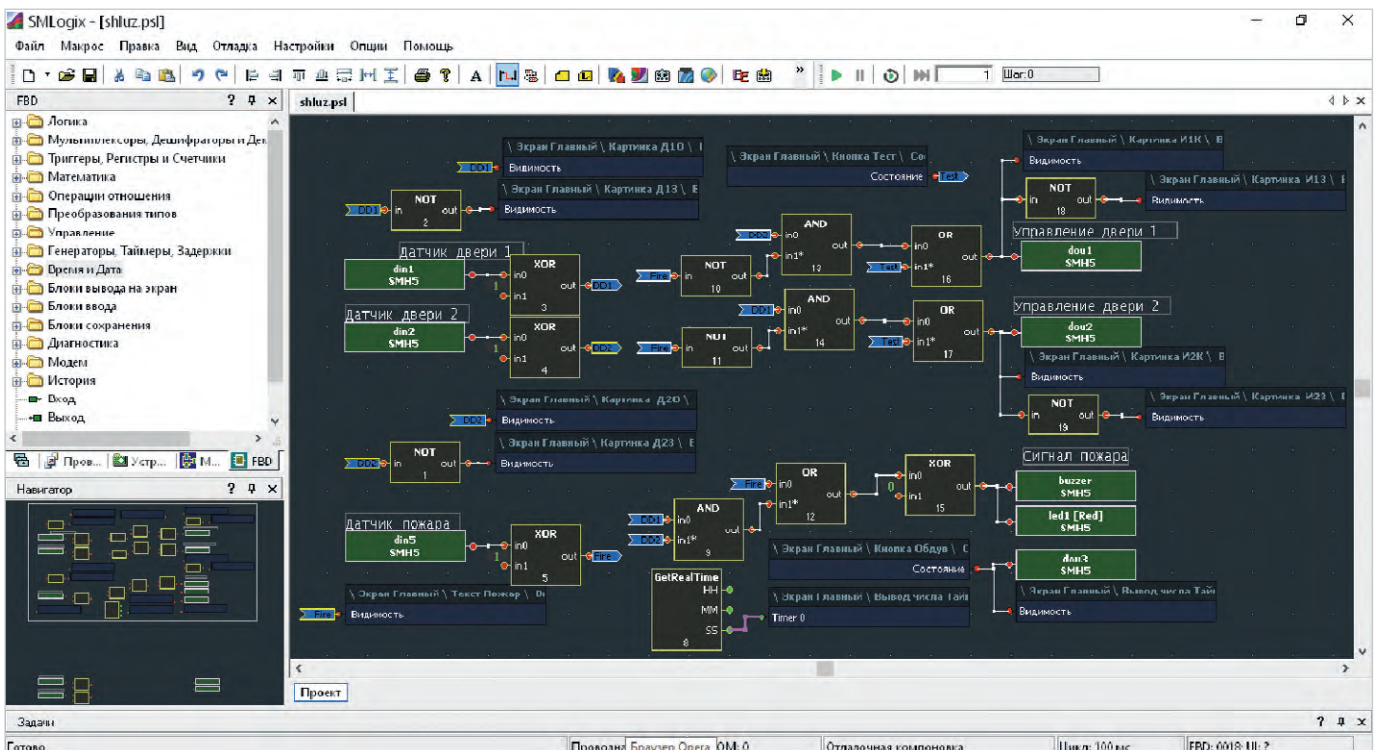


Рис. 4. Окно программы SMLogix



Рис. 5. Интерфейс программы

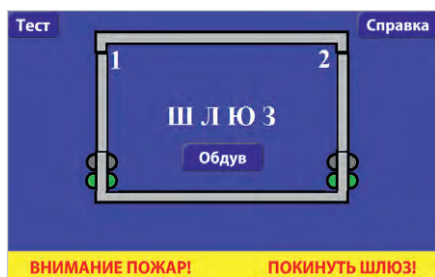


Рис. 6. Главное окно программы

ры будут обесточены. При открытии одной из дверей шлюза программа контроллера обнаружит размыкание соответствующего геркона двери и сформирует сигнал включения замка и красного индикатора для противоположной двери.

Реле вентиляторов воздушного душа включается после нажатия персоналом соответствующей программной кнопки на экране контроллера. При этом программа автоматически закрывает электромагнитные замки обеих дверей с включением красных индикаторов и запустит таймер работы вентиляторов. После истечения необходимого времени обработки вентиляторы отключаются, и замки автоматически откроются контроллером. Таким образом осуществляется полный цикл работы шлюза.

С целью обеспечения принудительной ручной разблокировки замков дверей в схеме дополнительно использованы аварийные размыкающие кнопки-грибки, расположен-

ные у каждой двери. Электрические цепи этих кнопок соединены последовательно с цепью питания электромагнитных замков и красных индикаторов шлюза. В экстренных ситуациях нажатие любой из этих кнопок приводит к отключению электромагнитного замка соответствующей ему двери, и персонал сможет покинуть шлюз.

Контроллер SMH5 располагает внутри шлюза и благодаря своей встраиваемой конструкции легко закрепляется в прямоугольном отверстии одной из стен шлюза.

### Программа проекта

Программа для контроллера написана на языке программирования логических блоков FBD в среде разработки SMLogix [2], свободно распространяемой производителями контроллера. Знакомство с данной средой разработки приведено в источнике [3].

Внешний вид окна программы SMLogix с готовым проектом представлен на рис. 4.

Интерфейс программы разработан с помощью встроенного в среду разработки программного инструмента SMART и представлен на рис. 5.

Данный интерфейс состоит из нескольких окон, на которых располагаются графические элементы, программные органы управления и индикации, а также справочные тексты. Внешний вид главного окна программы представлен на рис. 6.

На этом окне отображается контур шлюза с дверьми и индикаторами, а также размещены программные органы управления и транспарант пожарной сигнализации. При нажатии кнопки «Справка» открывается окно с описанием программы. Кнопка «Тест» предназначена для проверки исправности красных индикаторов и замков. Кнопка «Обдув» позволяет запустить вентиляторы воздушного душа. При открытии любой из дверей шлюза это событие отображается на дисплее контроллера.

### Диспетчеризация

Для обеспечения удалённой диспетчеризации приведённого здесь шлюза в контроллере имеются необходимые интерфейсы. В проекте уже заложены регистры с картой памяти, которые позволяют дистанционно собирать информацию о функционировании шлюза по интерфейсу RS-485 или Ethernet и отображать её на персональном компьютере.

Настройка параметров интерфейсов осуществляется в специальном меню настроек контроллера, которое открывается путём сенсорного сдвига правого края главного экрана влево с помощью скольжения по нему пальцем или стилусом.

Кроме того, можно воспользоваться встроенной в контроллер функцией VNC с заводским паролем «segnetics» и получить на удалённом устройстве



Рис. 7. Внешний вид передаточного окна

дубликат графического дисплея контроллера системы управления шлюзом.

Файл проекта можно загрузить с сайта редакции журнала.

### Заключение

При необходимости можно модернизировать рассмотренный проект, например, дополнив изображение шлюза вентилятором с анимацией вращения. Кроме того, можно дополнить проект журналом событий, возникающих в процессе эксплуатации шлюза.

По аналогии с рассмотренным здесь шлюзом устроены передаточные окна для транспортировки препаратов и

инструмента в чистые помещения. Пример типового передаточного окна представлен на рис. 7.

Рассмотренный здесь проект пригодится в качестве заготовки для создания системы автоматического управления такими передаточными окнами.

### Литература

1. URL: <https://segnetics.com/ru/smh5>.
2. URL: <https://www.segnetics.com/ru/smlogix>.
3. Вальна О. Программирование логических контроллеров // СТА. 2025. № 1. С. 18.



## НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

### Машины с живыми нейронами: учёные создают «нейроботов» нового поколения

Исследователи сделали следующий шаг в развитии биоинженерии, перейдя от имитации живых систем к их прямому созданию. В работе, опубликованной в *Advanced Science*, представлены так называемые «нейроботы» – самоорганизующиеся биологические структуры, включающие функциональные нейронные сети.

#### От ксеноботов к нейроботам

Основой для нового класса биомашин стали разработки команды Майкла Левина из Университета Тафтса. Ранее исследователи представили «ксеноботов»: примитивные живые конструкции из клеток лягушки, способные двигаться, восстанавливаться и даже демонстрировать простейшие формы самовоспроизведения.

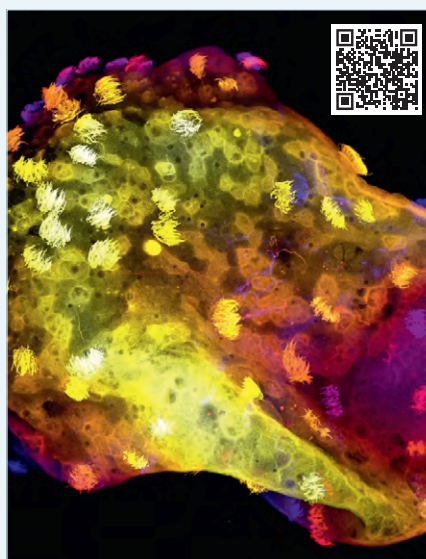
Теперь в эти структуры добавлены нейроны, формирующие элементарную нервную систему. В отличие от ранних версий, поведение которых определялось преимущественно физикой и анатомией, нейроботы демонстрируют признаки внутреннего контроля и координации.

#### Новый уровень биологического управления

Нейронные клетки в составе нейроботов формируют разветвлённые сети, передающие электрохимические сигналы по всему организму. Это позволяет системе интегрировать информацию и динамически изменять поведение.

Эксперименты показали, что такие структуры:

- проводят больше времени в активном исследовании среды;
- демонстрируют сложные траектории движения, включая спиральные и циклические;



- по-разному реагируют на нейроактивные вещества.

По словам исследователей, это свидетельствует о появлении базовых механизмов координации, ранее недоступных для подобных биологических конструкций.

#### Научное и прикладное значение

Разработка нейроботов открывает новые возможности для изучения фундаментальных вопросов биологии – в частности, того, как простые нейронные сети формируют сложное поведение. Как отмечает Карлос Гершенсон из Университет Бингемтона, подобные системы представляют собой уникальный класс «искусственной жизни», созданной из натуральных клеток, но организованной человеком.

С прикладной точки зрения технология может найти применение в:

- регенеративной медицине (точечное восстановление тканей);
- экологическом мониторинге;
- создании биогибридных систем с управляемым поведением.

#### Развитие концепции: антроботы и обучение

Параллельно развивается направление «антроботов» – аналогичных структур, созданных из человеческих клеток. В перспективе исследователи планируют интегрировать в них нейроны, что позволит перенести принципы нейроботов в полностью человеческий биологический контекст.

Как отмечает Джош Бонгард из Университета Вермонта, следующим этапом может стать обучение таких систем – по аналогии с дрессировкой животных – для выполнения заданных функций.

#### Коммерциализация и ограничения

Разработки в области биоботов уже начинают выходить за пределы лабораторий. Стартап *Fauna Systems* рассматривает применение ксеноботов в экологическом мониторинге – например, для обнаружения загрязнений в воде за счёт анализа коллективного поведения клеточных структур.

Однако значительные технические барьеры сохраняются. По оценкам участников рынка, нейроботы остаются на ранней стадии исследований, и ближайшие коммерческие решения будут основаны на более простых, не нейронных системах.

#### Новая парадигма биоинженерии

Появление нейроботов отражает более широкий сдвиг в инженерии: переход от механистических моделей к программируемым биологическим системам. В этом контексте ключевым становится не только создание структуры, но и управление её самоорганизацией.

Как подчёркивает Майкл Левин, такие системы позволяют по-новому взглянуть на фундаментальный вопрос: каким образом форма и функция возникают в живых организмах – даже вне эволюционного или традиционного инженерного дизайна.

# Локальные микроконтроллеры с интерфейсом RS-485

Олег Вальпа

В статье приведено описание применения локальных микроконтроллеров с интерфейсом RS-485, имеющих стандартизованные порты ввода-вывода для создания систем автоматизации.

## Введение

Довольно часто при разработке автоматических систем управления возникает необходимость дополнить управляющий контроллер одним или двумя недостающими портами ввода-вывода. При этом нецелесообразно дополнять контроллер дорогим многопортовым модулем расширения.



Рис. 1. Внешний вид ЛМК5



Рис. 2. Назначение перемычек ЛМК6

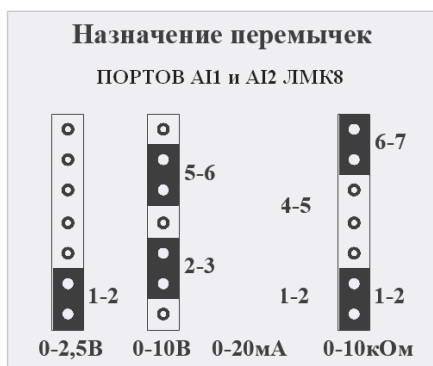


Рис. 3. Назначение перемычек ЛМК8

Кроме того, иногда возникает необходимость добавить в систему управления вынесенный на некоторое расстояние порт ввода-вывода для чтения показаний датчика или коммутации питания агрегата.

В обоих случаях на выручку придёт недорогой локальный контроллер с одним или двумя портами ввода-вывода, подключаемый по полемому интерфейсу RS-485 и обеспечивающий связь на расстоянии до 1200 метров.

Описание линейки подобных локальных микроконтроллеров приведено ниже.

## Локальные микроконтроллеры

Представленная здесь линейка локальных микроконтроллеров имеет в своём наборе четыре типа устройств, отличающихся типом портов ввода-вывода. Для упрощения здесь будут использованы следующие сокращения названий для портов ввода и вывода:



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

AI – аналоговый вход, AO – аналоговый выход, DI – цифровой вход, DO – цифровой выход. Локальные микроконтроллеры, производимые отечественной компанией AMC-МЗМО [3], имеют сокращённые названия ЛМК5, ЛМК6, ЛМК7 и ЛМК8. Все локальные микроконтроллеры конструктивно выполнены в пластиковом корпусе, имеют габаритные размеры 44×47×28 мм, с элементом крепления для установки на DIN-рейку. Внешний вид одного ЛМК приведён на рис. 1.

Все типы ЛМК имеют встроенный интерфейс RS-485 и поддерживают протокол Modbus RTU на скорости от 9600 до 115 200 Бод. Также ЛМК имеют встроенный индикатор жёлтого цвета с обозначением «Передача» для контроля подключения питания и индикации активности обмена данными по интерфейсу RS-485. При подаче питания каждый ЛМК формирует от одной до пяти вспышек индикатора «Передача», которые сигнализируют о скорости связи от 9600 до 115 200 Бод, соответственно.



Рис. 4. Внешний вид контроллера SMH5

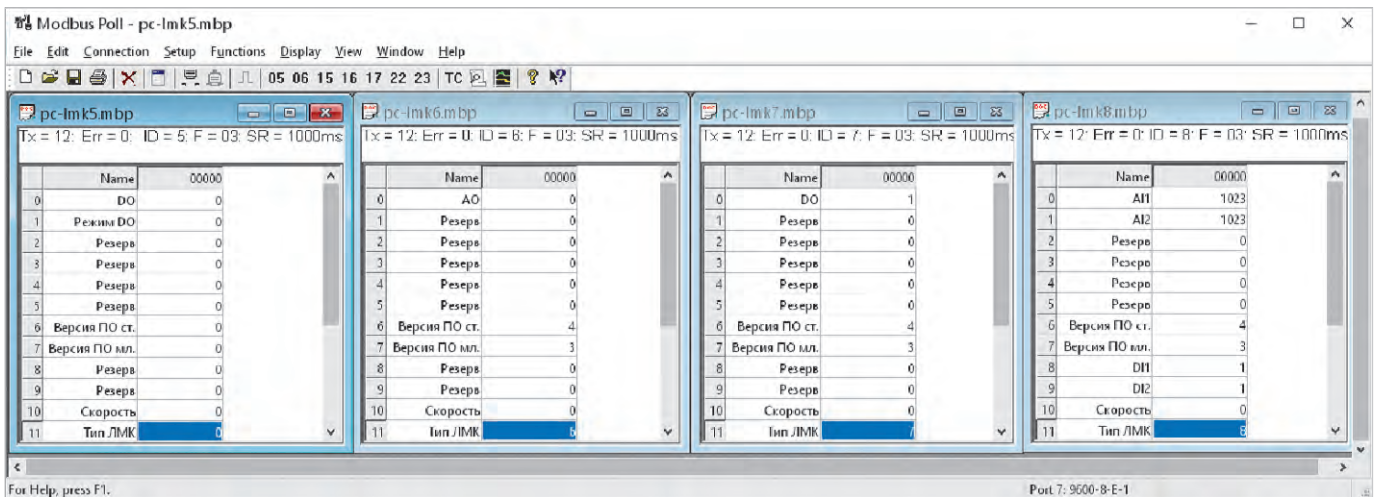


Рис. 5. Окно проверки ЛМК

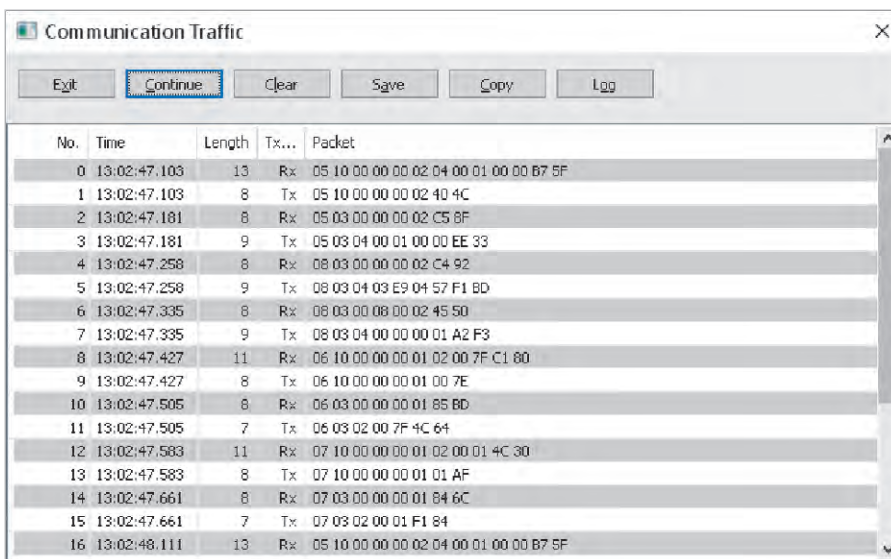


Рис. 6. Окно Communication Traffic

Подключение любого ЛМК к интерфейсу RS-485 и источнику питания производится через один из разъёмов RJ-45. Второй разъём RJ-45 является транзитным и обеспечивает удобное последовательное подключение следующего ЛМК. Для обеспечения связи и питания используется стандартный сетевой кабель UTP, имеющий 4 витые пары проводов. Одна пара используется для подключения сигнальных цепей «А» и «В», а остальные провода используются для подключения источника питания постоянного напряжения +12 вольт. Назначение контактов розетки разъёма RJ-45 ЛМК следующее: 1, 2, 3 – «GND», 4 – «В», 5 – «А», 6, 7, 8 – «+12V».

С противоположной стороны ЛМК подключается порт ввода-вывода через контакты клеммника. В зависи-

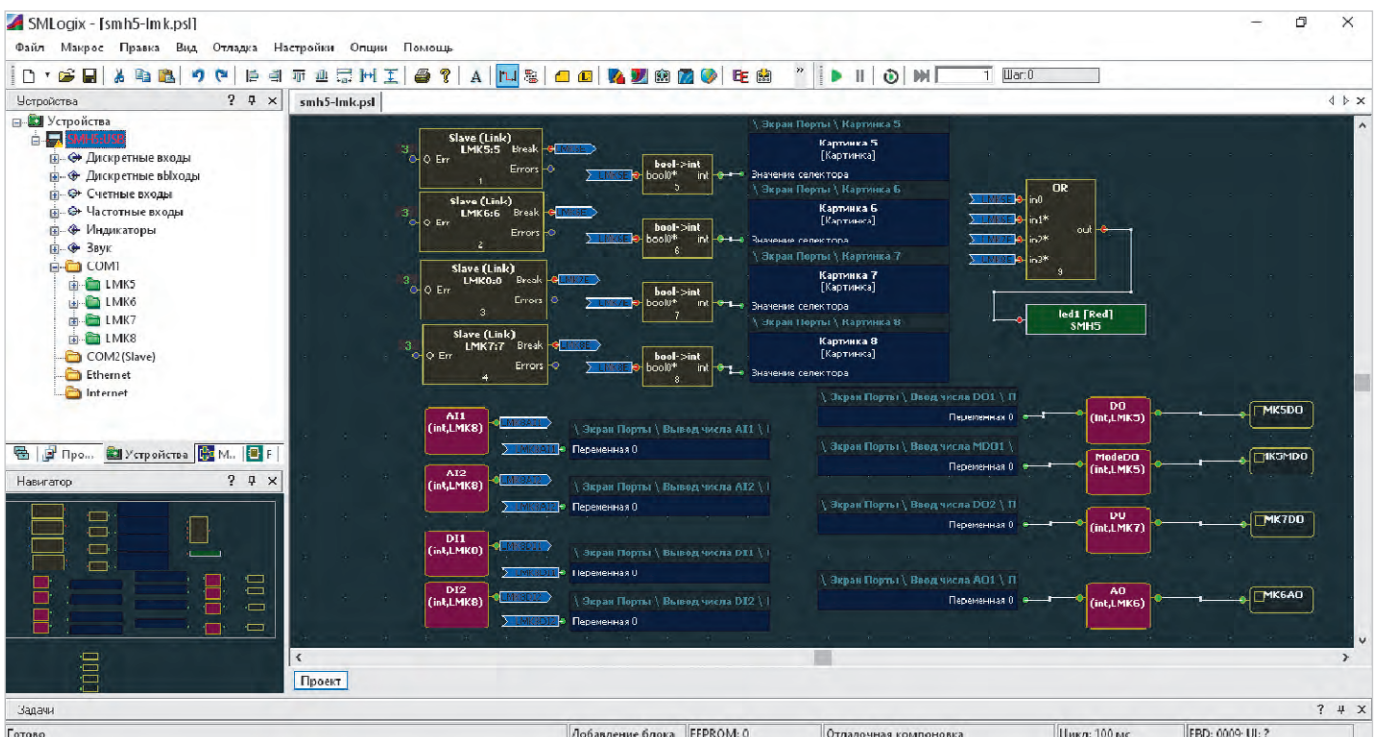


Рис. 7. Внешний вид среды разработки SMLogix



Рис. 8. Интерфейс программы

Таблица. Адреса регистров и краткие технические характеристики ЛМК

Адрес регистра	ЛМК 5 АМС 70.95.76.000	ЛМК 6 АМС 70.95.77.000	ЛМК 7 АМС 70.95.78.000	ЛМК 8 АМС 70.95.79.000
0	Выход DO: 0 – откл., 1 – вкл. или скважность ШИМ 0...100%	Выход АО: 0...1023	Выход DO: 0 – откл., 1 – вкл.	Вход AI1: 0 = 0 В, 0 мА, 0 Ом ... 1023 = 10 В, 20 мА, 10 кОм
1	Режим DO: 0 – DO = 0,1 или 0x0001...0xFFFF – коэфф. К периода ШИМ (Период ШИМ = К × 0,5 с)			Вход AI2: 0 = 0 В, 0 мА, 0 Ом ... 1023 = 10 В, 20 мА, 10 кОм
2–5	Резерв			
6	Версия ПО старшая часть			
7	Версия ПО младшая часть			
8				Вход DI0: 0 – замкнут, 1 – разомкнут
9				Вход DI1: 0 – замкнут, 1 – разомкнут
10	Скорость связи RS-485: 0 – 9600, 1 – 19 200, 2 – 38 400, 3 – 57 600, 4 – 115 200			
11	Тип ЛМК от 5 до 8			
9999	Адрес ЛМК от 1 до 255			

мости от типа ЛМК порт может быть входным или выходным.

Тип входных портов AI и выходных портов АО определяется установкой переключателей на плате ЛМК. Входные порты могут использоваться для измерения напряжения от 0 до 10 В, тока от 0 до 20 мА или сопротивления от 0 до 10 кОм, а входные порты могут формировать выходное напряжение от 0 до 10 В или ток от 0 до 20 мА. Максимальному значению входного сигнала AI и выходного сигнала АО соответствует цифровое значение 1023 благодаря примененным в ЛМК 10-разрядным АЦП и ЦАП.

На рис. 2 и рис. 3 приведено назначение переключателей для настройки выходного порта АО ЛМК6 и назначение переключателей для настройки входных портов AI ЛМК8.

В таблице приведены адреса регистров Modbus и краткие технические характеристики портов для всех типов ЛМК.

Чтение регистров входных портов поддерживается функцией 0x3, а запись в регистры выходных портов поддерживается функцией 0x10 Modbus RTU.

Скорость обмена по интерфейсу RS-485 для всех ЛМК по умолчанию

составляет 9600 бод. Формат данных: 8 бит, 1 стоп-бит, без паритета.

Смена адреса ЛМК осуществляется функцией 0x6 Modbus RTU путём записи нового значения адреса модуля в регистр с адресом 9999.

Выходным элементом ЛМК5 служит твердотельное реле PVT312, которое позволяет коммутировать нагрузку 250 В 190 мА постоянного/переменного тока. ЛМК5 способен формировать статический выходной сигнал или сигнал с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

Выходным элементом ЛМК7 является электромеханическое реле TRD-5VDC-SC-CL, позволяющее коммутировать нагрузку 6 А / 250 В переменного тока или 12 А / 28 В постоянного тока.

ЛМК8 имеет два универсальных входных порта AI1 и AI2, способных измерять напряжение, ток и сопротивление. В режиме измерения сопротивления эти порты можно использовать как дискретные входы DI1 и DI2.

## Проект

Приведенный здесь проект, разработанный автором статьи, демонстрирует подключение всех типов ЛМК к управляющему контроллеру. В качестве управляющего контроллера выбран производительный контроллер SMH5 компании Segnetics [1], имеющий большой объем памяти, встроенный цветной графический сенсорный дисплей и современные коммуникационные порты. Внеш-

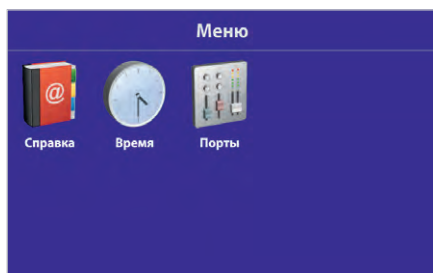


Рис. 9. Главное окно программы



Рис. 10. Окно портов ввода-вывода

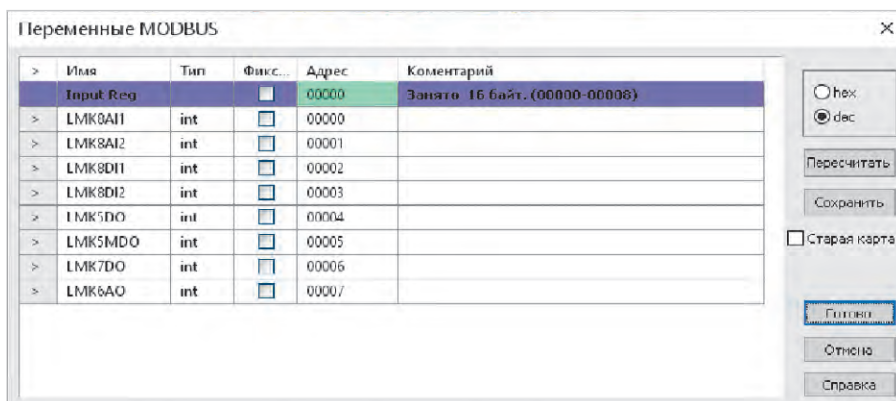


Рис. 11. Карта памяти регистров

ний вид этого контроллера представлен на рис. 4.

Ознакомительная информация о контроллере приведена в источнике [2]. Данный контроллер имеет несколько портов дискретных входов и выходов, но не имеет аналоговых портов ввода и вывода, поэтому к нему невозможно подключить, например, датчики для измерения параметров и устройства плавного регулирования. Но эта задача легко решается после подключения к контроллеру ЛМК нужного типа, например, ЛМК8 с входными портами AI1, AI2 и ЛМК6 с выходным портом АО.

Подключение производится с помощью интерфейса RS-485, используя программный протокол Modbus RTU. Простую предварительную проверку работоспособности ЛМК легко выполнить с помощью любого компьютера, подключив к нему ЛМК через преобразователь USB-RS-485 и запустив на компьютере программу Modbus Poll. Внешний вид программного окна для проверки всех типов ЛМК приведён на рис. 5.

Для детализации данных в процессе обмена между компьютером и ЛМК по протоколу Modbus RTU в программе Modbus Poll имеется вкладка Display – Communication Traffic. С её помощью можно легко отыскать проблему нарушения связи. Внешний вид окна Communication Traffic приведён на рис. 6.

Готовые файлы для программы Modbus Poll с заполненными полями назначения регистров для всех типов ЛМК можно скачать с сайта редакции журнала.

### Программа проекта

Для сопряжения контроллера SMH5 с ЛМК была разработана специальная программа на языке функциональных блоков FBD в среде разработки SMLogix [4]. Данная среда свободно предоставляется компанией производителей контроллеров SMH5. Знакомство с данной средой разработки приведено в источнике [5]. Внешний вид среды разработки с программой проекта представлен на рис. 7.

Интерфейс программы разработан с помощью встроенного в среду разработки программного инструмента SMarT и представлен на рис. 8.

Интерфейс состоит из нескольких окон, на которых располагаются графические элементы, программные органы управления и индикации, а также справочные тексты. Внешний вид главного окна программы представлен на рис. 9.

Это окно содержит графические элементы меню для справки, настройки времени и отображения портов подключённых контроллеров. Окно портов ввода-вывода приведено на рис. 10.

В этом окне можно наблюдать за изменением значений входных портов и задавать произвольные значения для

выходных портов подключённого ЛМК. Перед номерами ЛМК имеются цветные значки, показывающие состояние связи. Красный цвет значка означает отсутствие связи, а зелёный цвет – нормальное соединение.

Количество подключаемых ЛМК с портами ввода-вывода определяется требованиями разрабатываемой системы управления.

### Диспетчеризация проекта

Поскольку контроллер SMH5 имеет необходимые свободные интерфейсы RS-485 и Ethernet, с их помощью можно легко организовать диспетчеризацию системы управления. В приведённом проекте уже заложены регистры с картой памяти, которые позволяют дистанционно собирать информацию о состоянии всех портов контроллеров по интерфейсу RS-485 или Ethernet и отображать её на персональном компьютере. Карта памяти регистров для диспетчеризации приведена на рис. 11.

Кроме того, можно воспользоваться встроенной в контроллер функцией VNC с заводским паролем «segnetics» и получить на удалённом устройстве копию графического дисплея контроллера системы управления шлюзом.

Файл рассмотренного здесь проекта можно загрузить с сайта редакции журнала.

### Заключение

Подобным образом можно дополнять портами ввода-вывода контроллеры других производителей, используя преимущества каждого контроллера в отдельности и объединяя их для создания автоматических систем управления различными объектами.

Кроме того, несколько ЛМК можно подключить через преобразователь USB-RS-485 к персональному компьютеру и использовать его для сбора данных с различных датчиков физических параметров и для управления внешними устройствами автоматики.

### Литература

1. URL: <https://segnetics.com>.
2. URL: <https://segnetics.com/ru/smh5>.
3. URL: <https://www.laminar.ru/product/sistema-upravleniya-kchp/avtomatika/>.
4. URL: <https://www.segnetics.com/ru/smlogix>.
5. Вальна О. Программирование логических контроллеров // СТА. 2025. № 1. С. 18.



# Электронные системы диагностики, стимуляции и воздействия на человека на примере BAMH и управления – на примере AE-Skin

Андрей Кашкаров

Путь будущих разработок в области современной электроники пролегает от визуального отображения окружающего пространства до тактильного. В этой связи представляют интерес система Bioinspired Adaptable Multiplanar mechano-vibrotactile Haptic (BAMH) – пневматически активируемый роботизированный электронный комплекс с интерфейсом из мягкого материала и система AE-Skin, обеспечивающая интерфейс между кожей человека и физическими поверхностями. Принцип её действия достаточно известен и заложен в управлении интерактивными экранами. В первой части статьи рассматриваются особенности новых разработок в области медицинской электроники и перспективы тактильного воздействия на кожу человека для лечения и изменения настроения. Во второй части представлен подробный разбор AE-Skin и примеры её совершенствования во всех сферах жизни человека: от управления посредством электронных тактильных датчиков миниатюрной формы до устройств на основе новых технологий, воспринимающих движения руками без прикосновения и без применения пирозлектрических детекторов, как управляющие сигналы для РЭА.

## Основания для совершенствования технологии

Исследование особенностей нервных рецепторов человека представляется интересным направлением на пути создания электронных устройств для изучения, диагностики состояния здоровья человека, а также для совершенствования терапевтических способов воздействия для излечения от разных недугов. В задачах современных разработчиков РЭА для медицины также есть разработка электронных устройств для восприятия прикосновений и безболезненных тактильных откликов с передачей на ПК или сервер консолидированных цифровых данных, имеющих решающее значение для исследования и диагностики медицинских расстройств человека, в том числе психопатического свойства.

Каждый жизненно важный орган человека имеет «выходы» в виде нервных окончаний на разные участки тела: на этом основано механическое и тактильное воздействие на разные точки организма. Механические стимуляторы энергии и повышения настроения человека для отдельных участков ладо-

ней рук и ступни, такие как специальные коврики с резиновыми шипами и шарики для вращения в ладони, а также иглоукальвание давно не воспринимаются как средства нетрадиционной медицины, а рекомендуются при соответствующих нозологиях дипломированными специалистами в области релаксационной и восстановительной медицины. То же касается различных пневмо- и механических массажёров, кресел и столов.

Теперь механические стимуляторы вполне возможно заменить электронными устройствами. Но пока целенаправленное направление развитие мультисенсорных электронных устройств отражает успехи разработчиков неординарно: в разных странах мира этому уделяют разное финансирование и внимание. Особенно это касается носимых программируемых электронных систем, разработанных для адаптивного воздействия по всему телу. Новые разработки сводятся к созданию компактной электромеханической системы, которая в сочетании с кожей человека как эластичного элемента, накапливающего и отдающего энергию, поддерживает бистабильные режимы дефор-

мации кожи с её восстановлением, при этом оказывая влияние на общий тонус организма и в целом медицинское и психическое состояние человека. Последнее весьма важно, поскольку определяет стрессоустойчивость, долголетие и качество жизни людей.

Воздействие на нервные рецепторы человека определяет как отдельные запрограммированные (предсказуемые) сенсорные реакции, так и непредсказуемые реакции организма. Именно поэтому область рассматриваемых исследований является не столько прикладной, сколько стратегической, поскольку влияет на поведение людей. Систематические экспериментальные и теоретические исследования раскрывают основополагающие принципы и практические критерии для работы в естественных анатомических вариациях механических свойств человеческой кожи. К примеру, беспроводной хорошо адаптированный для кожи человека электронный тактильный интерфейс с массивом бистабильных преобразователей служит каналом для передачи цифровых данных для анализа состояния здоровья человека. Причём анализ может осуществляться как в стационаре, так и дистанционно посредством телемедицинских технологий и консультаций после 3D-сканирования на основе смартфона и инерционных датчиков. Особая цель развития электронных тактильных датчиков состоит в улучшении качества жизни пациентов с нарушениями зрения и проприоцепции. Диапазон ярких ощущений и информационного контента может передаваться рецепторам через точечное давление на кожу с помощью безопасных импульсов электрического тока, контролируемых устройствами современной РЭА. Визуальная обратная связь – это недорогое решение, которое графически отображает контактную информацию. К примеру, тактильные сигналы накладываются на изображение с камеры лапароскопа. Понимание

этой информации, частично наложенной на реальные изображения, требует обучения, чтобы пользователи могли быстро связать то, что видят, с соответствующей информацией тактильной обратной связи.

Кроме того, электронные тактильные интерфейсы можно использовать для добавления ощущений в виртуальной и дополненной реальности. Диапазон ярких ощущений и информационного контента может передаваться рецепторам через точечное давление на кожу с помощью безопасных импульсов электрического тока, контролируемых устройствами современной РЭА. Так, гибкие устройства, обеспечивающие пространственно-временные паттерны прикосновения на участках тела, представляют особый интерес для приложений в медицине, спорте и быту. Несложно себе представить развитие инженерной мысли в XXI веке, если с помощью электроники и пневматических устройств человек научится без помощи рук массировать любые участки своего (и не только) тела и при этом материалами, настолько близко адаптированными к естественному (природному) кожному покрову, что разница по прикосновениям и температурному режиму будет незаметной. Сегодня в этой области проводятся исследования по заказу ведущих производственных концернов. Речь в этой области идёт о заместителях самого человека. Лёгкие и гибкие конструкции таких систем уже имеют массивы вибротактильных приводов, размещаемые менее чем на одном квадратном сантиметре. И даже этот параметр будет совершенствоваться.

С помощью исследований тактильных отзывов подушечек пальцев рук, в том числе изменения температурного режима участков кожи под воздействием электронных и пневматических импульсов, можно улучшить системы и чувствительные к сенсорному давлению экраны смарт-устройств в режиме реального времени. Новую технологию можно использовать для передачи навигационных инструкций, для преобразования музыкальных треков в тактильные паттерны и для поддержки сенсорной заместительной обратной связи для управления роботизированными протезами [5].

### Особенности рецепторов в организме человека

Согласно работе Э.Г. Джонса, кожа человека содержит миелинизированные

волокна А-бета, реагирующие на механические стимулы, причём интенсивность стимулов коррелирует с частотой их разряда. Эти волокна заканчиваются в тельцах Меркеля, Мейсснера, Пачини или Руффини [4]. Тельца Меркеля-SA1 (медленно адаптирующийся тип I) в пальце чувствительны к постоянной силе, низкой частоте воздействия ( $f < 5$  Гц), динамической деформации кожи и локальным пространственным разрывам. Они обладают высокой чувствительностью к особенностям поверхности и кривизне. Тельца Мейсснера-FAI (быстро адаптирующийся тип I) в четыре раза более чувствительны к динамической деформации/движению кожи, чем тельца SA1. Они моментально реагируют на внезапные воздействия, связанные с предметами, которые держат люди в руках, на давление и вибрации в диапазоне от 5 до 50 Гц. Тельца Руффини-SAI (медленно адаптирующийся тип II) формируют нервные отклики о направлении движения или силы воздействия, особенно когда движение связано с растяжением кожи. То есть чувствительны к растяжению кожи и постоянным силам. Тельца Пачини-FAII (быстро адаптирующийся тип II) помогают определить значительной силы напряжения и деформации кожи при низкой частоте воздействия на них, возникающих при повседневной ручной деятельности. Также они чувствительны к пространственному разрешению и реагируют на удалённые стимулы воздействия. Тельца FAII чувствительны к микрометрическим деформациям и вибротактильным стимулам в диапазоне от 40 Гц до более чем 400 Гц. Более того, по мере увеличения интенсивности стимулов происходит почти пропорциональное увеличение пикового ответа FAII на низких частотах воздействия. Таким образом, когда стимул (воздействие) вызывает смещение кожи до значения  $\geq 6$  мкм на частоте  $\leq 128$  Гц, он вызывает более высокую пиковую реакцию FAII по сравнению с частотами выше 128–130 Гц [4, 9].

Кинестетическая обратная связь реализована прямой обратной связью относительно приложенного усилия (воздействия). Поэтому потребовалось внедрение схем управления в существующую архитектуру с добавлением сенсорных устройств с двусторонней связью между сенсорными датчиками и исполнительными механизмами. Обратная связь на небольших

расстояниях вполне стабильна, однако если расстояние будет существенно расширено до 50 метров и более, стабильностью системы придётся пожертвовать. Для улучшения технологичности и устойчивости к помехам (надёжности) тактильных сигналов предложены роботизированные системы, такие как Foldaway и FingerPrint. Однако и они нуждаются в дальнейшем совершенствовании для обеспечения дуплексной обратной связи.

Обратная связь с электронными тактильными системами пока обеспечена с помощью различных технологий и методов. Есть носимые приводы/экзоскелеты для конечностей человека (рук) на основе жёстких тактильных игольчатых систем, мягких вибротактильных датчиков-сенсоров и даже сфокусированного ультразвука. Для достижения тактильных ощущений применяют давление воздуха, организованное с помощью маломощных пневматических насосов, созданных по принципу электронного измерителя давления – тонометра; пневматические тактильные ячейки, реализованные в хирургическом роботе, и комбинацию тактильных иглолок и кинестетической обратной связи для симуляторов пальпации.

### Адаптивная мультиплоскостная механо-вибротактильная система

В разработке электронных тактильных устройств сохраняется несколько пробелов из-за многогранной природы осязания. Это пока не до конца решённые вопросы, связанные с повышением точности тактильной обратной связи, обеспечением разнообразных тактильных ощущений и возможности быстрой переноски устройств для тактильных стимулов воздействия на конечности человека, в том числе кончики пальцев. Тем не менее исследователями из Северо-Западного университета уже разработана адаптивная мультиплоскостная тактильная система Bioinspired со стимулированием посредством механотактильных и постоянных, а также переменных вибротактильных электронно-механических импульсов, воздействующих с регулируемой интенсивностью (до 298,1 мН) и частотой (до 130 Гц). Подробно об этом можно прочитать в [7].

Устройство доставляет одновременные стимулы воздействия в несколько областей кончиков пальцев. Описание

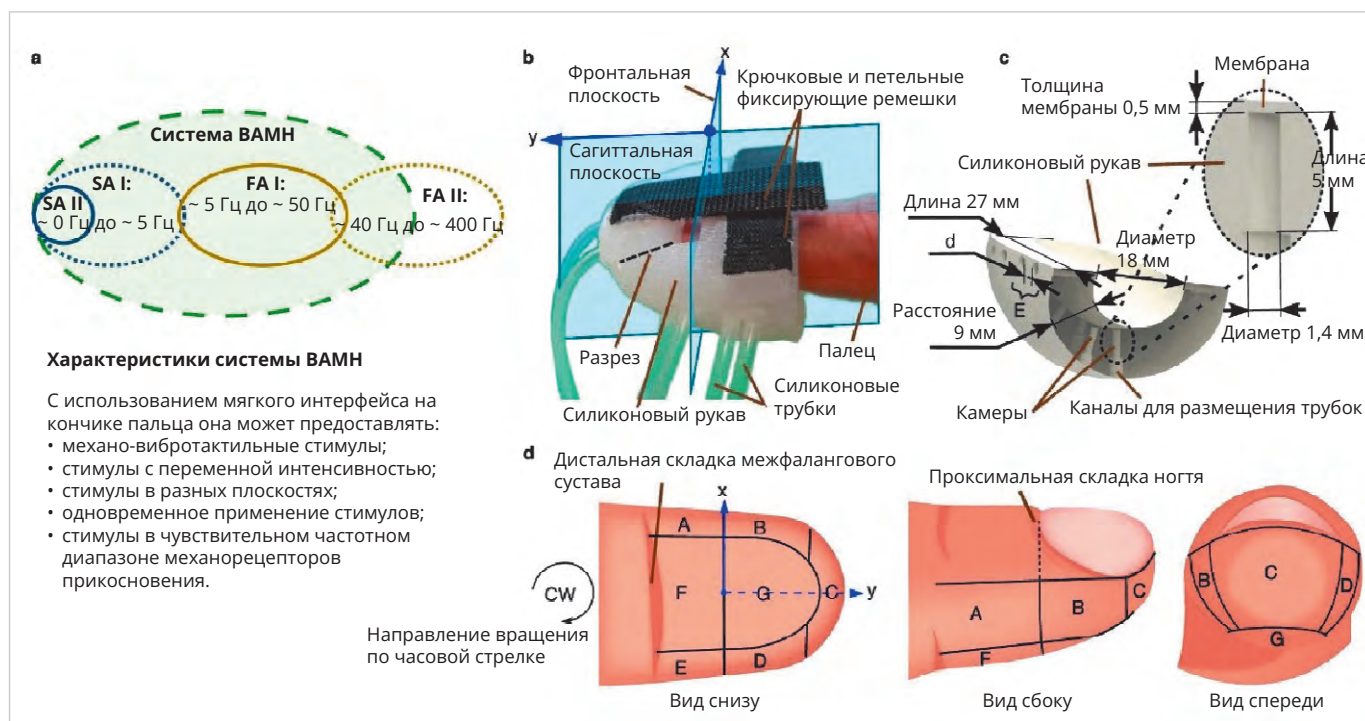


Рис. 1. Тактильный интерфейс для кончика пальца

Пояснение к рис. 1: а – характеристики воздействий системы Bioinspired Adaptable Multiplanar (ВАМН) через интерфейс кончика пальца; б – основными компонентами мягкого податливого интерфейса кончика пальца являются силиконовый рукав, пневматические патрубki для увеличения внутреннего давления камер и застежки-липучки для затягивания интерфейса на палец; в – размеры и внутренняя структура интерфейса кончика пальца, где е – боковая область, а – расстояние стимулов, d – расстояние от края до края между камерами области; d – семь областей определяются с использованием направления по часовой стрелке (CW) и естественных ориентиров дистальной фаланги, в том числе дистальной межфаланговой складки и проксимального ногтевого валика

экспериментов по чувствительности и дифференциации стимулов человека для оценки возможностей механо-вибротактильных, переменной интенсивности, одновременных, мультиплоскостных и оператор-агностических систем представлены ниже [1]. На рис. 1 представлен тактильный интерфейс для кончика пальца.

Из рис. 1 видно, что когда пальцы взаимодействуют с окружающей средой, к примеру, во время захвата, щипка или пальпации, человек использует разные области/плоскости дистальной фаланги пальцев. Это может быть объяснено разными рецептивными полями и распределением плотности четырех основных механорецепторов на пальце. Таким образом, для стимуляции рецепторов, ответственных за тактильную чувствительность на коже человека, тактильные интерфейсы должны адаптироваться к кривизне пальцев и обеспечивать одновременные многоплоскостные стимулы, которые изменяются по интенсивности и частоте. Последняя должна быть от 0 Гц до более чем 50 Гц (рис. 1а).

Показаны детали формы интерфейса кончика пальца. Ширина фор-

мы составляет 18 мм, а длина – 27 мм. Расстояние между участком пальца (кожным покровом) и верхней частью интерфейса составляет 0,5 мм. На эту толщину устанавливается силиконовая мембрана из композитного материала Dragon Skin. Именно она давит под небольшим давлением на кожу пальца, стимулируя его. С помощью той же прокладки-мембраны получают данные об откликах пальца на произведенное давление. Соответственно, моменты давления и получения откликов разнесены во времени на несколько миллисекунд [2].

Мягкий интерфейс для кончика пальца состоит из силиконового рукава (патрубков), внутренних камер и застежек-липучек, позволяющих затягивать тактильный интерфейс на палец (рис. 1б, в). Кончик пальца условно разбит на 14 участков, распределенных попарно по семи областям, определенным с использованием естественных ориентиров, таких как проксимальный ногтевой сгиб и дистальная межфаланговая складка. Каждая камера герметична и соединена с выходом быстродействующих клапанов. Это соединение позволяет оперативно при-

водить в действие мембрану камеры толщиной 0,5 мм, представленную на рис. 1д.

Благодаря мягкости биоинспирированного интерфейса для кончиков пальцев человека и расположению камер в семи областях пальца электронно-механический интерфейс хорошо адаптирован к изгибу пальцев на границах фаланг, поэтому система может воздействовать на палец в нескольких плоскостях. Выбор материала для интерфейса кончика пальца обусловлен влиянием свойств материала на тактильные стимулы и необходимо учитывать болевые пороги чувствительности человека. Его мягкость улучшает адаптацию к изгибу и участкам пальца, в то время как более низкое внутреннее давление по сравнению с другими материалами облегчает стимуляцию. Толщина мембраны 0,5 мм при диаметре рабочей камеры менее 2 мм выбрана на основе эмпирического опыта. Толстая мембрана потребовала бы более высокого внутреннего давления для воздействия и стимуляции кожи (рис. 1с).

Мембрана приводится в действие путем подачи сжатого воздуха через

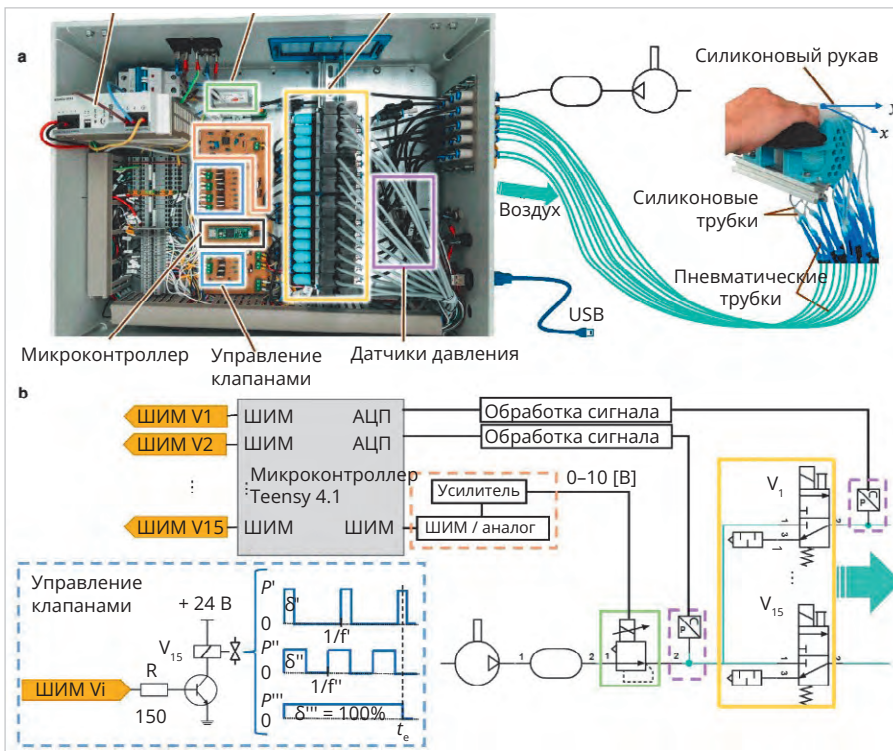


Рис. 2. Тактильная (ВАМН) система  
 Подпись к рис. 2: а – подсистема управления и интерфейс для кончика пальца;  
 б – электропневматическая схема: регулятор давления (зелёные прямоугольники)  
 определяет интенсивность воздействия

камеры. Каждая камера герметично соединена с силиконовой трубкой (внутренний диаметр (ID) 1,5 мм) через канал размещения трубки, приклеенной к другой пневматической трубке внешним диаметром (OD) 4 мм для соединения камеры с выходом клапанов (рис. 2). Оптимальная толщина силиконового рукава составляет 9 мм.

Иновация (ВАМН) заключается в устройствах, обеспечивающих как механотактильные/постоянные, так и вибротактильные импульсные стимулы с переменной интенсивностью в широком диапазоне частот. Таким образом, устройство может стимулировать рецепторы, включая SAII, чувствительные к постоянному стимулу, SAI, чувствительные к вибротактильному стимулу с частотой менее 5 Гц, FAI, чувствительные к вибротактильному стимулу с частотой от 5 Гц до 50 Гц, и FAII, чувствительные к вибротактильному стимулу с частотой от 40 Гц до 400 Гц. При этом устройство способно одновременно стимулировать несколько плоских участков всей поверхности кончика пальца, т.е. фронтальную, боковую и нижнюю области пальца.

Диапазон интенсивности импульсных воздействий и диапазон частоты вибротактильного импульса оцени-

ваются посредством характеристики системы ВАМН.

ВАМН представляет собой пневматически активируемый роботизированный интерфейс из условно мягкого материала. Сочетание мягкого материала, силиконовой структуры с пневматическим приводом даёт ряд преимуществ, как-то: отсутствие подачи жидкости под давлением и то, что пневматический привод является альтернативой гидравлическому приводу. С этим повышается удобство переноски и использования системы посредством надувания мягкой мембраны под низким давлением ( $\leq 150$  кПа).

Внедрение подхода с использованием адаптивных мягких материалов облегчает перепроектирование новых форм для производства персонализированных устройств и, следовательно, улучшает адаптацию к контурам кончика пальца или других частей тела.

Подсистема управления ВАМН, показанная на рис. 2, включает электрические и пневматические компоненты: электропневматическую подсистему управления и мягкий сенсорный интерфейс. Конструкция подсистемы генерирует постоянные тактильные и вибротактильные импульсы с максимальной частотой 280 Гц (определяемой быстро переключающимися-

ся клапанами) для стимуляции четырёх основных рецепторов (медленно и быстро адаптирующихся типов I и II), связанных с особенностями восприятия прикосновений человеком.

Датчики давления (прямоугольники пурпурного цвета) контролируют пневматическое давление воздуха в камере. Схемы обработки (оранжевые прямоугольники) усиливают и мультиплексируют сигналы от микроконтроллера. Схема срабатывания пневматического клапана (синие прямоугольники) представлена как иллюстрация трёх репрезентативных сигналов. Она формирует данные для управления интерфейсом с разными рабочими циклами  $\delta$ , интенсивностью и частотой  $f$ , иллюстрируя три репрезентативных сигнала. К примеру, для начального вибротактильного импульса  $f = 20$  Гц и  $\delta = 5\%$ . Каждый пневматический клапан подключён к камере интерфейса, надетой на кончик пальца.

Частотный анализ силы определяется значением быстрого преобразования Фурье (БПФ) из данных ряда сила-время. Точность БПФ зависит от длины временного ряда, где временной ряд содержит целое число периодов импульсного сигнала. Необработанные данные содержат «шум», поэтому такие требования не валидны для анализа спектрального коэффициента.

### Анализ дифференциации воздействия (чувствительности датчика)

В эксперименте участникам завязывали глаза, и далее, следуя процедуре, аналогичной описанной для интерфейса кончика пальца, участники располагали правую руку в удобном положении. К пальцу прикасались в одном месте последовательно с возрастающей силой до тех пор, пока участник не мог почувствовать предел давления, за которым поверхность датчика теряла упругость. Для этого использовали пять волосков фон Фрея (рис. 3а). Затем процедура была повторена в семи областях четырёх пальцев руки. Четыре пальца руки с помощью воздействия импульсами электрического тока стимулировали семь раз в каждой области двумя точками (четыре раза горизонтально/поперёк пальца и три раза вертикально/вдоль пальца) и дважды одной точкой. Порядок применения двухточечного дискриминатора (рис. 3б) был случайным. Участники эксперимента указывали, чувствовали ли они воз-

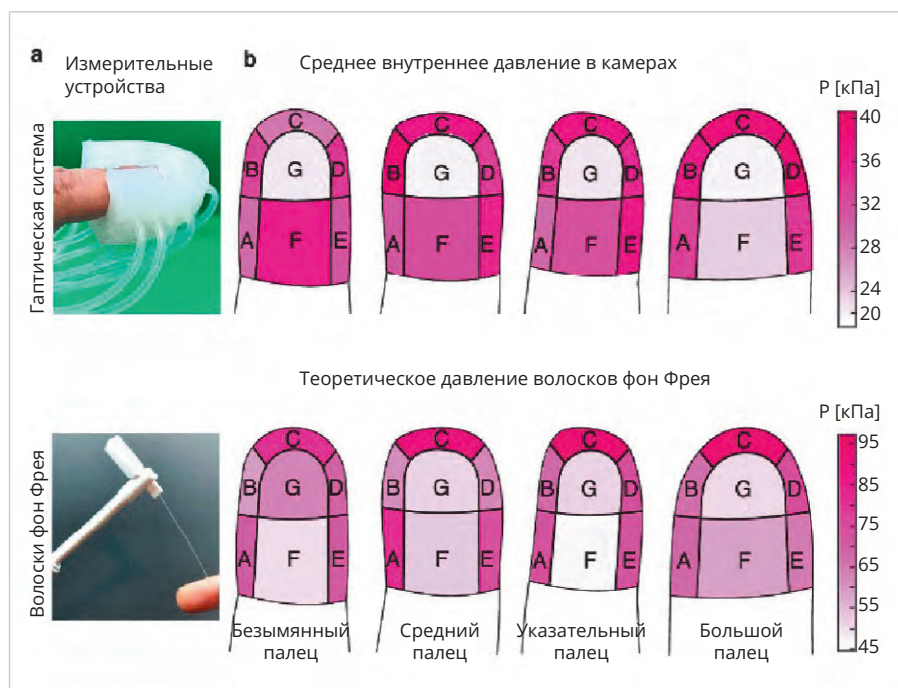


Рис. 3. Чувствительность дистальной фаланги пальца под механическим воздействием

действие и в каких точках, в каком направлении (вертикально или горизонтально). Кроме того, исследователи наблюдали за расширением зрачков, потоотделением в типичных зонах и особенно – за изменением окраса участка пальца, находящегося под воздействием электронных импульсов, увеличивая давление интерфейса вокруг участка побледнения кожного покрова.

### Описание и принцип действия системы тактильной обратной связи

Тактильная система обратной связи состоит из нескольких компонентов. К ним относятся: модуль управления с электронными датчиками, биоинспирированный мягкий тактильный интерфейс, компрессор, источник питания, внутренние камеры и застежки-липучки, которые затягивают тактильный интерфейс на пальце (рис. 16). Мембрана (внутренний диаметр 1,4 мм и толщина 0,5 мм) и электропневматическая подсистема управления позволяют стимулировать давлением сжатого воздуха участок пальца.

Электропневматическая подсистема управления (рис. 2) состоит из печатной платы – РСВ (схемы управления, датчиков и привода), быстродействующих переключающих клапанов (выделены жёлтыми прямоугольниками), пропорционального регулятора давления (выделены зелёными прямоугольниками) и электрических и пневма-

тических источников питания. Плата Teensy 4.1 содержит микроконтроллер, имеющий 22 независимых таймера для одновременного обеспечения частотных выходов ШИМ, 18 аналоговых входов с разрешением 10-битного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и последовательные порты USB для связи с внешними устройствами, к примеру, ПК. Один выход ШИМ (с рабочим циклом  $\delta$  от 0% до 100%) определяется с помощью переменной от 0 до 255 соответственно и вместе с фильтром Баттерворта II порядка позволяет модулировать внутреннее давление системы через пропорциональный регулятор давления Samozzi K8P с диапазоном выходного сигнала 0–300 кПа. Пятнадцать выходов ШИМ используются для управления быстродействующими переключающими клапанами FESTO, MNE3 (3/2-ходовые, нормально закрытые, давление 0,9–800 кПа, максимальная частота переключения 280 Гц) с использованием электронного модуля срабатывания клапанов (выделены синими прямоугольниками). Четырнадцать из этих клапанов подключены к камерам интерфейса кончика пальца. Пятнадцатый клапан разработчики в данном случае считают фиктивным, поскольку его выход отключён. Но этот клапан-канал нужен, так как активируется во время тестов дифференциации стимулов, когда работает только одна из пневматических камер. Два управляемых клапана – датчика дав-

ления Honeywell PX2 с рабочим напряжением 5 В (выделены пурпурными прямоугольниками), подключённые к АЦП микроконтроллера, контролируют замеренное на выходе регулятора давления давление системы и внутреннее давление камеры (измеренное на выходе одного переключающего клапана). Частота дискретизации 1 кГц. Компрессор с резервуаром и электропитанием обеспечивает мощность, необходимую для электропневматической системы. Для обеспечения безопасности во время экспериментов максимальное значение общего внутреннего давления системы ограничено на уровне 150 кПа.

Показатели внутреннего давления камеры, в зависимости от его силы через мембрану, получены с помощью одноточечного тензодатчика Tedeа Huntleigh Model 1004 с диапазоном 3Н. Тензодатчик установлен на движущемся рельсе Zaber X-LSM100A напротив камеры. Тензодатчик в контакте с камерой определяет максимальное воздействие 200 мН, что примерно соответствует в данных условиях давлению 178,2 кПа. Во время испытаний в устойчивом состоянии данные с тензодатчика снимались с частотой 2,5 кГц.

### Характеристика тестов и системы ВАМН

Вибротактильный импульсный стимул, предоставляемый тактильной системой, оценивался с помощью модулированных тестов. Тесты проводились с использованием частоты сигнала срабатывания клапанов 20 Гц и рабочего цикла 5%. Данные обучения и тестирования были получены при тех же давлениях, что и в стационарных тестах. Модулированные тесты также проводились для нахождения приложенной силы, соответствующей диапазону частот и рабочих циклов. В соответствии с чувствительностью к стимулам указательного пальца в тесте на нескольких частотах данные вибротактильного импульса были получены с использованием  $\delta = 75\%$ , частот 2 Гц, 20 Гц, 60 Гц, 90 Гц и 130 Гц и длины трубы 250 мм. Данные отфильтрованы, а пики извлечены в соответствии с методами модулированных тестов.

Характеристика стимулов тактильной системы определяется как соотношение между внутренним давлением камеры и приложенной силой. Данные с тензодатчика отобраны на частоте 5 кГц и пропущены через фильтр нижних частот 200 Гц, затем пики силы

были извлечены за каждый период (1/f). Кроме того, в соответствии с тестом дифференциации получены данные вибротактильного импульса при установленном выходном давлении системы 154,8 кПа. Затем частота увеличивалась с 20 Гц до 180 Гц с шагом 5 Гц при рабочих циклах 5%, 10%, 25%, 50% и 75%; эти тесты повторены неоднократно с вариативным размером длины патрубков в пневмосистеме 60 мм, 150 мм и 250 мм. Увеличение длины патрубка с 60 мм до 250 мм уменьшило диапазон силы с 50,65 мН до 22,29 мН. Анализ показал значительную корреляцию  $\delta$  и длины трубы на максимальной частоте ШИМ [3].

Интересные данные относительно характеристик вибротактильного импульсного стимула получены с помощью нескольких однотипных исследований, разнесённых во времени на две недели. Притом что участники эксперимента были те же самые, равно как и электронные устройства, воздействующие на кончики их пальцев, полученные данные свидетельствуют о том, что в разное время в соответствии с состоянием конкретного организма человека его реакции-отклики не были в точности одинаковыми. Характеристика тактильной системы показывает, что система может обеспечить переменную интенсивность, а также мультиплоскостные и одновременные механо-вибротактильные стимулы воздействия для дистальной фаланги пальцев. Интенсивность стимулов можно изменять с помощью регулятора давления или частоты переключения рабочего цикла исполнительного клапана. Разница между данными, рассчитанными с использованием полинома и фактически полученными, предполагает, что для каждого интерфейса кончика пальца необходима начальная калибровка.

При сравнении результатов диагностики системы ВАМН с альтернативными системами тактильной обратной связи отметим, что ВАМН может обеспечивать механо-вибротактильную стимуляцию с максимальной частотой импульсов 130 Гц. Она способна стимулировать как медленно адаптирующиеся механические рецепторы (диапазон 0–5 Гц), так и быстро адаптирующиеся механические рецепторы (диапазон 5–400 Гц) с частотой, превышающей 120 Гц. Благодаря этому система может стимулировать механические рецепторы ГАП на частоте 128 Гц, при

этом формат воздействия ГАП даёт самый высокий на сегодня пиковый отклик, когда стимулирующее воздействие вызывает деформацию кожи  $\geq 6$  мкм [1]. Максимальный по безопасной для кожи пальца силе воздействия результат зафиксирован на уровне 298,1 мН, поскольку экспериментаторы были ограничены применением устройства относительно порогов чувствительности кожи и дифференциации стимулов обнаружения отклика. Именно поэтому максимальное внутреннее давление интерфейса системы ограничено на уровне 178,2 кПа вместо 300 кПа, вполне достижимых теоретически и практически. Кроме того, рассматриваемый биоинспирированный интерфейс для кончика пальца воздействует не только фронтально, но и через боковые и нижние области пальца с одновременной активацией приложенных сигналов-импульсов.

### Эксперимент оценки осязания с использованием сенсорного интерфейса

Для валидного получения данных о чувствительности и дифференциации участков пальцев рук человека использовались волосы фон Фрея – градуированные калиброванные нити, оказывающие постоянную механическую силу при изгибе на угол до  $32^\circ$ , а также двухточечный дискриминатор, показанный на рис. 3а (ниже).

Участникам эксперимента предлагалось оценить чувствительность крайних фаланг пальцев рук к стимулам и их дифференциации с воздействием на разные участки пальцев. Предварительно было уточнено, что участники эксперимента не имели никаких сенсорных или двигательных нарушений. «Оцениваемыми» пальцами были большой, указательный, средний и безымянный пальцы правой руки. Тест проводился в семи областях, показанных на рис. 1d. Воздействие импульсами широтно-импульсного модулятора (ШИМ) применялось в течение 1,5 с, чтобы ограничить продолжительность эксперимента одним часом. Участники эксперимента использовали защитные наушники, чтобы уменьшить звуковую обратную связь из-за приведения в действие клапанов и регулятора давления интерфейса. В конце теста каждый участник заполнил анкету относительно пола (биологический признак), возраста и профессии. В ходе экспериментов интенсивность стимула изменя-

лась регулировкой выходного давления (в интерфейсе) в диапазоне 0...154,8 кПа. Такое значение максимального давления выбрано для минимизации риска повреждения кончика пальца.

### Анализ чувствительности одноточечной дифференциации

Тест определял минимальную силу / внутреннее давление, необходимые для того, чтобы участник почувствовал отклик поверхности электронного датчика через разные области пальца. Участник удобно располагал руку (рис. 2с), а интерфейс кончика пальца с застёжкой-липучкой был зафиксирован. В течение 1,5 секунд (рис. 2а иллюстрирует необработанный сигнал) на участки пальцев было воздействие небольшого давления, затем пауза в 1 с. Приращение (регулировка) давления в последующих импульсных воздействиях достигалось путем увеличения рабочего цикла сигнала ШИМ с шагом 8, использованием переменной рабочего цикла в микроконтроллере в диапазоне от 0 до 170. Последнее соответствует максимальному приложенному внутреннему давлению камер интерфейса приблизительно 150 кПа. Как только участник чувствует тактильное воздействие в интерфейсе, не только изменяется сопротивление кожи пальца, но инстинктивно оконечная фаланга пальца начинает движение и пытается высвободиться из фиксации электронного интерфейса. Процесс выполнялся в семи областях каждого пальца, по одной области за раз. Области выбирались случайным образом.

При проведении эксперимента вариативно выбирали частоту широтно-импульсного модулятора 2 Гц, 20 Гц, 60 Гц, 90 Гц и 130 Гц. На рис. 2б показана форма импульсов необработанного отклика. Тест двухточечной дифференциации показал оптимальное расстояние, необходимое для определения воздействия на один или несколько участков пальца в пределах одной рабочей области тактильного электронного датчика. Тест проводился по семи участкам на четырёх пальцах руки (кроме мизинца). Использовались электронные датчики с разным расстоянием (площадки электронного сенсора 2 мм, 3 мм, 4 мм и 5 мм). Тест анализа чувствительности указательного пальца на разных частотах показал, что при определённом давлении на участки пальца сопротивление его

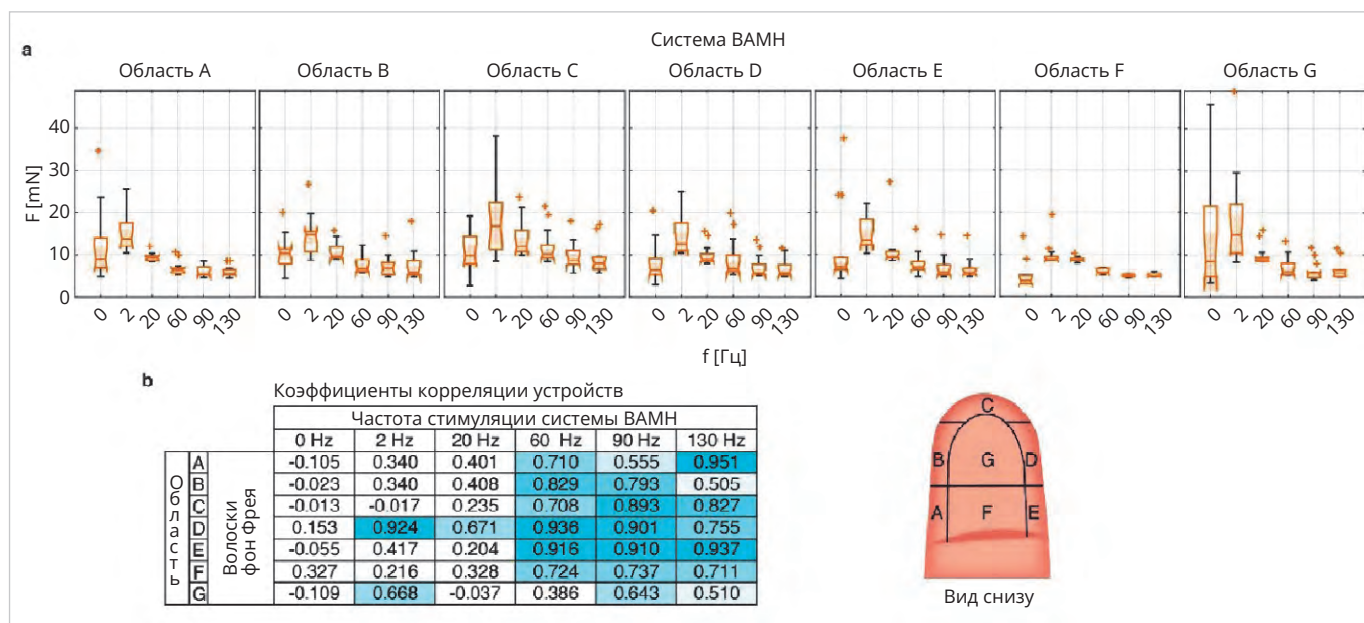


Рис. 4. Особенности воздействия дистальной фаланги указательного пальца: а – чувствительность по областям и частоты стимулов в системе определения VAMN, где «+» – пиковые значения тактильного давления; б – линейная корреляция с результатом, полученным с помощью системы VAMN и волосков фон Фрея (ручное устройство) в разных областях кончика пальца. Светло-голубая заливка показывает коэффициенты, превышающие 0,5, с увеличением интенсивности цвета, указывающей на близость к коэффициенту корреляции 1 (где 1 – представляет прямую связь переменных)

кожного покрова изменяется (уменьшается), и при этом возрастает частота откликов – попытки пальца давить на рабочую область интерфейса.

Также можно сделать выводы о том, что чувствительность электронного сенсора к минимальной силе/давлению имеет определяющее значение при корректном измерении: чем выше сила, тем ниже чувствительность пальца, и наоборот. В экспериментах результаты чувствительности системы VAMN сравнивали с результатами воздействия на волоски фон Фрея (ручное устройство), проиллюстрированные на рис. 3а. Иллюстрация на рис. 3б с разной цветовой маркировкой демонстрирует изменение чувствительности между разными областями пальца при воздействии (тактильном нажатии) на электронный датчик. Поскольку тактильная система воздействия пальцев на рабочую поверхность электронного датчика показывает изменение поверхности последнего, то пропорционально определяется и изменение интенсивности воздействия. Критерий чувствительности анализируется относительно приложенной силы, типично определяемой на портативных электронных устройствах, к примеру, таких как экраны и интерактивные дисплеи современных смартфонов, планшетов, других устройств.

На рис. 3а показаны два вида используемых устройства: система VAMN и датчик в виде волос фон Фрея. На рис. 3б представлены разные участки пальца, а справа – соответственно разные значения соответствующих участков на рабочую поверхность электронного датчика (тактильная система), причём величина давления показана (окрашена) разными цветами.

Различная чувствительность, механическая сила и результаты, полученные с помощью тактильной системы, показывают, что чувствительность датчика меняется в зависимости от области воздействия на него.

На рис. 4 показана иллюстрация особенностей воздействия на датчик концевой фаланги указательного пальца.

Изменение чувствительности воздействия тактильной системы, способной независимо и одновременно определять многоплоскостные, переменной интенсивности и частоты механические вибротактильные воздействия в различных областях пальца, показывает два порога чувствительности с частотой в пределах диапазона давления тактильных механических рецепторов. Сила нажатия, прикладываемая к устройству малой площади поверхности на примере основы «волос фон Фрея» (0,18 мм), отличается от силы, прикладываемой

мой тактильным воздействием на большую площадь датчика в 1,4 мм.

Характеристика тактильной системы была выполнена с использованием ПО Matlab R2021b. Данные были разделены в каждой точке, где сила тактильного давления или его частота изменялись. Затем полученные в эксперименте данные сравнивались с данными предыдущего тестирования, чтобы найти среднеквадратичное отклонение (RMSD).

В данном примере результаты подушечки пальца в основном ограничиваются настройкой электронного интерфейса и зависят от навыков оператора, влияют на корректный сбор данных. Такие факторы, как угол приложения давления между волосом фон Фрея и кожей пальца, уровень изгиба волоса, влияют на изменчивость данных. Другое открытие касается результатов чувствительности по частотам, напоминающих реакцию Пачини (FAII) на давление кожи (пальца) на площадку – рабочую поверхность датчика, осуществлённую с различной частотой. Поэтому особенность механического воздействия рецепторов FAs являются фактором, наиболее важным при определении порога чувствительности фон Фрея.

Для определения силы нажатия особенное значение имеет минимальное расстояние, необходимое для тактильного соприкосновения с площадкой

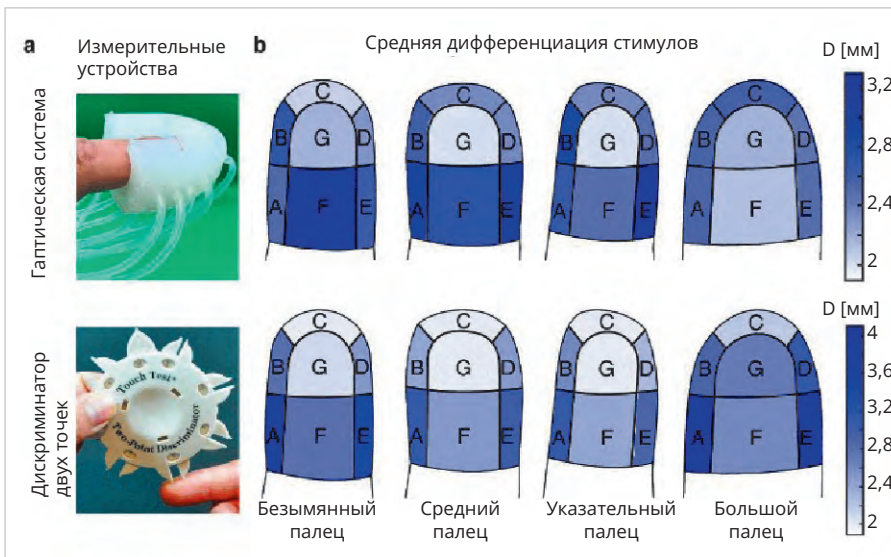


Рис. 5. Дифференциация соприкосновения дистальной фаланги пальца  
 Подрисовочная подпись к рис. 5: а – пример устройства; б – среднее минимальное расстояние дифференциации нажатия между пальцами в областях, где величина расстояния зависит от интенсивности воздействия



Рис. 6. AE-Skin обеспечивает интерфейс между кожей человека и физическими поверхностями

электронного сенсора. Чем больше минимальное расстояние, тем ниже тактильное воздействие по площади. Для тактильного двухточечного соприкосновения (рис. 5а) расстояние определяется между двумя закруглёнными кончиками фаланги пальца.

### Адаптивная передача тактильного взаимодействия с помощью смарт-перчаток с цифровой вышивкой

Кроме рассмотренных вариантов решений и технологии, связанной с ВАМН, уместно обратить внимание на технологию AE-Skin, пришедшую на смену технологии Real Skin. На рис. 6 представлены основные отличия этих технологий, о которых подробно будем говорить во второй части статьи.

К примеру, система AE-Skin, установленная на панели автомобиля, может использоваться для управления встро-

енным аудиорекордером, скоростью обдува кондиционера, температурным режимом в салоне, положением и углом наклона сиденья. В исходном состоянии поверхность панели остается плоской. Когда водитель касается панели, встроенный электронный сенсорный датчик улавливает давление пальца, а затем привод генерирует определённую траекторию для интерактивного руководства. Так водитель может быстро и точно переместиться в рекомендованное положение и выбрать действия для вспомогательной операции, в то время как привод (панель под пальцем) вибрирует, чтобы напомнить водителю, правильно ли выполнена операция. Подобные установки были реализованы на интерактивных досках и стеклах автомобиля более 10 лет назад. Однако тогда быстрота реакции и помехозащищённость, устойчивость от внешних факторов, включая температуру воздуха,

в электронных устройствах и в общем их функционале ещё оставляли желать лучшего, равно как и цена изделий. Теперь «отклик» на воздействие (реакцию) вырос, а цена стала заметно ниже.

Люди полагаются на свои чувства, включая зрение, слух и осязание, для сбора информации об окружающей среде и друг о друге в повседневной деятельности. Физическая тактильная обратная связь играет важнейшую роль в обучении, движении, общении и осведомлённости об окружающей среде, а также в личных отношениях. «Современная электроника» писала об этом, в частности, в [6]. С той поры электронные системы продолжают совершенствоваться. По мере того как технологии продолжают развиваться, их способность помогать людям в сложных сценариях увеличивается, растёт необходимость в использовании физического тактильного опыта для обогащения технологически опосредованного взаимодействия как между людьми, так и между людьми и машинами. Обмен тактильной информацией между людьми и роботами может иметь основополагающее значение для персонализированной медицины и лечения, роботизированной хирургии, эффективного взаимодействия человека с роботом, дополненной и виртуальной реальности AR/VR и повседневной деятельности человека.

Обеспечение интуитивной передачи тактильного взаимодействия остаётся сложной задачей, поскольку для этого требуются масштабируемые и конформные тактильные сенсорные и тактильные дисплейные системы, которые можно интегрировать в повседневную жизнь. Уже появились разработки, направленные на изучение новых высокоплотных, недорогих материалов и методов изготовления для решения означенных проблем. Разработки конформных тактильных сенсорных систем позволили беспроводным образом создавать «умную одежду» с зарядными системами внутри, имеющую собственный идентификатор человека-владельца-пользователя (больше не надо таскать с собой QR для путешествий и посещения культурных мероприятий во время пандемии: одежда скажет за себя).

Для объединения тактильного восприятия и обратной связи в современных электронных системах на примере ВАМН, о которых мы рассказали выше, задействованы эпидермальные челове-

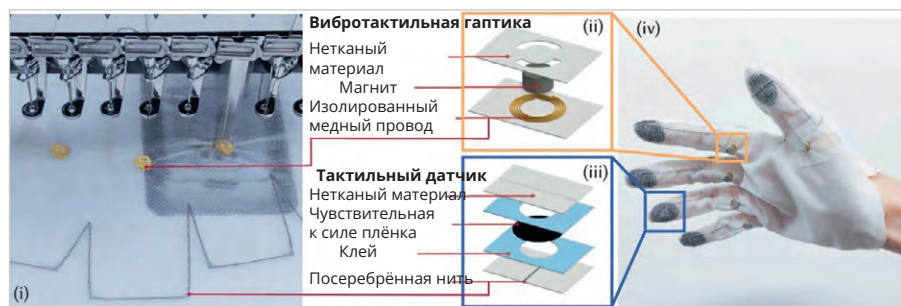


Рис. 7. Перчатка на текстильной основе (IV) со встроенными тактильными датчиками

Пояснение к рис. 7: а – перчатка на текстильной основе (iv) со встроенными тактильными датчиками (ii) и вибротактильными тактильными датчиками (iii) разработана в цифровом виде и автоматически изготовлена с использованием цифровой вышивальной машины (i)

ко-машинные интерфейсы. Хотя предыдущие разработки продемонстрировали потенциал таких систем, они также выделили технические проблемы, к примеру, сложный и деликатный процесс изготовления устройств, который пока ограничивает масштабируемость, надёжность, настройку и совместимость электронных устройств рассматриваемого направления. Различия в восприятии людьми тактильной обратной связи затрудняют эффективную и надёжную взаимосвязь человек-машина, поскольку индивидуальная калибровка устройства для каждого пользователя также должна быть минимизирована. Поэтому масштабируемые, компактные, конформные и адаптивные человеко-машинные интерфейсы с возможностями тактильного восприятия и тактильного отображения остаются экзотикой, хотя и имеют большой потенциал для разнообразных приложений в реальном мире.

Сосредоточившись на тактильном взаимодействии рук, представляем возможности электронных перчаток со встроенными тактильными датчиками AE-Skin и вибротактильными приводами (рис. 7). Как сенсорные, так и тактильные компоненты в производственном режиме интегрируются в текстиль с индивидуальным пространственным разрешением и позициями с помощью цифровой технологии вышивки. Так, индивидуальная перчатка изготавливается в течение 10 минут с использованием коммерческих материалов, сохраняя мягкую, конформную и гибкую природу текстиля. Вибротактильные матрицы (рис. 6) обеспечивают площадь воздействия (пространственное разрешение) до 5 см<sup>2</sup>, а сенсорные элементы достигают площади 0,25 см<sup>2</sup>. Такие устройства уже сегодня иденти-

фицируют человека по тактильной обратной связи на основе нескольких индивидуальных параметров, как-то: амплитуда, частота, временные, но типичные паттерны движений (стиль) и расположение на руке в соответствии с её геометрией.

Интерфейсы человек-машина для захвата, передачи и обмена тактильной информацией во времени и пространстве обладают огромным потенциалом для здравоохранения, дополненной и виртуальной реальности, сотрудничества человека и робота и развития навыков. Чтобы реализовать потенциал, интерфейсы должны быть носимыми, незаметными и масштабируемыми как по чувствительности, так и по параметрам тела. В основе разработки технология для бесшовной вставки пьезорезистивных датчиков силы и массива вибротактильных приводов в текстильные изделия настраиваемым, масштабируемым и модульным способом. Такие электронные перчатки уже могут записывать, воспроизводить и передавать на расстояние данные (в цифровом виде) о тактильных взаимодействиях. Во многом подобные перчатки являются средством индивидуального пользования, поскольку характер и особенности нажатий на поверхности для людей индивидуальны.

Для повышения эффективности передачи тактильного взаимодействия разработчики совершенствуют машинное обучение с применением ИИ, и тогда можно моделировать электронные перчатки персонально для каждого пользователя в соответствии с конкретной реакцией на тактильные ощущения, а затем оптимизировать параметры тактильной обратной связи. Такой подход разработчиков РЭА стал возможным благодаря внедрению трёх

составляющих: смягчения тактильной окклюзии, усовершенствованного руководства для выполнения физических работ и действий и обеспечения возможности телеуправления роботом с большой чувствительностью [3].

На рис. 8 показаны примеры возможностей интерактивных тактильных перчаток.

Используя электронные перчатки со встроенными тактильными датчиками, можно достичь как физическое взаимодействие между людьми для развития конкретных навыков игры на пианино (b), так и совершенствовать передачу физического взаимодействия между людьми и роботами в системах телеуправления (c).

## Выводы

Об особенностях электронной кожи – интерфейсе для измерения тактильной обратной связи на физических поверхностях подробно рассказано в [2]. Уровень энергичности воздействия на площадку электронного датчика у каждого человека особый [1]. Эти выводы из экспериментов позволяют предположить, что по силе воздействия участков пальцев на рабочую поверхность электронного сенсора можно идентифицировать (в комплексе иных факторов) личность человека, а также диагностировать состояние его здоровья в конкретный момент времени, вплоть до физических недомоганий, «усталости» или даже аффективного расстройства настроения (как элемента депрессии).

Кроме того, осязание является ключом к восприятию человеком окружающей среды и взаимодействию с ней. Этот навык используется для различения характеристик объектов (текстуры, жесткости, пластичности и веса).

В таких областях, как медицина, системы дистанционного управления, развлечения и обучения, количественно и в геометрической прогрессии растёт использование технологий обратной связи с тактильным контактом. Это помогает пользователям чувствовать, что они взаимодействуют с физическими объектами, даже если находятся далеко или действуют только в виртуальном мире (к примеру, виртуальный поцелуй для любимой).

Одна из целей рассматриваемых новых технологий состоит в том, чтобы помочь людям получить новый опыт, к примеру взаимодействия с дикими животными, то есть пережить то, с чем они не смогут столкнуться в

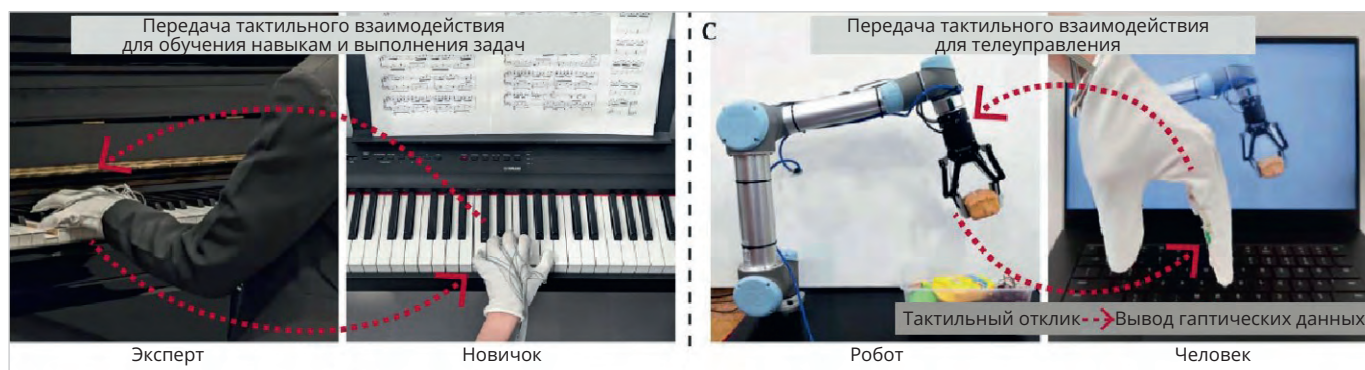


Рис. 8. Возможности интерактивных тактильных перчаток

своей жизни. Другая цель – обучить специалиста диагностике редких состояний, а также расширить знания и работать более точно и безопасно, особенно при выполнении сложных задач. Кроме того, осязание имеет важную роль и изучается в социальных отношениях, в укреплении связей между людьми.

Для обеспечения тактильной обратной связи в последние годы исследованы различные методы, включая электрические, пневматические, пьезоэлектрические, ультразвуковые и электромагнитные системы и воздействия для обучения двигательным навыкам человека, иммерсивные взаимодействия виртуальной и дополненной реальности и автономную помощь. Эксперименты демонстрируют способность новейших устройств оцифровывать, фиксировать, записывать, воспроизводить и адаптивно передавать данные о физических взаимодействиях в различных контекстах и областях жизни.

Из примеров новых датчиков системы AE-Skin, обеспечивающей интерфейс между кожей человека и физическими поверхностями, а также сенсорных датчиков и матриц, интегрированных в электронных «умных» перчатках на текстильной основе, аккумуляторов и электронных карт памяти-идентификаторов для RFID, вшитых в «умную одежду», мы видим, в каком направлении развивается современная электроника. В бытовой сфере созданы такие неожиданные устройства, как электронный пластырь, имитирующий сложные тактильные ощущения, включая вибрацию и давление. Некоторые виды пластырей состоят из гибкой матрицы и более 19 миниатюрных приводов. Причём устройство использует энергию только тогда, когда приводы меняют положение, благодаря чему заряда батареи хватает надолго. Устрой-

ство стимулирует кожу, вызывая сложные тактильные ощущения [7].

Устройство имеет систему энергосбережения: накапливает энергию от нагрева до естественной температуры кожного покрова. «Умный пластырь» может найти применение в видеоиграх, виртуальной реальности и медицине, так как позволяет заменять сенсорное восприятие, к примеру зрение, тактильной обратной связью, что поможет людям с соответствующими функциональными нарушениями. В ходе экспериментов участники, которым завязывали глаза, смогли за короткое время адаптироваться к получению информации об окружающей обстановке при помощи тактильных ощущений. Принципы работы устройства описаны в статье в журнале Nature [8].

Таким образом, одно из активно развивающихся направлений в разработке и серийном создании электронных устройств будущего – замещение реальных ощущений искусственными: электронный поцелуй вместо реального, виртуальное объятие вместо настоящего. С помощью индивидуально подобранного импульсного воздействия на соответствующие точки ступни или ладони человека можно регулировать даже аппетит, а это, соответственно, экономит деньги семейного бюджета: только посмотрел через стекло витрины на осетровую икру, и покупать её не надо, при помощи специального электронного программируемого «аппетитора» ты уже наелся. Хорошо это или плохо – покажет время. Пока ясно одно: любые технические новации – инструмент для людей, а не наоборот. Опасения по поводу новых электронных устройств-заменителей актуальны лишь для тех, кто не способен относиться к технологиям критически, определяя для себя границы допустимого их использования.

## Литература

1. Абад С.А., Герциг Н., Райт Д. и др. Биоинспирированная адаптивная многоплоскостная механо-вибротактильная тактильная система. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-51779-8>.
2. Го Ю., Ван Юн., Тун Ц. и др. Активная электронная кожа: интерфейс для получения тактильной обратной связи на физических поверхностях. URL: <https://www.nature.com/articles/s41528-024-00311-5>.
3. Дель-Прето Д., Куй Ву, Фроши М. и др. Адаптивная передача тактильного взаимодействия с помощью смарт-перчаток с цифровой вышивкой. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-45059-8>.
4. Джонс Э.Г. Сенсорная рука (2006). URL: <https://academic.oup.com/brain/article-abstract/129/12/3413/268678>.
5. Джунг Й.Х., Васкес-Гуардадо А. Беспроводной тактильный интерфейс для программируемых схем прикосновений к большим участкам кожи. URL: <https://www.nature.com/articles/s41928-022-00765-3>.
6. Доезжаев А. Что «делает» искусственный интеллект в России // Современная электроника. 2023. № 6. URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2023/2023-6/169581/>.
7. Разработан тактильный пластырь: он имитирует разные типы прикосновений. URL: <https://hightech.fm/2024/11/06/haptic-patch>.
8. Фламин Т. Мэтью, Кён-Хо Ха, Цзэн-жун Го. Восстановление биоэластичного состояния для тактильного сенсорного замещения. URL: <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08155-9>.
9. Хэндлер А., Джинти Д.Д. Механосенсорные нейроны прикосновения и механизмы их активации. Nat. Rev. Neurosci. 22, 521–537 (2021).

# Об оптимальной расстановке фанатов на печатных платах

Александр Старков

В статье рассматривается задача оптимальной расстановки фанатов на печатных платах и анализируются ограничения существующих решений в современных САПР. Предложена математическая постановка задачи выбора фанатов как поиска максимального набора совместимых вариантов без нарушений правил проектирования. Обоснована вычислительная сложность задачи и необходимость применения приближённых алгоритмов. Показано, что предложенный подход позволяет повысить полноту и качество разводки, включая работу с дифференциальными парами и конфликтами трассировки.

## Основные понятия

Современные печатные платы (ПП) состоят из многих слоёв. На поверхностных слоях (Top/Bottom) размещаются пины (они же контактные площадки). Пины бывают либо сквозные (Through), либо однослойные (SMD).

Как правило, пину приписана некоторая электрическая цепь. Пины одной цепи соединены условными линиями (нетлайнами) таким образом, что получается связный граф (где пины – это вершины, а нетлайны – это рёбра).

Задача трассировки ПП состоит в замене каждого нетлайна цепочкой из трексов (трасс) и переходных отверстий ППО (межслойных переходов или вивёв), не создавая при этом наруше-

ний DRC (правил толщины, зазоров и т.д.) с объектами (пинами/треками/ПО) других цепей.

При этом использование ПО неизбежно, если на концах нетлайна находятся SMD-пины на разных сторонах платы. Из-за высокой плотности размещения пинов на поверхностных слоях трассировка в основном происходит на внутренних слоях. Поэтому, если невозможно страссировать нетлайн на одном слое, обычно сразу создают так называемые фанаты от нужных SMD-пинов.

Фанат – это, как правило, короткий трек от пина, на конце которого располагается ППО. На рис. 1 изображен фанат для одного из 8 пинов (иногда решается ставить ППО малого размера

прямо в центр пина без промежуточного трека, но этот случай мы здесь не рассматриваем).

Трассировка ПП обычно начинается с разводки треками на поверхностном слое самых коротких нетлайнов с пинами на этом слое. Следующий шаг – создание фанатов от остальных SMD-пинов.

Пины объединены в компоненты. Наиболее сложный вид имеют BGA-компоненты. Они состоят из большого количества (иногда десятков тысяч) круглых SMD-пинов, расположенных в очень плотной (при этом не обязательно регулярной) матричной структуре.

Если позволяют размеры ПО и зазоры ПО – Пин, фанат в BGA – это короткий трек от пина до ППО в диагональном направлении в центр ячейки с вершинами из соседних пинов (рис. 2).

Задача расстановки фанатов в BGA-компонентах достаточно хорошо изучена [1, 2]. Задача же расстановки фанатов в остальных SMD-компонентах меньше изучена, хотя и кажется более простой.

Основными видами таких компонент являются SOIC и LCC (на первом рисунке выше компонента имеет тип

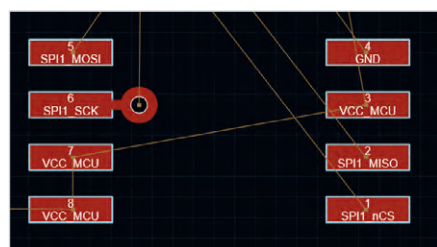


Рис. 1. Фанат для SMD-пина 6



Рис. 2. Фанат для BGA-пина Y17

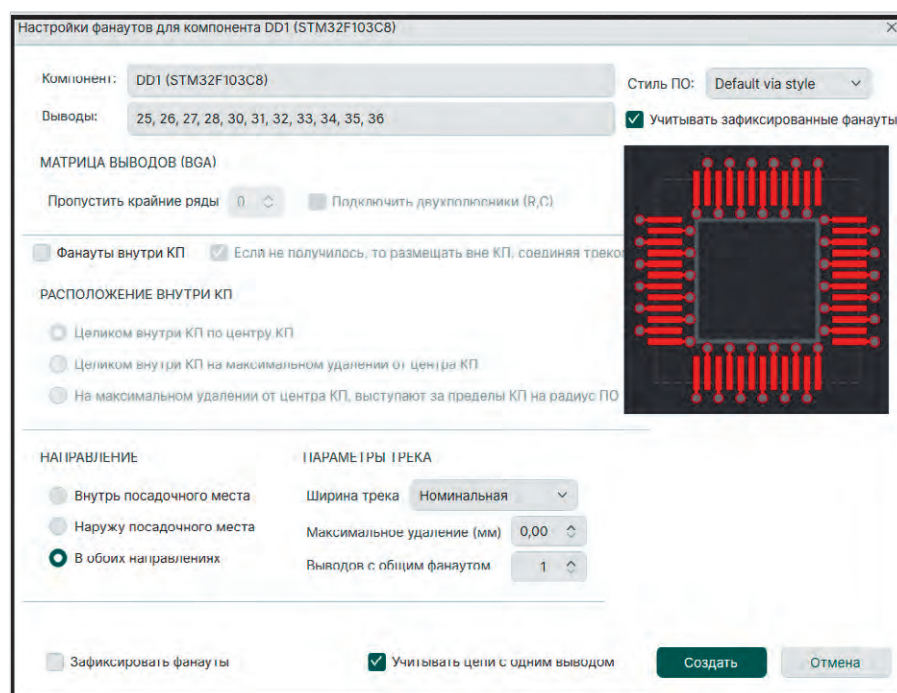


Рис. 3. Диалог для расстановки фанатов в DD

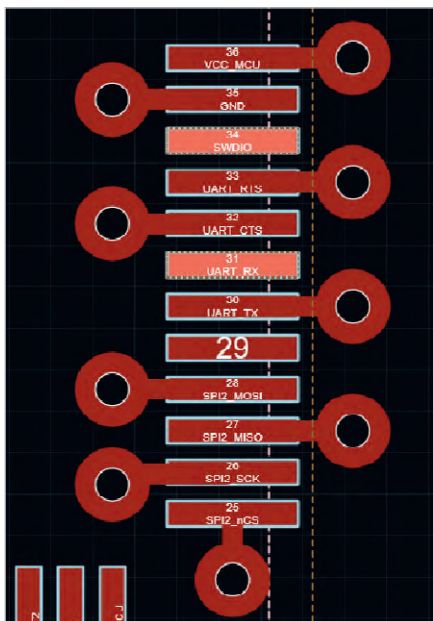


Рис. 4. Неполная расстановка фанатутов

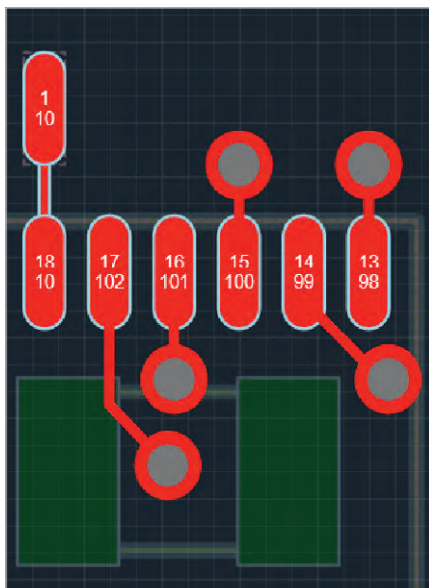


Рис. 5. Искривлённые фанатутные треки

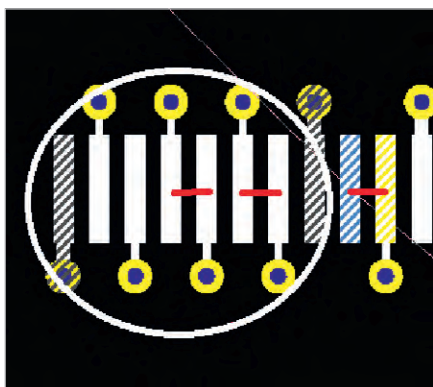


Рис. 6. Дифпарные фанатуты, построенные с помощью паттернов в Xpedition

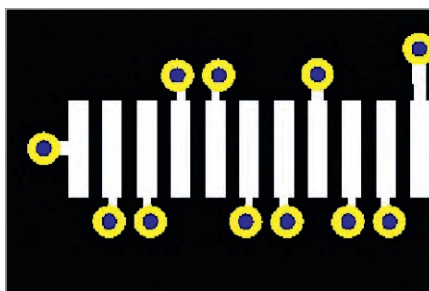


Рис. 7. Дифпарные фанатуты, построенные командой F2 в Xpedition

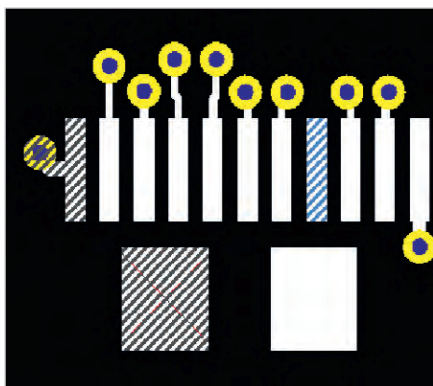


Рис. 8. Неполная разводка фанатутов

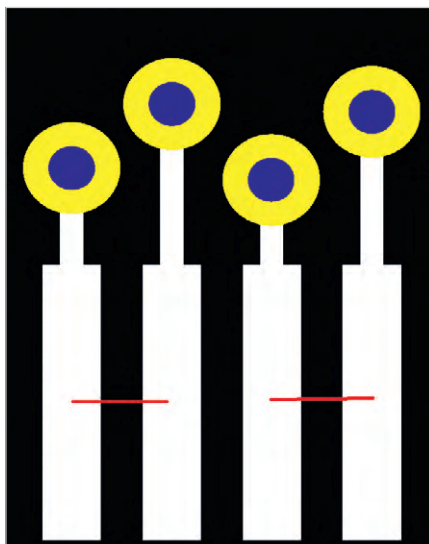


Рис. 9. Прямые дифпарные фанатуты

SOIC, в диалоге ниже – LCC). Пины в таких компонентах обычно прямоугольной формы (возможно, со скруглёнными углами). Согласно «правилам пад-энтри», хороший выход трека из такого пина происходит ортогонально через середину стороны (предпочтительно короткую). Иногда разрешён и выход через вершину пина по диагонали.

### Обзор возможностей современных САПР

Для создания фанатутов в системе Delta Design (DD) имеются две возможности: в режиме TopoR и в режиме RightPCB. TopoR не имеет настроек и создает фанатуты сразу для всех BGA-компонент (плюс для цепей питания в SMD-компонентах).

RightPCB работает со всеми или только выбранными пирами отдельной компоненты и имеет диалог для управления расстановкой фанатутов (рис. 3).

В настоящее время эта функциональность в DD существенно дорабатывается. Однако в некоторых случаях удаётся расставить не все фанатуты (рис. 4: пины 31 и 34 подсвечены; пину 29 не прислана цепь, и ему фанатут не требуется). Иногда фанатуты излишне длинные (рис. 5).

Такие же недостатки (неполная разводка или некая кривизна фанатутов) присущи механизмам создания паттернов в других ведущих САПР (Xpedition, Altium, Allegro). Все они используют либо последовательную расстановку фанатутов по заданному шаблону (в линейку, в ёлочку и т.д.), либо используют подход «сначала поставим прямые короткие фанатуты везде, где возможно, а потом займёмся остальными».

Отметим, кстати, один существенный момент. Как DD в режиме RightPCB, так и Xpedition при расстановке фанатутов не создают нарушений DRC (если это и случается, то является дефектом программы и подлежит исправлению). В отличие от них, Altium, Allegro и DD в режиме TopoR могут создавать большое количество нарушений. Иногда это помогает понять, в каких местах имеются проблемы, и тут же их решить в ручном режиме.

Ещё одним недостатком фанатутных паттернов является отсутствие поддержки дифпарности. Дифференциальная пара – это пара цепей, которые должны разводиться одновременно и попарно, т.е. треки дифпары должны идти параллельно на определённом зазоре друг от друга и переходить на другой слой с помощью ПО одновременно. Как правило, дифпарные пины стоят рядом, и фанатуты для такой пары пинов должны выводиться в одну сторону. Однако фанатутные паттерны это правило не поддерживают.

Ниже на рис. 6 приведён фрагмент расстановки фанатутных паттернов в Xpedition. Красными отрезками отмечены дифпарные пины, у всех фанатутов разведены в разные стороны. Синим цветом подсвечен пин, не получивший фанатута. Очевидно, что если всю левую группу фанатутов, обведённую белым овалом, перенаправить на

противоположные направления, то были бы разведены все фанауты.

В Xpediton, в отличие от остальных САПР, есть другая опция для создания фанаутов: команда F2 для выбранного набора пинов (не обязательно из одной компоненты). Она не имеет никаких настроек и разводит фанауты один за одним, при этом умея толкать другие объекты (треки и ПО), если этого требует соблюдение зазоров. Эта команда имеет полноценную поддержку дифпарности. Более того, дифпарные фанауты являются симметричными (рис. 7).

Поскольку диаметры ПО больше поперечника пинов, дифпарные фанауты разведены не отрезками, а «клюшками». Из-за этого соседние дифпары вынуждены разводиться в разные стороны. В данном случае это не создаёт проблем, но может привести к неполной разводке при наличии других пинов поблизости компоненты (рис. 8).

Заметим, что дифпарные фанауты можно было бы развести отрезками и разместить все фанауты в одном направлении. На рис. 9 приведён пример такой разводки двух соседних дифпар в одном направлении.

У этого подхода есть известный недостаток: фанауты внутри дифпары будут разной длины. Это не имеет значения для низкочастотных цепей, однако крайне нежелательно для высокочастотных. В любом случае, полезно дать пользователю возможность управлять видом дифпарных фанаутов.

### Постановка задачи

Как видно, все описанные способы построения фанаутов с помощью паттернов имеют определённые недостатки. Попробуем сформулировать задачу при построении фанаутов для произвольного набора пинов: создать максимальное число максимально коротких фанаутов при соблюдении правил DRC и дифпарности.

Разумеется, при этом желательно соблюдать другие правила: «хороший» выход трек из пина (качество пад-энтри), симметричность дифпарных фанаутов и т.д. Отдельно стоит вопрос о пригодности фанаутов для последующей трассировки, например, с помощью эскизного трассировщика пучков ЭТП [3].

Попытаемся описать (как нам кажется, довольно универсальный) подход для решения этой задачи в



Рис. 10. Потенциальные варианты фанаутов для трёх SMD-пинов



Рис. 12. Полная расстановка фанаутов

рамках системы DD. Как отмечалось, режим RightPCB работает, избегая нарушений DRC. Существенным ограничением этого режима по сравнению с ведущими САПР является невозможность «толкать» существующие объекты при трассировке. Это касается и ЭТП. Поэтому такое же ограничение имеет место и для нашего подхода к созданию фанаутов.

Второе ограничение: как и ЭТП, мы будем создавать только «регулярные» треки для фанаутов (т.е. с сегментами в одном из 8 направлений, кратных 45 градусам).

Предположим, что мы научились создавать некоторый набор фанаутов для каждого отдельно взятого пина без нарушений DRC с существующими объектами ПП. Скажем, для нижнего пина на рис. 10 мы можем рассмотреть 4 варианта фана-

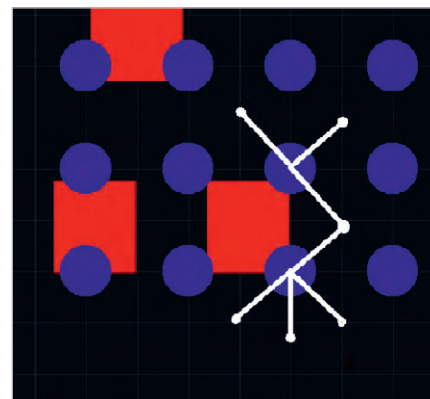


Рис. 11. Потенциальные варианты фанаутов для двух BGA-пинов

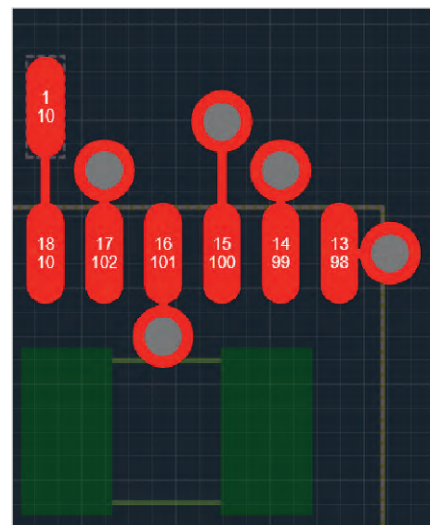


Рис. 13. Фанауты с короткими прямыми треками

утов (все – отрезками). Для «угловых» пинов над ним – 5; 3 варианта (заметим, что один из вариантов имеет форму «клюшки» из-за соблюдения зазора ПО – Пин). Маленькие кружки обозначают центры потенциальных ПО.

Для BGA-пинов можно пробовать все 8 направлений (рис. 11). На периферии плотной области предпочтительнее не диагональное, а ортогональное направление, чтобы создать каналы трассировки (красные прямоугольные пины находятся на противоположном слое и ограничивают наши варианты).

Центральный шаг построения сводится к тому, чтобы для каждого пина выбрать один из вариантов, не создавая DRC с другими фанаутами. Если это невозможно сделать сразу для всех пинов, надо постараться сделать это для наибольшего их числа. Сформулируем такую задачу на языке математики.

Пусть мы имеем  $N$  множеств элементов  $S(1), \dots, S(N)$ . Каждое множество  $S(i)$  состоит из элементов  $e(i, 1), \dots, e(i, n(i))$ ,

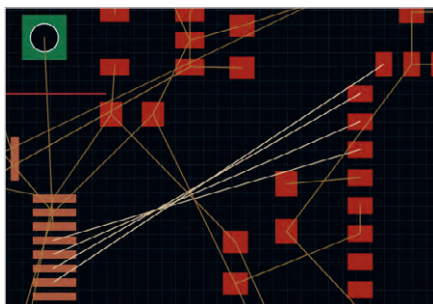


Рис. 14. Пучок из четырёх нетлайнов

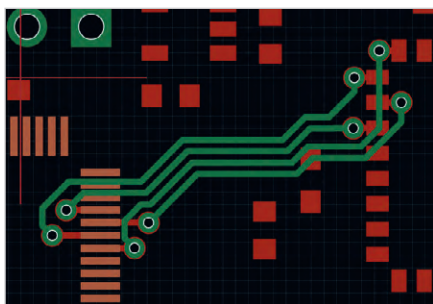


Рис. 16. Разводка четырёх нетлайнов для фанатуов с учётом конфликтов

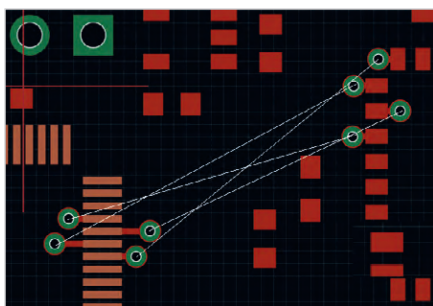


Рис. 18. «Мягкие» конфликты нетлайнов между фанатами

где  $n(i)$  – размер множества  $S(i)$ . Предположим, что имеется булевская функция от любой пары элементов разных множеств:

$$V(e(i,k), e(j,l)) = 0 \text{ или } 1, \text{ где } i \neq j, k = 1, \dots, n(i), l = 1, \dots, n(j).$$

Требуется найти наибольшее семейство элементов из разных множеств (т.е. не более одного элемента из каждого множества) так, чтобы для любой пары таких элементов функция  $V$  принимала значение 0.

В такой постановке множество  $S(i)$  – это набор вариантов фанатуов для  $i$ -го пина, а функция  $V$  на паре фанатуов от разных пинов равна 0, если они не находятся в DRC-нарушении друг с другом.

Разумеется, эту задачу можно решить полным перебором комбинаций. Однако количество комбинаций экспоненциально зависит от  $N$  (даже если размеры множеств ограничены некоторой константой). Задача же

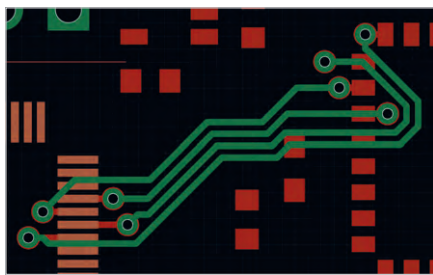


Рис. 15. Разводка четырёх нетлайнов для фанатуов без учёта конфликтов

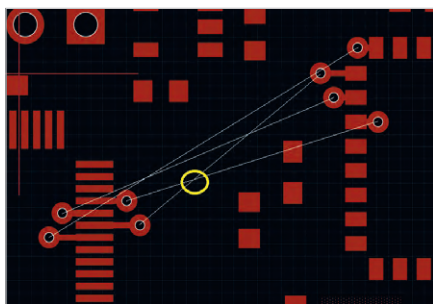


Рис. 17. «Жёсткий» конфликт нетлайнов между фанатами

поиска максимального совместимого набора, в свою очередь, имеет экспоненциальную сложность от количества комбинаций. Поэтому такой подход не может применяться на практике.

Отметим, что частным случаем этой задачи является «задача о максимальной клике»: в заданном графе требуется найти клику (подграф, у которого любая пара вершин соединена ребром) максимального размера. Действительно, если у каждого пина (= вершины графа) имеется только один вариант фанатуов, мы соединяем его ребром с другим пином, если функция  $V$  равна 0 на этой паре фанатуов. Тогда клика – это семейство пинов с фанатуами без нарушений DRC.

### Применения к постановке фанатуов

Поскольку даже задача о максимальной клике является NP-полной, у нас нет эффективного решения более общей задачи с гарантированно максимальным количеством. Однако нетрудно написать алгоритм, который почти всегда (или достаточно часто) находит оптимальное решение. При этом основные вычисления придутся на расчёт функции  $V$ , т.е. наличие DRC-нарушения между двумя фанатами. Этот расчёт квадратично зависит от  $N$  (если количество вариантов для одного пина ограничено некоторой константой).

Приведём примеры построения фанатуов с использованием нашего подхода. На рис. 12 ниже нам удалось построить на 2 фанатуа больше, чем на рис. 4 с использованием паттернов. На рис. 13 все наши фанатуы состоят из прямых коротких треков, что предпочтительнее, чем разводка с помощью паттернов на рис. 5.

Заметим, что оптимальное решение не обязано быть единственным, и мы можем его улучшать, используя другие параметры. Например, мы можем:

- минимизировать суммарную длину фанатуов;
- минимизировать суммарный штраф за «плохое» пад-энтри;
- минимизировать суммарный штраф за несимметричность дифпарных фанатуов и т.д.

Это делается путём минимизации соответствующей положительной функции  $F$  на множестве фанатуов. При этом мы меняем варианты фанатуов только для найденного «максимального» набора пинов. Разумеется, при этом мы должны соблюдать главное требование: не создавать DRC-нарушений.

### Применения к эскизному трассировщику пучков

Задача построения фанатуов – неизбежный шаг в рамках развития ЭТП, а именно: пользователь селектирует некоторый набор нетлайнов между пинами и рисует эскиз на каком-то слое ПП. Если все пины находятся на этом слое или являются сквозными, можно сразу запускать механизм однослойной трассировки вдоль эскиза. Если же какие-то пины на слое эскиза отсутствуют, нам требуется вначале построить фанатуы для таких пинов. При этом оказалось, что можно решить более общую проблему, описанную выше. Однако в приложении к ЭТП задача имеет свою специфику. Например, появляются дополнительные требования к семейству фанатуов:

- желательно, чтобы фанатуы по возможности были направлены в сторону эскиза;
- желательно «распутать» имеющиеся конфликты между нетлайнами;
- желательно не создавать конфликты внутри каждой дифпары.

Прокомментируем последние два пункта с помощью рис. 14. Предположим, что нам надо развести пучок из 4 нетлайнов между SMD-пинами на слое

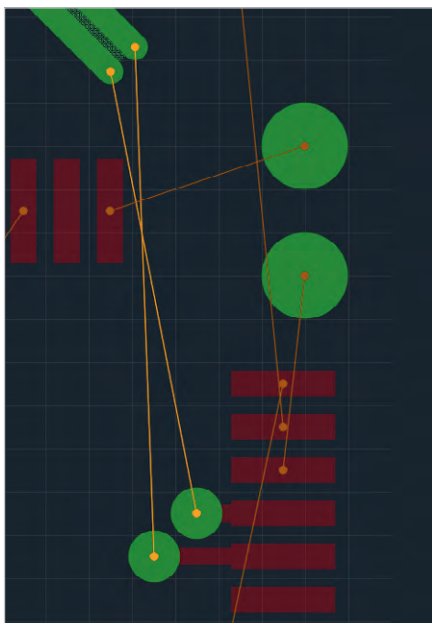


Рис. 19. Конфликт дифпарных нетлайнов от фанатуов

Тор напрямую (т.е. без эскиза) на слое Bottom (заметим, что на слое Top полная однослойная трассировка напрямую невозможна из-за противоположного порядка пинов на концах нетлайнов).

Если не учитывать специфику ЭТП и просто создать фанатуы для 8 пинов, мы получим разводку, как на рис. 15.

Картинка стала бы более красивой (а суммарная длина трексов меньше), если расставить фанатуы по-другому (рис. 16).

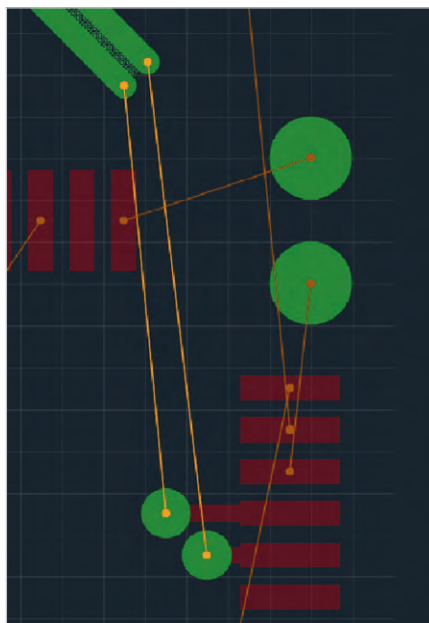


Рис. 20. Удачная расстановка дифпарных фанатуов

Качество построенных фанатуов для однослойной трассировки можно оценить, если нарисовать нетлайны между ПО на двух конфигурациях (рис. 17 и 18).

При однослойной трассировке напрямую желательно, чтобы семейство нетлайнов было более-менее параллельным, хотя допускаются незначительные («мягкие») конфликты. В первой конфигурации имеется «жесткий» конфликт двух нетлай-

нов, обозначенный жёлтым овалом. Условно говоря, здесь это означает, что данную пару нельзя развести двумя монотонными по всем направлениям треками даже при игнорировании других объектов ПП.

Попарную конфликтность нетлайнов можно оценить численно по отношению к любому эскизу, и тогда при расстановке фанатуов можно минимизировать их суммарную величину.

Это же относится и к построению дифпарных фанатуов. Очевидно, что для прямой доразводки дифпары из двух вариантов фанатуов (рис. 19 и 20) на нижнем конце предпочтительнее второй.

### Литература

1. Ch. Pfeil. BGA Breakouts and Routing: Effective Design Methods For Very Large BGAs. CreateSpace, 2008, 188 pages.
2. Кноп К., Лузин С., Лузин М., Сорокин С., Лячек Ю. Расстановка фанатуов в области BGA с нерегулярным расположением контактов // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 4. С. 31–34.
3. Грачёв В., Гладкевич А., Сорока Д., Тимасов Д., Елисеев М., Старков А. «Трассировка пучка трексов» – инструмент для творчества // Современная электроника. 2025. № 9. С. 28–31.



## НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

### ChatGPT усилит контроль за радикальным контентом пользователей

Искусственный интеллект ChatGPT может получить новые функции для выявления пользователей с признаками радикальных взглядов и перенаправления их к специализированным системам взаимодействия. Об этом сообщает Reuters со ссылкой на участников проекта.

Инициатива направлена на снижение рисков, связанных с онлайн-радикализацией, и развивается на фоне роста числа судебных разбирательств, затрагивающих ответственность цифровых платформ за пользовательский контент. Ключевым разработчиком решения выступает новозеландская компания ThroughLine, сотрудничающая с OpenAI, Anthropic и Google.

Текущая специализация ThroughLine – обнаружение кризисных сигналов в пользовательских запросах. Система уже способна выявлять признаки суицидальных мыслей,

домашнего насилия и расстройств пищевого поведения, после чего перенаправляет пользователя к профильным службам помощи. Новый этап развития предполагает расширение функциональности на случаи потенциальной радикализации.

Партнёром проекта выступает The Christchurch Call – международная инициатива по противодействию распространению экстремистского контента в Интернете, созданная после стрельбы в Крайстчёрче. Организация будет предоставлять экспертную поддержку при анализе потенциально опасных запросов.

В рамках новой архитектуры ThroughLine планирует разработать специализированный чат-бот для оперативного реагирования на выявленные риски. Предполагается, что система будет не только ограничивать распространение вредоносного контента, но и предлагать пользователям альтернативные, более безопасные сценарии взаимодействия.



Инициатива отражает более широкий тренд в индустрии искусственного интеллекта, где разработчики усиливают механизмы превентивной модерации и внедряют инструменты раннего выявления потенциально опасного поведения пользователей.

## НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

### TSMC переносит передовые техпроцессы в Японию: к 2028 году – запуск 3-нм производства

Япония усиливает позиции в глобальной полупроводниковой гонке: TSMC планирует развернуть массовое производство 3-нм чипов на втором заводе в стране к 2028 году. Этот шаг знаменует переход от «зрелых» техпроцессов к передовым узлам и отражает растущую стратегическую роль Японии в цепочках поставок микроэлектроники.

#### Переход к передовым нормам

Новый завод будет выпускать до 15 000 кремниевых пластин диаметром 300 мм ежемесячно с использованием 3-нм техпроцесса – одного из наиболее продвинутых, доступных для коммерческого производства. Для сравнения, действующее предприятие TSMC в Японии, запущенное в 2024 году, сосредоточено на узлах 40 нм, 28 нм и 12/16 нм.

Таким образом, речь идёт о качественном скачке: локализация производства передовых чипов в Японии ранее не была характерна для стратегии компании.



#### Инвестиции и промышленный альянс

Проект реализуется через совместное предприятие Japan Advanced Semiconductor Manufacturing, созданное при участии Sony Group. Позднее к числу инвесторов присоединились Denso и Toyota Motor Corporation.

Совокупные инвестиции TSMC в два японских завода уже превышают 20 млрд долларов. Стоимость второго предприятия, по оценкам, может достигать около 17 млрд долларов, что делает его одним из крупнейших промышленных проектов в стране.

#### Ставка на ИИ и автопром

Запуск 3-нм производства ориентирован на удовлетворение спроса со стороны наиболее быстрорастущих сегментов: искусственного интеллекта, автомобильной электроники и потребительских устройств.

Особенно показательно участие Toyota Motor Corporation и Denso – автопром всё активнее зависит от передовых полупроводников, включая решения для автономного вождения, ADAS-систем и электромобилей.

#### Геополитика чипов

Расширение присутствия TSMC в Японии укладывается в глобальный тренд диверсификации производства и снижения рисков,

связанных с концентрацией мощностей в отдельных регионах.

Для Японии это часть системной стратегии по восстановлению национальной полупроводниковой отрасли и снижению зависимости от внешних поставщиков. На фоне усиливающейся конкуренции за доступ к передовым техпроцессам страна стремится вернуть себе статус одного из ключевых технологических центров.

С учётом параллельных инициатив, включая проекты Rapidus по разработке 2-нм и более тонких норм, формируется новая индустриальная архитектура, в которой Япония может занять роль одного из узлов глобального производства чипов следующего поколения.

### Редкоземельный прорыв: в России упростили производство критических материалов для электроники

Российские учёные предложили новые энергоэффективные технологии получения соединений редкоземельных металлов, способные существенно снизить себестоимость и экологическую нагрузку производства. Разработки, созданные в НИТУ МИСИС, уже запатентованы и рассматриваются как база для масштабирования в промышленности.

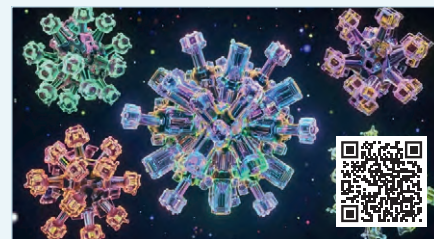
#### Ускорение химии: в разы быстрее и чище

Речь идёт о двух ключевых процессах: получении карбоната неодима и диоксида церия, широко используемых в электронике, энергетике и оптике.

В первом случае учёные предложили метод осаждения карбоната неодима из концентрированных азотнокислых растворов с применением насыщенных углеаммонийных солей. В отличие от традиционных подходов, технология не требует длительной перекристаллизации и нагрева. Это позволило увеличить производительность примерно в 10 раз и сократить объём отходов минимум в пять раз.

Карбонат неодима является стратегическим промежуточным продуктом: из него получают материалы для сверхсильных магнитов, применяемых в электродвигателях, ветрогенераторах и электронной технике.

Вторая разработка касается получения диоксида церия. Учёные предложили использовать СВЧ-нагрев суспензии карбоната церия, что позволяет заменить многочасовое прокаливание обработкой длительностью всего 1–2 минуты. При этом исключаются стадии промывки и сушки, а итоговый порошок приобретает сферическую форму с высокой долей мелкодисперсных частиц – критически важное свойство для высокоточной полировки стекла и дисплеев.



### Технологический разрыв и шанс на догоняющее развитие

Несмотря на значительные запасы редкоземельных металлов, Россия пока существенно уступает мировым лидерам по уровню их переработки. По оценкам, на страну приходится около 17% мировых запасов РЗМ (около 28,5 млн тонн), однако доля в глобальном производстве составляет менее 1%.

Абсолютным лидером остается Китай, контролирующий около 70% добычи и более 85% поставок переработанных редкоземельных материалов. Это формирует устойчивую зависимость глобальных цепочек поставок от китайской переработки.

На этом фоне разработки НИТУ МИСИС выглядят как попытка сократить технологический разрыв за счёт повышения эффективности базовых химико-технологических операций. Упрощение процессов, снижение энергозатрат и отходов напрямую влияют на экономику производства и его масштабируемость.

#### Индустриальный контур: ставка на Арктику

Параллельно с научными инициативами формируется и промышленная инфраструктура. В частности, власти Мурманской области прорабатывают создание специализированного индустриального парка по переработке редкоземельных металлов.

Арктическая зона России играет ключевую роль в отрасли: на неё приходится до 97% разведанных запасов и фактически вся добыча РЗМ в стране. Создание перерабатывающих мощностей вблизи сырьевой базы может снизить логистические издержки и ускорить формирование полного производственного цикла.

#### Перспективы внедрения

Эксперты отмечают, что предложенные методы обладают высокой конкурентоспособностью за счёт технологической простоты и ресурсной эффективности. При успешной индустриализации они могут стать основой для развития отечественной цепочки производства материалов для электроники – от сырья до конечных компонентов.

В условиях глобальной конкуренции за редкоземельные ресурсы и растущего спроса со стороны ИИ, энергетики и микроэлектроники такие решения становятся не просто научным достижением, а элементом технологического суверенитета.

# Телевизор с электронно-лучевой трубкой: разработки С.И. Катаева и их значение

Вадим Экземплярский

«...Наступит время... когда миллионы таких приборов, таких "электрических глаз" будут всесторонне обслуживать общественную и частную жизнь, науку, технику и промышленность...»

Б. Розинг

Семён Исидорович Катаев (1904–1991 гг.), советский учёный и изобретатель в области телевидения, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники – незаслуженно обделён вниманием популяризаторами истории электроники и телевидения в нашей стране. Тем не менее И.С. Катаев внёс значительный вклад в развитие инженерной мысли в СССР при разработке и усовершенствовании электронно-лучевых трубок (ЭЛТ), ставших на многие годы ключевой технологией, лежащей в основе экранов телевизоров и оборудования различного назначения. Катаев дополнил изобретение Зворыкина и по праву может считаться ещё одним «отцом» отечественного телевидения. В найденных документах роль Катаева прослеживается чётко, и в статье мы хотим это показать.



Рис. 1. Семён Исидорович Катаев, доктор технических наук, 1937 год

## Соревнование профессионалов на первенство изобретений

Среди историков радио, телевидения и электроники специалисты до сих пор спорят о первенстве изобретения телевидения и передающих изображение трубок. Буквально: кто первый создал ЭЛТ: Зворыкин или Катаев? Или, может быть, первооткрывателем был **Борис Львович Розинг** (1869–1933 гг.)? О **Владимире Козьмиче Зворыкине** (1888–1982 гг.) наш журнал писал в [7].

Российский физик, учёный, автор первых опытов в области передачи телевизионного сигнала на расстояние, Б.Л. Розинг в 1907–1908 годах сразу в нескольких странах подал заявки на авторское изобретение «Способ электрической передачи изображений на расстояние». Розинг сам изготовил и опробовал предложенное устройство в работе. В России заявка представлена 25 июля 1907 года, в Германии – 26 ноября, в Англии – 13 декабря того же года; патенты Б.Л. Розинг получил в Англии 25 июня 1908 года (№ 27570), в Германии – 24 апреля 1909 года (№ 209320), в России – 30 октября 1910 года (№ 18076). Розинг – автор как приёмной, так и передающей системы аппарата «Телефот». Об изобретениях и научных работах Б.Л. Розинга наш журнал писал в [1].

Чтобы внести ясность в споры и гипотезы, уместно определить критерии и конкретику: о каких запатентованных изобретениях спорить – а также внимательно проанализировать историю по имеющимся релевантным сведениям. Любопытно, что все патентные заявки очень схожи по названию, но существенно (технически) отличаются по содержанию.

Действительно, патентная заявка от 24 сентября 1931 года **С.И. Катаева** (рис. 1), в которой шла речь об «устройстве для передачи движущихся изображений», на 51 день опередила аналогичную заявку Зворыкина. Это первенство легко проверить [2].

## Вехи образования и научного пути

Семён Исидорович Катаев (1904–1991 гг.), родился в многодетной семье донских казаков. В 16-летнем возрасте он отправился в Ростов-на-Дону для продолжения образования. Там получил рекомендацию для поступления в Москву, где был зачислен на рабочий факультет, а затем поступил в Московское высшее техническое училище (МВТУ) на электротехнический факультет. В 1929 году молодой специалист успешно окончил МВТУ, получив диплом инженера-электрика по специальности радиотехника, и в воз-

расте 25 лет начал работать во Всесоюзном электротехническом институте (ВЭИ) под руководством известного радиофизика **Бориса Александровича Введенского**. Оба активно занимались исследованиями в области телевидения и радиосвязи. В 1929 году Катаев подал патентную заявку на «Устройство для электрической телескопии в натуральных цветах», что стало одним из первых шагов в направлении разработки цветного телевидения. Но с авторством Катаева это был лишь один из нескольких патентов на рубеже 30-х годов XX века. На рис. 2 и рис. 3 показаны скриншоты патента об авторском изобретении С.И. Катаева.

В пояснительной записке к патентной заявке В.К. Зворыкина от 13 ноября 1931 года «Метод и аппарат для производства изображений объектов» сказано, что «изобретение заключается в усовершенствовании методов и аппарата для получения изображений объектов и явлений, которые невидимы для человеческого глаза». В дальнейшем Зворыкин запатентовал «передающую телевизионную трубку с накоплением электрических зарядов на мозаичном фотокатоде» (иконоскоп), получив соответствующий патент США № 2021907 26 сентября 1935 года.



Рис. 2. Скрин патента на заявку об авторском изобретении С.И. Катаева

К слову, первый фотоэлемент, основанный на внешнем фотоэффекте, в России создал физик **Александр Григорьевич Столетов** (1839–1896 гг.). Его считают основоположником квантовой физики в России. Именно им положено начало передачи фотоизображений на расстояние. Технология, позднее усовершенствованная, получила название «фототелеграф» и быстро нашла применение в уголовном розыске и новостной фотожурналистике, но была неприменима для передачи движущегося изображения из-за инерционности селеновых фотоэлементов. Тем не менее проект селеновой передающей камеры был предложен и реализован ещё в 1880 году Джорджем Кэри.

Описание принципа работы передающей телевизионной трубки Катаева с накоплением зарядов и мозаичной мишенью с приведённой схемой прошло техническую экспертизу и заслужило авторское свидетельство № 29865, опубликованное 29 апреля 1933 года. В передающей трубке Катаева, получившей наименование «радиоглаз», впервые в мире использовалось явление эмиссии вторичных электронов (рис. 4).

Можно было бы заметить, что Владимир Козьмич Зворыкин был вторым. Но изобретения «конкурентов» не были одинаковы. К слову, Катаев подчёркивал, что считает приоритет В.К. Зворыкина справедливым, так как он проистекает фактически не из патентной заявки от ноября 1931 года, а из работ, выполненных учёным ещё в 1926 году совместно с Б. Розингом [6].

Несмотря на внешнее сходство, изобретения, подтверждённые патентами, имеют принципиальные отличия. Это были два пути в изобретении передающей телевизионной трубки. В сравнении иконоскопа Зворыкина и «радиоглаза» Катаева структура, техническая компоновка устройств и внешний вид различны.

На рис. 4 представлена схема «радиоглаза» – передающей телевизионной трубки С.И. Катаева, сканированная из его патента. На схеме слева цифрами обозначены:

- 2 – слой изолированных друг от друга частиц фотокатода;
- 3 – положительная обкладка элементарного конденсатора;
- 4 – сплошной проводящий электрод, являющийся для всех элементарных

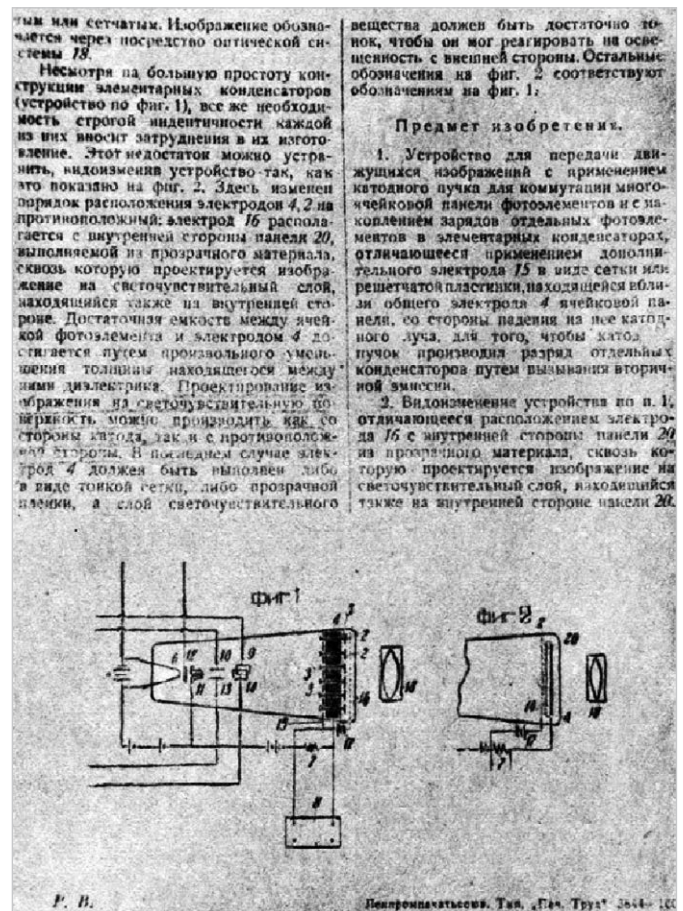


Рис. 3. Оборот патента Катаева со схемой трубки «радиоглаза»

конденсаторов 3 отрицательной обкладкой;

- 5 – изолированные пруттики (ленточки);
- 6 – катод;
- 7 – сопротивление, с которого снимается телевизионный сигнал;
- 8 – входной усилитель;
- 9, 10, 11, 12, 13, 14 – электроды, которые служат для управления электронным пучком и регулирования его интенсивности;
- 15 – дополнительный электрод;
- 16 – электрод, служащий для удаления пространственного заряда;
- 17 – батарея;
- 18 – оптическая система.

На схеме справа введены следующие обозначения:

- 2 – слой изолированных друг от друга частиц фотокатода;
- 4 – сплошной проводящий электрод;
- 7 – сопротивление, с которого снимается телевизионный сигнал;
- 16 – электрод, служащий для удаления пространственного заряда;
- 18 – оптическая система;
- 20 – тонкий слой изоляционного материала.

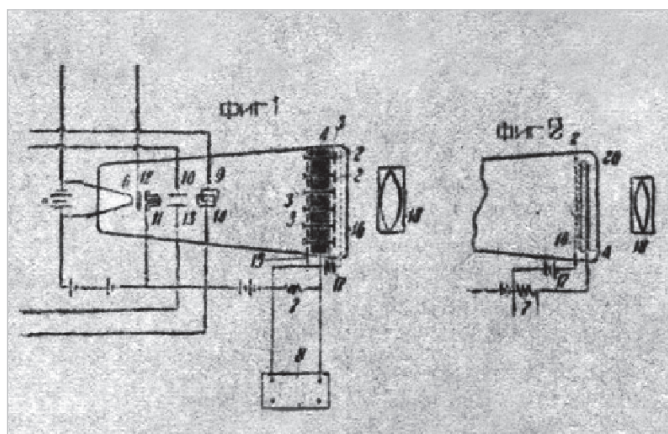


Рис. 4. Схема «радиоглаза» С.И. Катаева, сканированная из его патента

Ещё в 1923 году общий учитель обоих талантливых изобретателей **Борис Львович Розинг** в работе «Электрическая телескопия» отметил пользу безынерционных электрических устройств в телескопах вместо инертных механизмов. «Катодный пучок, – писал Б.Л. Розинг, – есть именно то идеальное безынертное перо, которому природой уготовано место в аппарате получения изображения в электрическом телескопе. Оно обладает тем ценнейшим свойством, что его можно непосредственно двигать с какою угодно скоростью при помощи тоже нематериального электрического или магнитного поля, могущего быть притом возбуждённым со скоростью света с другой станции, находящейся на каком угодно расстоянии» [2].

### Концепции и технические особенности

За первенство боролись учёные и исследователи нескольких разных концепций передачи светового пучка внутри ЭЛТ. После появления обоснованной концепции Розинга попытки использования электронно-лучевых трубок предпринимались в разных странах. С середины 1930-х годов получил большое распространение такой способ, как магнитная фокусировка луча. В 1930 году советский физик **А.П. Константинов** предложил оригинальный проект электронно-лучевой трубки для передачи изображения. С.И. Катаев во Всесоюзном Электротехническом институте в Москве предпочёл разработку высоковакуумной низковольтной телевизионной трубки с магнитной фокусировкой другим вариантам и считал её перспективной, вопреки мнению ряда специалистов.

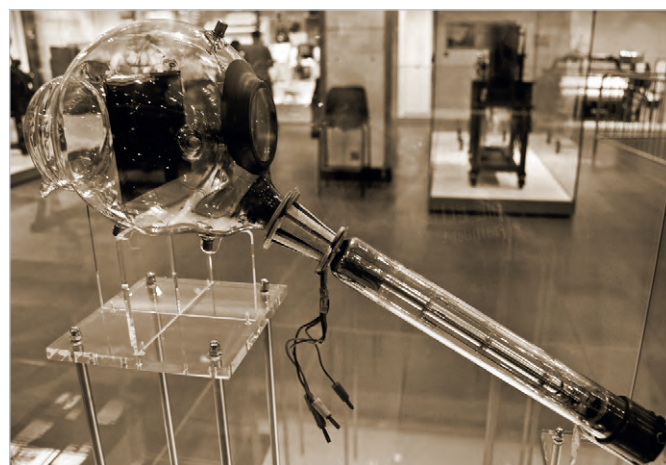


Рис. 5. Усовершенствованный иконоскоп В.К. Зворыкина

Множество исследовательских работ по той же теме в период с 1925 по 1932 годы опубликовано в Германии. Германские учёные сделали ЭЛТ с газовой фокусировкой, отчасти более удобной, но не способной обеспечить в будущем высокое качество телевизионного изображения.

В.К. Зворыкин, испытавший трубки с газовой фокусировкой, воспринял работу и заповедь Розинга буквально, он разрабатывал ЭЛТ с электростатической фокусировкой. В отличие от электростатической, магнитная фокусировка луча не требовала регулировки анодного напряжения для смещения фокуса. Фокусирование электронного пучка выполнялось с помощью электростатического поля, образуемого приложенными потенциалами между частями прожектора, а также между торцевым выводом прожектора и металлизированной поверхностью стеклянной трубки [3].

В связи с большим диаметром фокусирующей электромагнитной катушки, по сравнению с диаметром электродов электростатической линзы, преимуществом магнитной фокусировки являлся меньший размер электронного пятна на экране. Электронная пушка при магнитной фокусировке обеспечивает больший ток пучка в сравнении с пушкой, имеющей электростатическую фокусировку. В первом варианте анод не имеет диафрагмы, и для формирования пучка используется весь ток катода, а не его часть, как в пушках с электростатической фокусировкой.

14 августа 1933 года В.К. Зворыкин выступил в научно-техническом обществе электриков в Ленинграде с докладом о принципе работы устройства электростатической фокусировки в иконоскопе. С его выводами согласились

большинство учёных. Было очевидно, что электростатическая фокусировка экономична, не требует большой мощности на создание тока в фокусирующей катушке. А при магнитной фокусировке для создания ЭМ-поля катушке требуется относительно большая мощность.

Вместе с тем устройства с принципом магнитной фокусировки имеют простую конструкцию трубки в сравнении с электростатической, созданной Зворыкиным, так как посредством ЭМ-катушек фокусирующая система расположена снаружи трубки, а не монтируется внутри, в вакууме. Это привело к значительному уменьшению длины и объёма ЭЛТ [8].

Существенным и признанным недостатком иконоскопа Зворыкина стал эффект «чёрного пятна», возникавший из-за перераспределения вторичных электронов и неравномерности электрического поля на поверхности внутреннего экрана. В результате изображение оказывалось искажённым, выпуклым. Это особенно было заметно при динамично передаваемых сигналах (изображениях). Характер передаваемого изображения влияет на форму сигнала, что не давало избавиться от искажений на передающей трубке. Поэтому в работе первых иконоскопов обязательно участвовал «оператор», обеспечивающий регулировку (подстройку) тока генераторов (рис. 5).

Эффект «чёрного пятна» в первых иконоскопах Зворыкина проявлялся так сильно, что устройство требовало усовершенствования, а именно замещения компенсирующего сигнала в усилительном тракте ЭЛТ. Другим недостатком иконоскопа является трапециевидное искажение раstra, возникающее в связи с наклонным падением луча на внутренний экран (мозаику) [4].



Рис. 6. Приёмная трубка Розинга для «Телефонта», 1907 год

В передающей трубке Катаева эффект чёрного пятна отсутствует. В этом изобретении катодная пушка расположена к мозаичному экрану перпендикулярно, электронный луч воздействует постоянно под одним углом и в итоге не вызывает трапециевидного искажения раstra.

Из теоретической части докторской диссертации С.И. Катаева следует, что в «радиоглазе» световой поток и электронный луч попадают на мозаику с двух противоположных сторон (у Зворыкина с одной стороны – от одного источника) [5].

Расположение катодной пушки в «радиоглазе» признано оптимальным и использовалось уже во всех последующих передающих телевизионных трубках, кроме иконоскопа и супериконоскопа.

Изобретение Семёна Катаева, шедшего параллельным (относительно Зворыкина) инженерным путём, явилось своевременным усовершенствованием перспективных идей Зворыкина. И поэтому обоих конструкторов, а также их предтечи – профессора Б. Розинга уместно считать стоящими у истоков телевидения с передачей световых пучков через ЭЛТ (рис. 6).

Зворыкин последовательно продолжал разработки, начатые ещё совместно с Розингом, отталкивающимися в теории от передатчика механического типа на основе диска Нипкова. Развёртку изображения в «механическом телевидении» впервые предложил немецкий изобретатель Пауль Нипков в 1884 году. Диск имеет ряд отверстий, расположенных по спирали. К нему прилагался винт для механической развёртки (рис. 7).

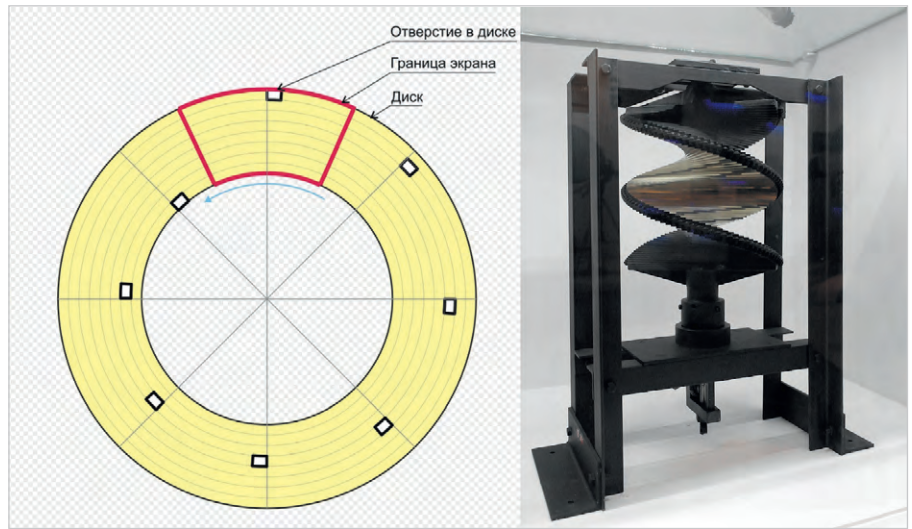


Рис. 7. Схема механического телевидения с диском Пауля Нипкова и винтом для механической развёртки

Такова была заря телевидения, пока ещё медленного, механического, несовершенного, требующего обязательного участия людей-операторов.

Зворыкин последовательно изобрёл приёмную трубку, а затем передающую. Катаев, как теоретик, создал сначала передающую трубку, а затем – приёмную.

6 ноября 1932 года во Всероссийском Электротехническом институте впервые публично продемонстрированы возможности «радиоглаза» с магнитной фокусировкой луча как элемента системы электронного телевидения. Причём передача изображений с помощью световых сигналов и ЭЛТ сразу предполагалась беспроводным способом. Однако до 1931 года никакого телевидения, кроме механического на основе диска Нипкова, не было.

Принципы замедленного (малокадрового) телевидения, разработанные и опубликованные И.С. Катаевым в 1934 году, нашли применение в будущем в системах дальней передачи телесигналов с бортов космических кораблей и автоматических станций. В 1944 году Катаев с группой единомышленников впервые в мире предложил стандарт телевизионного вещания на 625 строк, принятый в дальнейшем во многих странах. Но только в конце 1970-х годов XX века была создана передающая телевизионная трубка с электростатической фокусировкой, которая по качеству не уступала магнитной.

Талантливый русский учёный, доктор технических наук, Семён Исидорович Катаев всю жизнь прожил в своём Отечестве, работал в своей альма-матер в МТУСИ, умер в Москве в

июле 1991 года в возрасте 87 лет и оставил потомкам – историкам электроники обширное интеллектуальное наследие. Сейчас, уже в XXI веке, мы воздаём ему заслуженные почести.

## Литература

1. Бартенев В. Россия – родина электронного телевидения. К 150-летию со дня рождения Б.Л. Розинга // Современная электроника. 2019. № 5. URL: <https://www.cta.ru/articles/soel/2019/2019-3/120113/>.
2. Аладин В.М. Сопоставление истории двух изобретений: радиоглаза И.С. Катаева и иконоскопа В.К. Зворыкина. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sopostavlenie-istorii-dvuh-izobreteniy-radioglaza-s-i-kataeva-i-ikonoskopa-v-k-zvorykina/pdf>.
3. Зворыкин В.К. Патент США № 2021907 «Метод и аппарат получения изображения объектов» от 26 ноября 1935 года.
4. Зворыкин В.К. Телевидение при помощи катодных трубок. Л., 1933.
5. Катаев С.И. Авторское свидетельство № 29865 «Устройство для передачи движущихся изображений» от 30 апреля 1933 года.
6. Катаев С.И. Вклад современных учёных в развитие телевидения // Радио. № 5. 1948. С. 14–17.
7. Кашкаров А. Изобретатель Зворыкин. История становления и достижений российской и мировой электроники // Современная электроника. 2026. № 1. С. 22–26.
8. Радиоглаз Катаева и иконоскоп Зворыкина. URL: <https://alternathistory.ru/radioglaz-kataeva-i-ikonoskop-zvorykina/>.



# К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Часть 4. История возникновения концепции поляритонов

Виктор Алексеев

В прошлом году в журнале «Современная электроника» были опубликованы три статьи, посвящённые юбилею выдающегося российского физика-теоретика Игоря Евгеньевича Тамма (СОЭЛ № 7–9, 2025). В частности, были описаны современные быстродействующие электрооптические модуляторы, поверхностные состояния Тамма, запрещённые фотонные зоны и фотонные кристаллы. В этих статьях умышленно не затрагивались темы поляритонов, оптических состояний Тамма (ОСТ) и плазмон-поляритонов Тамма (ППТ). Поскольку ключевой вклад в раннюю разработку этих явлений в основном принадлежит российским учёным, целесообразно посвятить их открытию более подробные отдельные статьи. Ниже рассмотрены два основных типа гибридных фотонных частиц: экситон-поляритоны и фонон-поляритоны.

## Фононы и экситоны

Прежде чем перейти к описанию поляритонов, имеет смысл напомнить, что представляют собой три базовые квазичастицы, которые мы будем использовать в этой статье. Под термином «квазичастица» (Quasiparticle – QP) в том смысле, в котором его ввёл Лев Давидович Ландау [1], подразумевается некоторая математическая абстракция, обладающая свойствами множества частиц микромира, которая вводится в квантовой механике при решении системы уравнений, описывающих поведение этого множества. С этой точки зрения QP позволяет

отвлечься от конкретных физических свойств индивидуальной частицы и рассматривать их коллективное поведение и свойства как качества единого объекта. Современный математический аппарат и вычислительные мощности в принципе не позволяют решить систему точных уравнений, описывающих поведение элементарных частиц с учётом всех существующих в микромире взаимодействий. Вместо этого используется одно уравнение, записанное для квазичастицы.

Придерживаясь хронологии развития событий, рассмотрим первую интересующую нас квазичастицу,

характеризующую колебания кристаллической решётки, получившую современное название «фонон».

Идея квантованных колебаний кристаллической решётки впервые возникла в опытах столбов российской физики Г.С. Ландсберга и Л.И. Мандельштама по комбинационному рассеянию света в кристаллах. В 1928 году они обнаружили сдвинутые спектральные линии, соответствующие обмену энергией между светом и колебаниями решётки [2].

В 1930 году Игорь Тамм для описания квантов колебаний ионов кристаллической решётки использовал понятие акустических квантов в твёрдом теле, которые представляли собой наименьшие порции вибрации ионов кристаллической решётки. Тамм назвал их «квантами упругости – Elastische Quanten» (современное название – акустические кванты) [3].

Однако возникновение самого этого термина обычно связывают с работой советского физика-теоретика Якова Ильича Френкеля, в которой для описания квазичастиц звуковых волн он впервые использует термин «фонон»: «...which we shall call phonons» [4].

Впоследствии термин «фонон», обозначающий квант колебаний кристаллической решётки, закрепился в современной научной литературе. Фонон описывает нормальные моды колебаний атомов в твёрдых телах и имеет корпускулярно-волновой дуализм.

Существует два типа фононов (рис. 1).

Акустические фононы представляют собой низкоэнергетические колебания, при которых атомы в кристаллической решётке колеблются синхронно, создавая волны, которые переносят энергию из одной части материала в другую. Эти фононы характерны для материалов с высокой теплопроводностью (металлов).

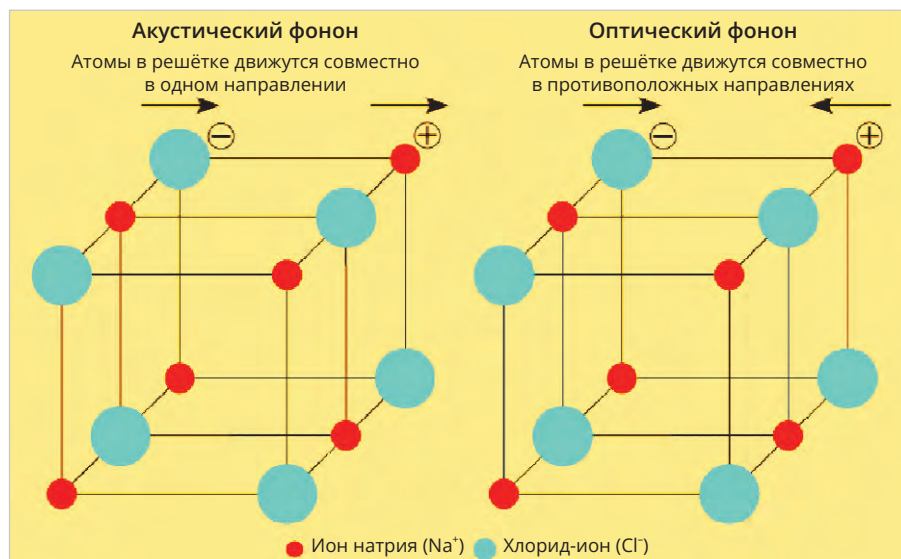


Рис. 1. Существует два типа фононов: оптические и акустические [5]

Оптические фононы характеризуются высокоэнергетическими колебаниями в материалах, в которых кристаллическая структура содержит несколько типов атомов на элементарную ячейку, таких, например, как ионные кристаллы типа NaCl. Когда свет падает на оптические фононы, они могут поглощать определённые частоты.

Количественное подтверждение фононной модели было получено в экспериментах Б.Н. Брокхауза в 1955 году с использованием метода неупругого рассеяния нейтронов, позволившего непосредственно измерить нормальные моды колебаний кристалла [6].

Необходимо подчеркнуть, что экспериментальное подтверждение существования любых квантовых объектов, включая квазичастицы, в строгом смысле всегда носит косвенный характер. Эксперимент непосредственно регистрирует не «частицу как таковую», а предсказанные теорией измеримые эффекты, такие, например, как спектральные линии, сдвиги частот, законы дисперсии, особенности рассеяния и т.д. При этом результат переходит в разряд надёжного научного факта только тогда, когда он воспроизводится в той же или эквивалентной постановке в других лабораториях.

Другой необходимый нам термин «экситон» также возникает в работах Я.И. Френкеля как нейтральный квант электронного возбуждения кристалла – «волна возбуждения», переносящая энергию по решётке без переноса электрического заряда. В своей ставшей классической двухтомной монографии «Волновая механика» Френкель заложил основы волновой теории элементарных частиц. Здесь он использовал уравнение Шрёдингера как основной закон динамики микрочастиц в состояниях волновых функций. Разработанная Френкелем модель экситона во многом остаётся неизменной и в наши дни [7].

Современная физика определяет экситон как квазичастицу, возникающую в полупроводнике или диэлектрике при возбуждении электрона из валентной зоны на энергетически более высокий уровень в проводящую зону. Здесь электрон также выступает в роли квазичастицы, обладая «эффективной массой». В свою очередь, «дырка» – это абстракция, описывающая незаполненную валентную связь, про-

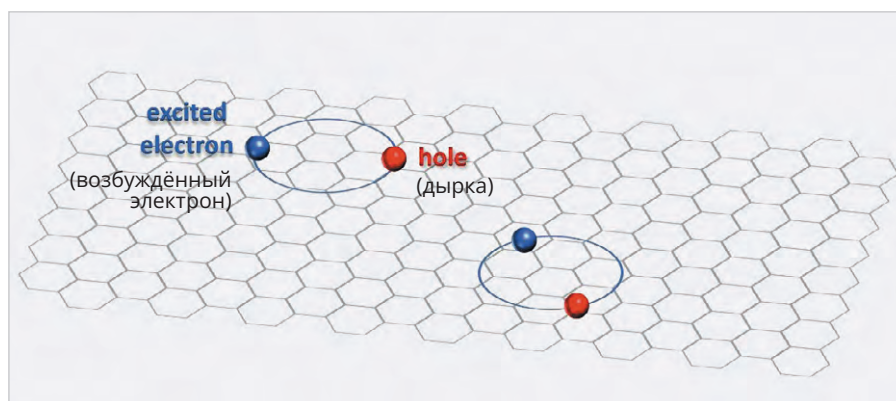


Рис. 2. Упрощённая схема модели экситона как связанной пары электрон-дырка [8]

являющую себя как положительный заряд, по абсолютной величине равный заряду электрона.

Модель экситона можно условно представить себе в виде системы из связанной пары, состоящей из отрицательно заряженного электрона и положительно заряженной дырки (рис. 2).

В отличие от свободных электронов, экситон не переносит заряд, так как он нейтрален (электрон и дырка компенсируют друг друга). Он просто перемещает энергию возбуждения по кристаллу.

Понять смысл абстракции такой связанной пары можно на простом примере. Допустим, в кинотеатре человек встал и ушёл с очень удобного места. Образовалось пустое кресло. На него пересел другой зритель с неудобного для него кресла. Образовалось другое свободное кресло. Однако на новое свободное кресло пересел человек, занимавший плохое кресло в последнем ряду. Несмотря на то что конкретного пронумерованного объекта «пустое место» не существует, в реальном движении системы «зрители – посадочные места» оно ведёт себя как самостоятельный переносимый объект. Это похоже на ситуацию в кристалле, когда электрон покидает валентную зону. Оставленное им незаполненное состояние удобно описывать как «свободное место – дырку» с положительным зарядом. При этом в реальном эксперименте можно зарегистрировать не саму дырку как таковую, а те изменения, которые произошли в системе в результате ухода электрона, например, проводимость, оптическое поглощение, эффект Холла и другие измеряемые величины.

Экситон является квазичастицей, но при этом он формально может быть отнесён к классу бозонов, которые определяются как частица со спином,

равным целому числу. Это связано с тем, что экситон состоит из двух фермионов: электрона и дырки с суммарным спином  $(1/2+1/2)$ .

Важно отметить, что время жизни экситона обычно не превышает 10 нс. По истечении этого времени электрон и дырка рекомбинируются, и экситон передаёт свою энергию кристаллической решётке или излучает квант света (фотон).

В середине 1950-х годов Евгений Фёдорович Гросс в ленинградском ФТИ имени А.Ф. Иоффе исследовал тонкую структуру оптического поглощения в кристаллах  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Известно, что если в кристалле есть связанный электрон-дырочный комплекс, то энергия его уровней квантована, и в спектре поглощения появляются узкие линии, характерные для экситона. Именно такие узкие линии поглощения, соответствующие «главной серии» уровней связанного состояния электрон-дырка, зафиксировал Евгений Гросс, что было одним из первых убедительных экспериментальных подтверждений модели экситона, описанной Френкелем [9].

Более подробное описание экситонов можно найти в работе [10].

## Поляритоны

Известный советский физик Кирилл Борисович Толпыго теоретически предсказал существование гибридных состояний, возникающих при взаимодействии электромагнитных волн с вибрациями ионной кристаллической решётки. В своей работе для описания связанных состояний фотонов и оптических фононов К.Б. Толпыго использовал термин «световые экситоны». Здесь он впервые вывел уравнения, описывающие спектр этих гибридных структур в рамках классической теории ионных кристаллов. Полный

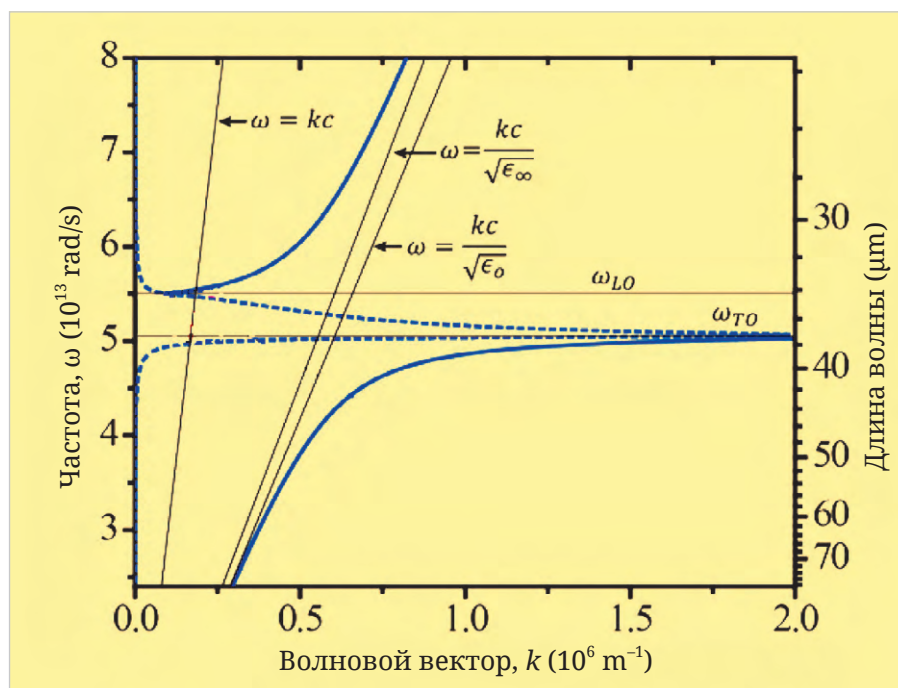


Рис. 3. Пример дисперсии фононного поляритона вблизи полосы Reststrahlen Band для GaAs

текст доступен в архивах РАН и библиотеке «Института физики поверхности» [11].

Эта работа К.Б. Толпыго, опубликованная в 1950 г., послужила в качестве отправной точки для теории поляритонов, разработанной Джоном Хопфилдом в 1958 г. В своей теории Д. Хопфилд рассмотрел квантовое поле, создаваемое экситоном, которое может принимать «поляризационную» конфигурацию, способную смешиваться с фотонным полем. Минимальные неделимые частицы (кванты) такого «поляризационного поля» Хопфилд назвал «Polaritons». Таким образом, только в 1958 году впервые появился термин «поляритон» [12], поэтому в хронологическом описании оригинальных работ, опубликованных до 1958 года, мы не будем его использовать.

Возвращаясь к работам К.Б. Толпыго, отметим, что он пытался объяснить, почему в некоторых ионных кристаллах, таких, например, как NaCl, KCl, KBr, LiF, свет ведёт себя необычно. Результаты многочисленных экспериментов показывали, что в инфракрасном диапазоне спектры отражения и поглощения таких кристаллов содержат особую область очень сильного отражения, получившую название «Reststrahlen Band» [13].

Частотный диапазон Reststrahlen (от нем. Rest – остаток, Strahlen – излучение) – это диапазон частот в инфракрасной области спектра, где кристалл

почти полностью отражает падающее излучение и почти не пропускает его.

С физической точки зрения это узкая область частот между поперечной и продольной оптическими фононными модами ионного кристалла, в которой электромагнитная волна не может распространяться непосредственно внутри вещества, а превращается практически в поверхностное электромагнитное поле. В этой полосе коэффициент отражения близок к единице, а поглощение и преломление ведут себя аномально.

Это явление нельзя было объяснить ни обычной теорией распространения света, ни моделью независимых колебаний решётки.

В современной физике твёрдого тела Reststrahlen Band определяется как «диапазон частот вблизи резонанса колебаний решётки, где отражательная способность кристалла резко возрастает» [14].

В своих расчётах Кирилл Толпыго исходил из того, что ионы в кристалле могут смещаться и деформироваться, создавая динамическую электрическую поляризацию. Поэтому проходящая через кристалл электромагнитная волна неизбежно начинает взаимодействовать с этими колебаниями. Используя модель относительно смещения ионов в полярном кристалле под действием электрического поля, а также уравнения Максвелла, он обнаружил, что для диапазона в рай-

оне собственных частот колебаний решётки решение уравнений возможно, если вводится новое гибридное состояние, определяющее связанную волну, в которой диэлектрическая проницаемость, электромагнитная волна и фононные колебания необходимо рассматривать совокупно.

Впервые именно Кирилл Толпыго получил дисперсионные соотношения для таких связанных состояний в ионных кристаллах. Таким образом, можно говорить, что в этой статье впервые было теоретически описано явление, которое сегодня известно как фононные поляритоны (Phonon Polaritons) [15].

В упрощённом виде механизм образования фононных поляритонов можно представить себе следующим образом. Свет, попадая в кристалл, начинает «раскачивать» ионы кристаллической решётки. Колеблющиеся ионы, в свою очередь, переизлучают электромагнитное поле. В результате возникает единая гибридная волна, обладающая свойствами как света, так и колебаний решётки.

Независимое подтверждение этой идеи появилось уже через год. Китайский физик Хуан Кунь (Huang Kun) также моделировал взаимодействие длинноволновых колебаний решётки с электромагнитным полем и пришёл к аналогичным выводам [16].

Экспериментальное подтверждение существования фонон-поляритонов было получено в начале 1960-х годов методами инфракрасной и рамановской спектроскопии в ионных кристаллах.

Одними из первых таких экспериментов стали исследования инфракрасных спектров полярных кристаллов, выполненные учёными Шпицером (W.G. Spitzer) и Клейнманом (D.A. Kleinman) [17].

Авторы исследовали инфракрасные полосы в спектрах отражения и пропускания поляризованного света кристаллической решетки α-кварца при 297К. Было показано, что теория дисперсии может аппроксимировать экспериментальные данные в пределах погрешности во всём диапазоне измеренных частот (5–37 мкм). При этом в области Reststrahlen Band вместо простого пересечения фотонной и фононной дисперсий возникает их расщепление (Anticrossing). В результате формируются две новые ветви: верхняя и нижняя поляритонные моды,

разделённые частотным интервалом, где практически не существуют распространяющиеся в кристалле электромагнитные волны.

Типичная дисперсионная зависимость в современной трактовке теории фонон-поляритонов показана на рис. 3 [13]. При взаимодействии электромагнитной волны с оптическим фононом формируются две новые ветви: нижняя и верхняя поляритонные моды, разделённые частотным разрывом.

Две ветви, обозначенные сплошной синей линией, представляют собой действительную часть волнового вектора  $k$ , а пунктирная синяя линия – мнимую часть. Между энергиями фононов  $TO$  и  $LO$  действительная часть волнового вектора не имеет допустимых значений энергии, в то время как мнимая часть заметно больше. Это указывает на то, что фононный поляритон является эванесцентной, нераспространяющейся волной в этой области. При этом действительная диэлектрическая проницаемость материала отрицательна, а мнимая диэлектрическая проницаемость велика, что объясняется сильной связью между светом и колебаниями решётки в ионных кристаллах. Раздвоение дисперсионного спектра и явный разрыв между ними являются одними из базовых характеристик поляритонов.

В современной физике «фононные поляритоны» означают гибриды электромагнитной волны и колебания кристаллической решетки, возникающие при взаимодействии инфракрасного фотона и оптического фонона и сочетающие в себе свойства обеих частиц.

Открытие второго типа гибридных фотонных поляритонов, позже получивших название «экситон-поляритоны», берёт свое начало в 1957 году, когда советский физик-теоретик Соломон Исаакович Пекар в первой редакции своей «Теории электромагнитных волн в кристалле» описал возникновение дополнительных «световых волн», частоты которых были близки к области экситонного поглощения [18]. Через год эта статья была перепечатана в английском варианте в журнале *Journal of Physics and Chemistry of Solids* [19]. Таким образом, эта работа С. Пекара сразу стала известной как в СССР, так и в других странах мира.

Задача Соломона Пекара заключалась в том, чтобы объяснить, что

именно происходит, когда свет начинает резонансно взаимодействовать с электрически нейтральными квазичастицами, представляющими собой связанную кулоновскими силами пару электрон-дырка (экситон).

Оказалось, что в этом случае возникает несколько разных световых волн с одной и той же частотой, но с разными показателями преломления и разной глубиной проникновения. Поэтому в данной ситуации перестают работать обычные уравнения с простой классической формулой диэлектрической проницаемости, которые использовались в то время.

Необходимо было построить теорию взаимодействия электромагнитных волн в кристалле с экситонами, которая учитывала бы пространственную дисперсию и объясняла бы, какие типы волн вообще могут существовать в этой резонансной области.

В своей теоретической модели Соломон Пекар пошёл дальше Кирилла Толпыго, используя уравнения Максвелла с учётом экситонного вклада в поляризацию световых волн. Пекар обнаружил, что одна часть образующихся волн ведёт себя как обычный свет в кристалле, а другая часть может быть описана как некие гибридные волны, где поле и экситонная поляризация неразрывно связаны.

В кристаллооптике конца 1950-х предполагалось, что при прохождении света через кристалл при заданном направлении распространения существуют лишь две поперечные волны, характеризующие обычное двупреломление. Однако С.И. Пекар показал, что в диапазоне частот, близких к экситонному резонансу, такой подход не является оптимальным и необходимо учитывать пространственную дисперсию  $\epsilon(\omega, k)$ , определяющую зависимость диэлектрической проницаемости не только от частоты света, но и от его волнового вектора. В своей модели он учёл макроскопическую поляризацию с помощью тензора, описывающего вклад экситона. Для конечного времени жизни экситона Пекар ввёл в формулу эффективной диэлектрической проницаемости малую мнимую часть. Без учёта вклада экситона уравнения Максвелла дают простое решение квадратного уравнения с двумя корнями (две волны). С учётом вклада экситона вблизи резонансных частот появляются дополнительные корни, соот-

ветствующие добавочным световым волнам. Анализ этих решений показал, что для кристаллов с центром симметрии при определённой поляризации возникают две поперечные волны с одинаковой поляризацией, но разными показателями преломления  $n_{\text{минус}}$  и  $n_{\text{плюс}}$ . В случае вырожденных главных осей вблизи экситонной полосы появляются четыре поперечные волны. При этом исчезает «обычная», не взаимодействующая с экситонами волна.

Следует обратить внимание на замечание С. Пекара о том, что появление добавочных волн не является общим следствием любой пространственной дисперсии. Для большинства других механизмов, таких, например, как обычные неэкситонные полосы поглощения, плазма и магнитная плазма, влияние  $\epsilon(\omega, k)$  сильно деформирует дисперсию, но число волн при этом не увеличивается.

Практически С. Пекар первым сформулировал понятие «дополнительные волны» как гибридные решения для «световых экситонов», в которых экситон и свет образуют единый связанный объект, где энергия непрерывно перетекает между электромагнитным полем и экситонным возбуждением. Эти световые экситоны Пекара были тем гибридным образованием, которое позже стали называть экситон-поляритонами.

Ценным в этой работе является доказательство того, что такие гибридные волны существуют благодаря малой «эффективной массе» экситона, что обуславливает быстрый рост зависимости их волнового вектора от частоты. Теоретическая кривая дисперсии экситонных поляритонов заметно отличается от дисперсии обычного света из-за сильного взаимодействия с колебаниями электронов.

Теория Пекара вызвала широкий интерес в научном мире. Молодой физик из «Лаборатории Белла» Джон Хопфилд в декабре 1958 года опубликовал статью [20], в которой он прямо ссылается на основную работу Пекара [18]. В своей статье Хопфилд придал теории Пекара строгую квантово-полевую форму и ввёл для смешанных свет-вещество состояний новый термин «Polariton». Он рассмотрел взаимодействие фотонного поля света с квантованным полем поляризации и назвал кванты этого поля поляритонами. Важным является то, как Хоп-

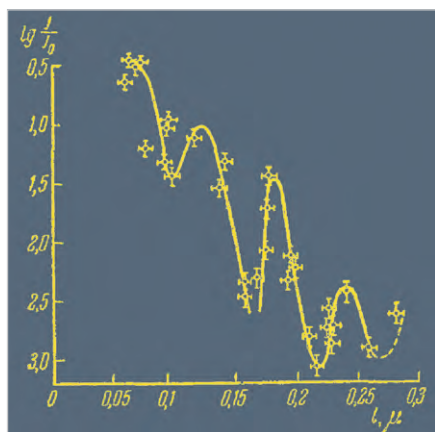


Рис. 4. Экспериментальные результаты зависимости интенсивности прошедшего света от толщины пластинки антрацена при  $T = 20\text{ K}$  (толщина в микронах)

филд показал, что экситон-фотонный гамильтониан имеет тот же вид, что у поляритонов. Поэтому экситоны являются физическим примером общего класса поляритонов. Иными словами, смешанные свет-вещество моды, описанные С. Пекаром на математическом и физическом уровнях, Хопфилд облёк в компактную каноническую формулировку, которой дал общее название.

Отметим, что это была одна из первых работ Джона Хопфилда, написанная им в возрасте 25 лет. В дальнейшем он переключился на другие области исследований и в 2024 году получил Нобелевскую премию за создание ассоциативной нейронной сети, способной хранить и восстанавливать большие шаблоны данных.

Теория С.И. Пекара развивается и сегодня. Например, в [20] рассмотрены варианты решений «уравнений Ландау-Пекара» доказывающие существование дозвуковых бегущих волн.

Теория аномальных дополнительных световых волн в кристаллах, разработанная С.И. Пекаром, концептуально была близка идеям И.Е. Тамма, опубликованным в 1932 г. Однако эти направления развивались независимо, и Соломон Пекар не работал непосредственно с Игорем Таммом и не ссылался прямо на его статьи. Вместе с тем подход Пекара естественным образом вписывается в теоретические работы учителя Тамма Л.И. Мандельштама и его ученика В.Л. Гинзбурга. В своих статьях Гинзбург ссылается на теорию Пекара [21, 22]. В свою очередь, С. Пекар цитирует статью Анри Амвросьевича Рухадзе, ученика Игоря Тамма [23].

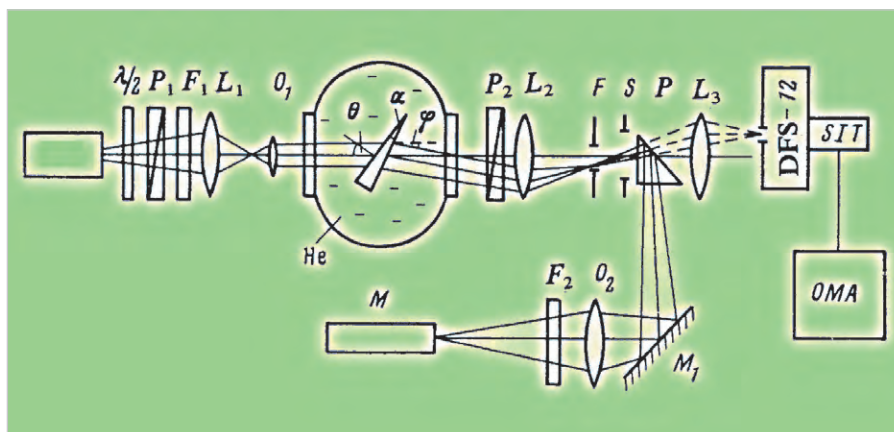


Рис. 5. Установка для исследования дополнительных волн Пекара

Таблица

Обозначение	Описание
L	Лазерный источник
$\lambda/2$	Полуволновая пластинка
P1	Первый поляризатор
F1	Нейтральные фильтры, ослабляющие сигнал
L1	Линза перед кристаллом
O1	Микрообъектив перед кристаллом
P2	Второй поляризатор после кристалла
L2	Линза, фокусирующая пучки в плоскости щелей
S	Перекрёстные щели
P	Вращающаяся призма
L3	Линза перед монохроматором
DFS-12	Двойной монохроматор
SIT	Светочувствительная SIT-матрица на выходе монохроматора
OMA	Оптический многоканальный анализатор
F2	Фильтры в ветви визуального наблюдения
O2	Длиннофокусный объектив в наблюдательной ветви
M1	Зеркало
M	Микроскоп для наблюдения движения пятен
He	Жидкий гелий в криостате
F	Фокальная плоскость, где наблюдаются пятна прошедших пучков
$\alpha$	Угол клина образца CdS ( $2,48 \cdot 10^{-4}$ rad)
$\theta$	Угол падения света на кристалл
$\varphi$	Угол отклонения выхода одного из прошедших лучей относительно опорного направления
T	Положение поперечного экситона (Transverse Exciton)

Экспериментальное доказательство существования описанных выше дополнительных аномальных световых волн в кристалле в области экситонного поглощения было продемонстрировано в работе М.С. Бродина и С.И. Пекара в 1960 году [24].

В своих экспериментах авторы использовали достаточно простой, но оригинальный метод. Они измеряли интенсивность света, прошедшего через тонкую пластинку антрацена при криогенных температурах ( $T = 20\text{ K}$ ) в зависимости от её толщины. Результаты этих измерений показаны на рис. 4. По оси ординат отложены значения десятичного логарифма

отношения  $J/J_0$ , где  $J_0$  – интенсивность прошедшего света при частоте, расположенной рядом с линией,  $J$  – интенсивность прошедшего света с частотой, попадающей внутрь линии.

В этих опытах использовались пластины различной толщины от 0,01 до 0,3 мкм. Чёрные точки с погрешностями соответствуют результатам тридцати независимых измерений на разных кристаллах. Сглаженная кривая показывает чёткие осцилляции интенсивности с периодом по толщине примерно 0,058 мкм. Если бы в кристалле существовала только одна световая волна с конкретной поляризацией, то интенсивность прошедше-

го через пластину света должна была бы уменьшаться с толщиной по чисто экспоненциальному закону без всяких всплесков.

На рис. 4 вместо этого наблюдаются выраженные осцилляции при изменении толщины, обусловленные тем, что вблизи экситонного резонанса ( $25200 \text{ см}^{-1}$ ) свет в антрацене распадается не на одну, а на две волны одной и той же поляризации, но с разными комплексными показателями преломления. Из периода осцилляций  $\Delta l \approx 0,058 \text{ мкм}$  следует, что разность показателей преломления этих волн составляет примерно 6,9. Эта величина аномально большая для случая одной и той же поляризации и направления распространения.

В 1965 году В.М. Агранович и В.Л. Гинзбург в своей монографии выполнили системное объединение рассмотренных выше направлений в рамках кристаллооптики с учётом пространственной дисперсии и теории экситонов [25]. Кроме того, в книге подробно рассмотрен оптический метод исследования, состоящий в изучении поглощения и дисперсии света в диэлектриках, полупроводниках и металлах, который является одним из основных методов физики твёрдого тела. Это была первая в мировой литературе монография, где дано последовательное изложение кристаллооптики с учётом пространственной дисперсии в связи с теорией экситонов.

С развитием спектрометрических методов исследований были получены уникальные экспериментальные данные, позволившие получить новые характеристики волн Пекара.

Одним из наиболее известных проектов такого рода стала работа объединённой группы учёных из различных институтов АН СССР [26]. В этом эксперименте монохроматический свет перестраиваемого лазера на красителе (Coumarin 152A, длительность импульса 6 нс) направлялся на тонкий клиновидный кристалл CdS толщиной 0,7 мкм, охлаждённый до 1,8К. Схема установки для исследования дополнительных волн Пекара приведена на рис. 5.

В таблице приведено описание сокращений и обозначений, показанных на рис. 5.

При прохождении света в кристалле возбуждались две поляритонные моды. Благодаря клиновидной форме образца выходящие лучи распространялись под разными углами и

наблюдались отдельно в виде двух световых пятен. Именно это пространственное разделение послужило убедительным экспериментальным подтверждением существования волн Пекара и одновременно подтвердило теорию преломления света в кристаллическом клине с учётом пространственной дисперсии.

Современная трактовка поляритонов в упрощённом виде выглядит следующим образом. Поляритоны представляют собой волны света, настолько прочно связанные с колебаниями кристаллической решётки (фононные поляритоны) или электронов (экситонные поляритоны), что невозможно определить, где кончается свет и начинается вещество.

В качестве грубой аналогии поляритона можно привести известный пример из курса общей электроники. Предположим, что у нас есть LC-контур, где индуктивность  $L$  – это инерция электронов кристалла, а ёмкость  $C$  – упругость решётки. Контур будет играть в этом примере роль кристалла. Обычно свет (электромагнитная волна) проходит через кристалл, раскачивая эти колебания, но сохраняя свою скорость и частоту. Если поместить кристалл (наш контур) между двумя синхронно работающими на одной частоте генераторами, то интенсивность колебаний будет постепенно возрастать. При усилении связи частоты раздваиваются: одна уходит выше (синфазная), другая ниже (антифазная).

Аналогичная картина наблюдается в дисперсионных графиках экситон-поляритонов.

В более строгом общем виде можно сказать, что поляритоны – это квазичастицы с эффективной массой порядка  $10^{-35} \text{ кг}$  и временем жизни в несколько пикосекунд, которые представляют собой когерентные суперпозиции фотонов и дипольных возбуждений кристаллической решётки (экситонов, оптических фононов, плазмонов и др.), возникающие в режиме сильной связи света с веществом.

Несмотря на то что сегодня общая теория поляритонов достаточно хорошо разработана, остаётся ещё много белых пятен, связанных с механизмами их возникновения, распространения и взаимодействия с веществом.

В качестве примера, иллюстрирующего на современном уровне (2023 г.) свойства экситон-поляритонов, мож-

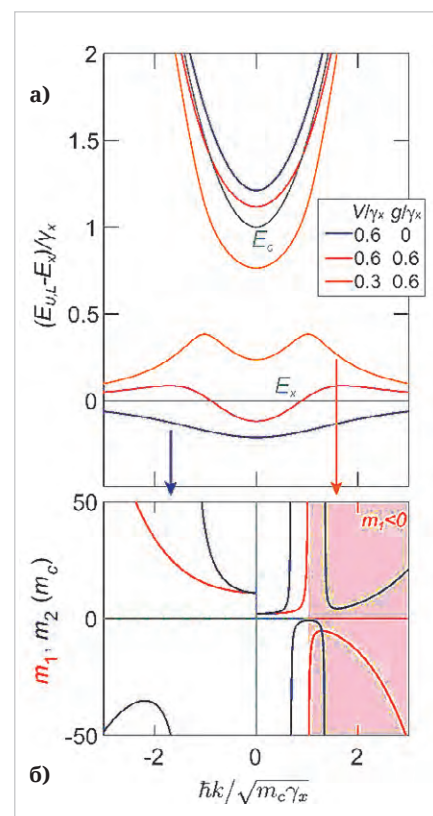


Рис. 6. Аномальная дисперсия экситон-поляритонов:  
 а – расчётные дисперсионные зависимости верхней и нижней поляритонных ветвей при разных параметрах связи света и вещества;  
 б – изменение эффективной массы поляритонов, включая область отрицательной эффективной массы

но привести работу, где используется микрорезонатор, в котором свет многократно отражается между зеркалами, образуя резонаторную фотонную моду с собственной дисперсией [27].

На рис. 6а показаны расчётные дисперсионные зависимости верхней и нижней поляритонных ветвей при разных соотношениях когерентной и диссипативной связи света с экситонным возбуждением [27]. Здесь использованы следующие обозначения:  $m_c$  – эффективная масса фотона микрорезонатора;  $V/\gamma_x$  – сила обычной когерентной связи свет-вещество;  $g/\gamma_x$  – сила диссипативной связи;  $E_U$  – энергия верхней ветви (Upper Polariton);  $E_L$  – энергия нижней ветви (Lower Polariton);  $E_x$  – энергия «чистого» экситона. Все величины нормированы на экситонную ширину линии  $\gamma_x$ . Энергия верхней и нижней поляритонных ветвей  $E_{U,L}$  за вычетом энергии экситона  $(E_{U,L} - E_x)/\gamma_x$  показывает относительное расположение поляритонных ветвей. Таким обра-

зом, по вертикальной оси на рис. 6а отложено не абсолютное значение энергии, а величина, показывающая то, насколько ветвь поляритона лежит выше или ниже экситонного уровня в единицах экситонной ширины линии.

Тонкими чёрными линиями показаны невзаимодействующие моды экситона ( $E_x$ ) и фотона микрорезонатора ( $E_c$ ). Видно, что при усилении диссипативной составляющей связи нижняя поляритонная ветвь деформируется, а вблизи некоторого диапазона волновых векторов возникает аномальный «инвертированный» участок дисперсии.

Когда свет «сильно взаимодействует» с возбуждением вещества (экситонным или фононным), их собственные частоты уже не пересекаются, а «отталкиваются» друг от друга (Anticrossing). Вместо одной точки пересечения возникает зазор (Rabi Splitting). Если этот зазор больше потерь в системе, значит, реализован режим «сильного взаимодействия» (Strong Coupling). В этом случае возникают новые смешанные состояния света и вещества (Polaritons).

В дисперсионном спектре отчётливо видны две отдельные кривые. Нижняя волна обусловлена большей частью «экситонным возбуждением». Верхняя волна по своим параметрам ближе к световой. Обе волны в совокупности – это поляритон.

Следует обратить внимание на то, что при заметной роли диссипативной связи форма нижней ветви может существенно изменяться. На её дисперсионной зависимости появляется инвертированный участок. Иными словами, система ведёт себя уже не как обычный экситон-поляритон, а как более сложная гибридная квазичастица, для которой потери и рассеяние становятся не просто помехой, а фактором, меняющим сам закон движения.

Рис. 6б является иллюстрацией того, как эффективная масса нижней поляритонной ветви ( $m_1$ ) определяет знак групповой скорости, а ( $m_2$ ) связана с кривизной дисперсии. В заштрихованной области величина ( $m_1$ ) становится отрицательной, что соответствует режиму отрицательной эффективной массы. Это означает, что групповая скорость квазичастицы может быть направлена противоположно её импульсу. Здесь мы имеем дело не с «уникальным экзотическим явлением», а с ещё одним проявлением общей теории поляритонов. При достаточно

сильной гибридизации света и вещества рождаются новые квазичастицы с качественно иными свойствами, которых не было ни у чисто фотонной, ни у чисто экситонной подсистемы по отдельности. Именно в этом смысле экситон-поляритоны и фонон-поляритоны можно рассматривать как частные реализации единого фундаментального механизма: образования смешанных свет-вещественных мод.

В 1986 году спустя почти тридцать лет после первой публикации волны Пекара официально были зарегистрированы в качестве научного открытия: «явление распространения добавочных световых волн в кристаллах» с приоритетом № 323 от 23 мая 1957 года [28].

На этом можно считать завершившимся первый исторический этап развития теории и эксперимента поляритонов. Важнейшим результатом этого этапа можно считать вывод о том, что различные типы поляритонов представляют собой частные проявления одного и того же фундаментального физического механизма: гибридизации света с коллективными возбуждениями в веществе.

На следующем витке развития в 2000-х годах будут открыты новые типы: магنون-поляритон, брэгговский поляритон, поляритон Ридберга, плазмон-поляритон Тамма. Эти вопросы планируется рассмотреть в следующих номерах журнала.

### Литература

1. Landau L.D. The Theory of Superfluidity of Helium II. Journal of Physics USSR, 5, 71–90 (1941). URL: [https://www.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/5/1941/5\\_1941\\_1.pdf](https://www.ujp.bitp.kiev.ua/files/journals/5/1941/5_1941_1.pdf).
2. Landsberg G., Mandelstam L. Über die Lichtzerstreuung in Kristallen. Zeitschrift für Physik, 1928, Bd. 50, S. 769–780. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01339412>.
3. Tamm I. Über die Quantentheorie der molekularen Lichtzerstreuung in festen Körpern Zeitschrift für Physik (Zs. f. Ph.). 60, 345, (1930). URL: [https://elibrary.bibliotom.ru/text/tamm\\_sobranie-trudov\\_t1\\_1975/p168/](https://elibrary.bibliotom.ru/text/tamm_sobranie-trudov_t1_1975/p168/).
4. Frenkel J. Wave Mechanics: Elementary Theory, Oxford: Clarendon Press, 1932, URL: [https://www.hlevkin.com/hlevkin/90MathPhysBioBooks/Physics/Physics/QuantumMechanics/Frenkel.Wave-Mechanics.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.hlevkin.com/hlevkin/90MathPhysBioBooks/Physics/Physics/QuantumMechanics/Frenkel.Wave-Mechanics.pdf?utm_source=chatgpt.com).

5. Phonon: Definition, Quantization, and Equations Science facts. URL: <https://www.sciencefacts.net/phonon.html>.
6. Brockhouse B.N. Neutron Scattering and the Frequency Distribution of the Normal Modes of Vanadium Metal, Canadian Journal of Physics, 1955, Vol. 33, No. 12, pp. 889–891, URL: <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/p55-110>.
7. Френкель Я.И. Волновая механика. М.: ОНТИ-ГТТИ, 1934. URL: [https://www.phantastike.com/science/volnovaya\\_mehanika\\_1/djvu/view/](https://www.phantastike.com/science/volnovaya_mehanika_1/djvu/view/).
8. Okinawa Institute of Science and Technology Scientists capture first ever image of an electron's orbit within an exciton. URL: <https://phys.org/news/2021-04-scientists-capture-image-electron-orbit.html>.
9. Gross E.F. Excitons in Cu<sub>2</sub>O. Soviet Physics – JETP, 1, 132–140 (1955). URL: [https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e\\_001\\_01\\_0132.pdf](https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_001_01_0132.pdf).
10. Excitons – Types, Energy Transfer. URL: [https://ocw.mit.edu/courses/6-973-organic-optoelectronics-spring-2003/a21ecb66b23810fe38494f233489dbcf\\_7.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/6-973-organic-optoelectronics-spring-2003/a21ecb66b23810fe38494f233489dbcf_7.pdf).
11. Толыго К.Б. Динамика кристаллических решёток с учётом запаздывания в оптических колебаниях. Доклады Академии Наук СССР (ДАН СССР), 1950, т. 72. № 5. С. 989–992. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003386293>.
12. Hopfield J.J. Theory of the contribution of excitons to the complex dielectric constant of crystals. Physical Review, 1958, v. 112, № 5, pp. 1555–1567. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.112.1555>.
13. Streyer W.H. Reststrahlen band optics for the advancement of far-infrared optical architecture (University of Illinois at Urbana-Champaign), 2016. URL: <https://www.ideals.illinois.edu/items/98482>.
14. Zhao S., Ribbing C-G. Options for reststrahlen materials in optical surfaces and filters. Chinese Optics Letters, 2010, Vol. 8 (Suppl.). URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2%3A4466544/FULLTEXT01.pdf>.
15. Толыго К.Б. Физические свойства решетки соли типа каменной, построенной из деформируемых ионов // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1950, т. 20. № 6. С. 497–509. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=34413163>.
16. Huang K. On the interaction between the radiation field and ionic crystals.

- Proceedings of the Royal Society A, 1951, Vol. 208, p. 352–365. URL: <https://doi.org/10.1098/rspa.1951.0166>.
17. *Spitzer W.G., Kleinman D.A.* Infrared Lattice Bands of Quartz. *Phys. Rev.* 121, 1324, 1961. URL: <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.121.1324>.
  18. *Pekar S.I.* The theory of electromagnetic waves in a crystal in which excitons are produced. *J. Exptl. Theoret. Phys.* 33, 1022–1036 (October, 1957) / пер.: Пекар С.И. Теория электромагнитных волн в кристалле, в котором возникают экситоны. *Soviet Physics JETP*, V 6 (33) n 4, 1958. URL: [https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e\\_006\\_04\\_0785.pdf](https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_006_04_0785.pdf).
  19. *Pekar S.I.* Theory of electromagnetic waves in a crystal with excitons. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1958, Vol. 5, Issues 1–2, pp. 11–22. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0022369758901276>.
  20. *Hopfield J.J.* Theory of the contribution of excitons to the complex dielectric constant of crystals. *Physical Review*, 1958, v. 112, № 5, pp. 1555–1567. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.112.1555>.
  21. *Ginzburg V.L.* Electromagnetic Waves in Isotropic and Crystalline Media Characterized by Dielectric Permittivity with Spatial Dispersion // *Soviet Physics JETP*, 1958, Vol. 7, No. 6, pp. 1096–1105. URL: [https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e\\_007\\_06\\_1096.pdf](https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_007_06_1096.pdf).
  22. *Agranovich V.M., Ginzburg V.L.* Crystal Optics with Allowance for Spatial Dispersion; Exciton Theory. I // *Soviet Physics Uspekhi*, 1962, Vol. 5, No. 2, pp. 323–346. URL: [https://ufn.ru/ufn62/ufn62\\_2/ufn622i.pdf](https://ufn.ru/ufn62/ufn62_2/ufn622i.pdf).
  23. *Agranovich V.M., Rukhadze A.A.* On the Propagation of Electromagnetic Waves in a Medium with Appreciable Spatial Dispersion // *Soviet Physics JETP*, 1959, Vol. 8, No. 4, pp. 685–686. URL: [https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e\\_008\\_04\\_0685.pdf](https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_008_04_0685.pdf).
  24. *Brodin M.S., Pekar S.I.* On an experimental demonstration of the existence of additional anomalous light waves in a crystal in the exciton absorption region. *SOVIET PHYSICS JETP* v1, # 1, 1960. URL: [https://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e\\_011\\_01\\_0055.pdf](https://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_011_01_0055.pdf).
  25. *Агранович В.М., Гинзбург В.Л.* Кристаллооптика с учётом пространственной дисперсии и теория экситонов. М.: Наука, 1965. 374 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/12112>.
  26. *Demidenko A.A., Lebedev M.V., Pekar S.I., Strashnikova M.I., Timofeev V.B., Tsekvava B.E.* Light transmission through a CdS crystal wedge with allowance for additional light waves. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 89, 330–335 (July 1985). URL: [https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e\\_062\\_01\\_0185.pdf](https://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_062_01_0185.pdf).
  27. *Wurdack M.* et al. Negative-mass exciton polaritons induced by dissipative light-matter coupling in an atomically thin semiconductor. *Nature Communications*, 14, 1026, February 2023. URL: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-36618-6>.
  28. *Пекар С.И.* Научное открытие «Явление распространения добавочных световых волн (волн Пекара) в кристаллах». Номер и дата приоритета: № 323 от 23 мая 1957 г. Дата регистрации: 4 декабря 1986 г. URL: <https://ross-nauka.narod.ru/06/06-323.html>.



## НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

### Китай испытал орбитальную «руку осьминога»: дозаправка спутников выходит на новый уровень

Китай сделал очередной шаг к созданию обслуживаемой орбитальной инфраструктуры: экспериментальный спутник *Hukeda-2* успешно прошёл ключевое испытание дозаправки на низкой околоземной орбите. Технология, лежащая в основе проекта, может радикально изменить срок службы космических аппаратов и экономику спутниковых группировок.

#### Гибкая робототехника на орбите

Ключевым элементом миссии стала высокогибкая роботизированная манипуляционная система, получившая неофициальное название «рука осьминога». В отличие от традиционных жёстких манипуляторов, такие конструкции способны адаптироваться к сложной геометрии объектов и выполнять операции с повышенной точностью в условиях микрогравитации.

Испытание подтвердило возможность проведения операций дозаправки непосредственно на орбите. До сих пор ограниченность запасов топлива оставалась одной из главных причин вывода спутников из эксплуатации.

#### Конкуренция с США и технологический разрыв

По данным китайских государственных источников, текущие достижения страны в области орбитального обслуживания опережают аналогичные разработки NASA, где подобные технологии пока находятся на стадии испытаний и прототипов.

Развитие таких систем становится стратегическим направлением: возможность продления срока службы спутников снижает затраты на запуск новых аппаратов и повышает устойчивость космической инфраструктуры.

Дополнительные задачи: борьба с космическим мусором. В рамках дальнейших этапов миссии *Hukeda-2* планируется развёртывание крупной надувной конструкции – «гигантского шара» на орбите. Предполагается, что такие системы могут использоваться для управления орбитальным мусором, включая замедление и деорбитирование неработающих аппаратов.

Это особенно актуально на фоне роста мегасозвездий, таких как Starlink от SpaceX, где тысячи спутников увеличивают нагрузку на орбитальную среду.

#### Параметры миссии и запуск

Спутник был выведен на орбиту 16 мар-



та с помощью ракеты Куайчжоу-11 с космодрома Цзюцюаньский космодром. Аппарат функционирует на высоте около 540 км, что соответствует типичным орбитам низкой околоземной зоны.

#### Долгосрочные последствия

Развитие технологий орбитального обслуживания, включая дозаправку и ремонт, формирует новую парадигму космической эксплуатации. В перспективе это может привести к появлению полноценной сервисной экономики на орбите с возможностью модернизации и даже повторного использования спутников.

Если Китай сможет масштабировать такие решения, это усилит его позиции в глобальной космической гонке и ускорит переход к более устойчивой модели использования околоземного пространства.



### Минцифры может снять мораторий на проверки операторов связи ради контроля СОРМ

Минцифры России обсуждает возможность отмены моратория на плановые проверки операторов связи, что позволит усилить контроль за установкой систем оперативно-разыскных мероприятий (СОРМ). Об этом сообщает РБК со ссылкой на источники на телеком-рынке.

Действующий мораторий был введён в 2023 году и продлён до 2030 года, однако, по данным собеседников издания, он фактически блокирует проведение проверок, включая контроль наличия СОРМ. Эти системы обеспечивают доступ ФСБ и другим правоохранительным органам к телефонным переговорам и интернет-трафику пользователей в рамках установленного законодательства.

Одним из ключевых аргументов в пользу пересмотра режима надзора является распространённая практика обхода требований. По словам источников, отдельные операторы создают новые юридические лица, временно работают без внедрения СОРМ, а затем ликвидируют компании и повторяют схему. Отмена моратория позволит проверять такие компании уже в первый год их деятельности.

Дополнительно обсуждается введение требования об обязательной установке СОРМ как условия для начала оказания услуг связи. Это может существенно изменить правила входа на рынок и повысить регуляторную нагрузку на новых игроков.

В консультациях участвуют крупнейшие представители отрасли – МТС, МегаФон, Т2 Мобайл и ВымпелКом. Окончательное

решение по инициативе пока не принято, обсуждения продолжаются.

Потенциальная отмена моратория отражает курс на усиление контроля за телеком-инфраструктурой и соблюдением требований безопасности, включая обязательное внедрение механизмов доступа для правоохранительных органов.

### Arm запускает AGI-процессор: ставка на NPU как новую основу облачного ИИ

*Рынок искусственного интеллекта вступает в фазу, где ключевым ограничением становится не алгоритмическое развитие, а вычислительная инфраструктура. На этом фоне Arm объявила о разработке нового класса серверных процессоров – AGI-чипов, ориентированных на эпоху агентного ИИ и гипермасштабируемых облачных нагрузок.*

#### От GPU к специализированным архитектурам

С момента появления моделей уровня GPT-3 и последующего развития в ChatGPT индустрия ИИ резко нарастила требования к вычислениям. Традиционные CPU быстро уступили место GPU, таким как NVIDIA H100, благодаря их способности эффективно обрабатывать параллельные задачи.

Однако архитектурно GPU остаются компромиссным решением: они изначально создавались для графики, а не для нейросетевых вычислений. Это приводит к избыточному энергопотреблению и неидеальной утилизации ресурсов. В результате отрасль постепенно смещается в сторону узкоспециализированных нейропроцессоров (NPU), оптимизированных под матричные операции и инференс/тренировку моделей.

#### Arm AGI: масштабирование под нагрузку ИИ

Новый AGI-процессор от Arm построен на платформе Arm Neoverse и ориентирован на устойчивую работу при экстремальной параллельной нагрузке. Архитектура предполагает:

- двухузловую конфигурацию с 272 ядрами на узел;
- до 8160 ядер в стандартной стойке с воздушным охлаждением (36 кВт);
- масштабирование до более чем 45 000 ядер в жидкостно-охлаждаемых системах (200 кВт), разработанных совместно с Supermicro.

Такая плотность вычислений напрямую адресует требования современных ИИ-систем, особенно в контексте агентных моделей, где множество процессов выполняются параллельно и непрерывно.

#### Экосистема и партнёры

Arm делает ставку не только на железо,

но и на экосистему. Среди партнёров уже заявлены такие игроки, как Meta, Cloudflare, OpenAI и SAP.

Дополнительно компания продвигает открытые стандарты, включая Open Compute Project, представив эталонный сервер 1OU Dual Node Reference Server. Это должно ускорить внедрение решений и снизить барьеры для операторов дата-центров.

#### NPU как новая арена конкуренции

Формируется новая конкурентная ось в полупроводниковой отрасли. Если ранее доминировала борьба CPU-архитектур (x86 против Arm), то теперь на первый план выходит специализация под ИИ-нагрузки. В этом контексте:

- Intel и AMD пока делают ставку на гибридные решения (CPU+GPU+ускорители);
- Arm продвигает идею глубоко специализированных NPU-инфраструктур;
- альтернативой может стать открытая архитектура RISC-V, способная ускорить инновации за счёт гибкости и кастомизации.

#### Перспективы: от дата-центров к устройствам

Хотя первичный фокус остаётся на облачных инфраструктурах, тренд на NPU неизбежно распространится на пользовательские устройства. Уже сейчас нейропроцессоры интегрируются в мобильные SoC и ПК, и в перспективе возможен переход к модульной архитектуре с выделенными NPU-сокетами.



Тем не менее такая модель создаёт новые инженерные вызовы – от балансировки нагрузки между CPU/NPU до ограничений по памяти и межсоединениям.

#### Итог

Запуск Arm AGI-процессора отражает более широкий сдвиг: индустрия ИИ переходит от универсальных вычислений к специализированным архитектурам. В ближайшие годы именно эффективность и масштабируемость NPU могут стать ключевыми факторами конкурентоспособности – как на уровне гиперскейлеров, так и в массовых вычислительных устройствах.



# EXPO ELECTRONICA

28-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ  
ВЫСТАВКА ЭЛЕКТРОНИКИ



ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ,  
МОДУЛИ И КОМПЛЕКТУЮЩИЕ



ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ  
И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ  
ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОНИКИ



ВСТРАИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ



РОБОТОТЕХНИКА

СОВМЕСТНО С



2-Я ВЫСТАВКА ИНФОРМАЦИОННЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ И РЕШЕНИЙ  
ДЛЯ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ



БОЛЬШИЕ ДАННЫЕ, АНАЛИТИКА  
И ОБЛАЧНЫЕ РЕШЕНИЯ



ИТ-ИНФРАСТРУКТУРА  
И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ



ОБОРУДОВАНИЕ, РЕШЕНИЯ  
И УСЛУГИ ДЛЯ ТРАНСПОРТА,  
НАВИГАЦИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ



ЦИФРОВИЗАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ  
БИЗНЕСА, ГОРОДА И ПРОИЗВОДСТВА

**14-16.04.2026**

МОСКВА, КРОКУС ЭКСПО

**800+** УЧАСТНИКОВ  
ЖДУТ ВАС!



ОРГАНИЗАТОР  
ORGANISER



ПОЛУЧИТЕ  
БЕСПЛАТНЫЙ БИЛЕТ  
ПО ПРОМОКОДУ

**print26**



Специализированные конференции

# ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ 2026

Промышленная автоматизация

Цифровизация производства

Интернет вещей и большие данные

Искусственный интеллект

Информационная безопасность

Автоматизация зданий и инженерных систем

21-я специализированная конференция  
**11.02 ПТА - ЕКАТЕРИНБУРГ**

7-я специализированная конференция  
**24.03 ПТА - КАЗАНЬ**

17-я специализированная конференция  
**26-27.05 ПТА - САНКТ-ПЕТЕРБУРГ**

5-я специализированная конференция  
**22.09 ПТА - УФА**

16-я специализированная конференция  
**27.10 ПТА - НОВОСИБИРСК**

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