

В номере:

**НАЗАД К ПРИРОДЕ:**  
бионический дизайн  
в электронике

**БИТ БИТУ РОЗНЬ:**  
тестируем осциллограф  
Vesna



Электронная  
версия этого  
журнала

 **КВСИСТЕМЫ**

**ЭНЕРГИЯ  
БЕЗ ГРАНИЦ**

беспроводное  
питание дронов  
нового поколения

стр. 4 >>

Мощность зарядки от 20 до 500 Вт  
Дистанция зарядки до 30 см

Станция беспроводной  
зарядки (передатчик)

Преобразователь  
мощности (AC/DC)

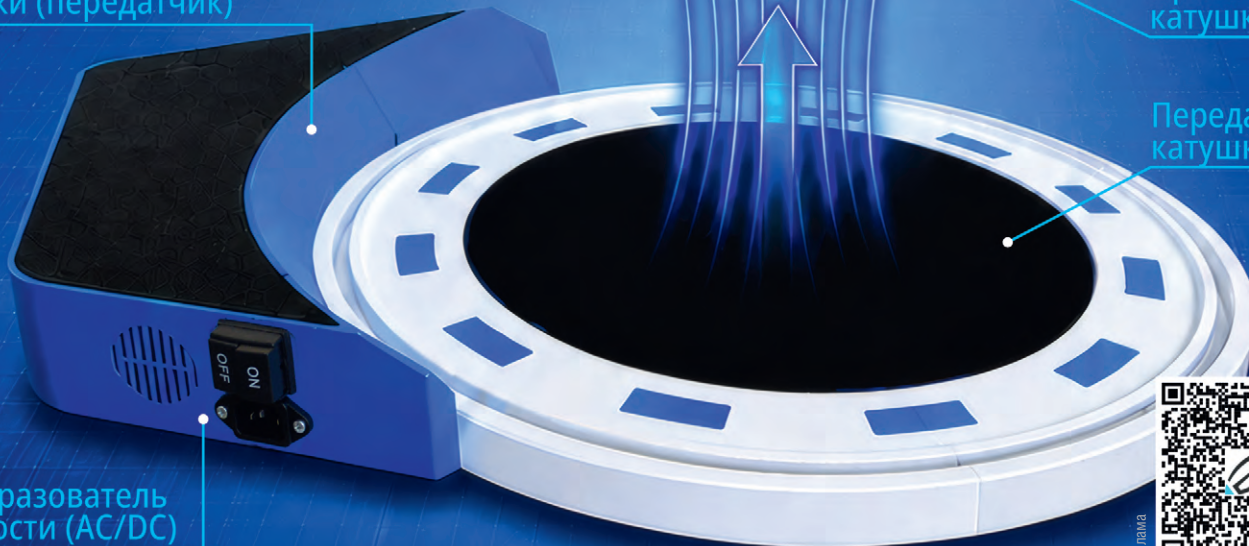


Беспилотный  
летательный  
аппарат  
(БПЛА)

Зарядное  
устройство  
и батарея  
с BMS

Приёмная  
катушка

Передающая  
катушка



Реклама

Решения для  
беспроводного заряда

МЕДИАПЛАТФОРМА ДЛЯ ПРОДВИЖЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ  
ЭЛЕКТРОНИКИ И ПРОМЫШЛЕННОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ

# ГОВОРИТЕ С ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ B2B-АУДИТОРИЕЙ НА ЕЁ ЯЗЫКЕ

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

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

**45 000+**  
профильных  
читателей  
ежемесячно

**ВЫСОКИЙ  
УРОВЕНЬ  
ДОВЕРИЯ**  
среди профессионалов  
отрасли

**ЕДИНАЯ  
МЕДИАСРЕДА –  
МАКСИМАЛЬНЫЙ  
ОХВАТ ЦЕЛЕВОЙ  
АУДИТОРИИ**

## КОМПЛЕКСНОЕ ПРОДВИЖЕНИЕ ЧЕРЕЗ ЕДИНУЮ МЕДИАСРЕДУ



**ПОРТАЛ**  
cta.ru



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



**Дзен, VK,  
TELEGRAM**



**RuTube,  
VK-видео,  
YouTube**



**EMAIL-  
рассылки**



**КОНФЕРЕНЦИИ  
ПТА**

## КТО НАША АУДИТОРИЯ?

Специалисты, принимающие решения

- Инженеры и разработчики
- Проектировщики и интеграторы
- Технические руководители
- Производственные компании
- Представители высокотехнологичного бизнеса
- Инвесторы и отраслевые инспекторы



### ПРОДВИЖЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ПРОДУКТОВ

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



### ПОЛНЫЙ ЦИКЛ МЕДИАПОДДЕРЖКИ

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

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



### ВИДЕОИНСТРУМЕНТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МАРКЕТИНГА

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

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



### EMAIL-МАРКЕТИНГ ПО ОТРАСЛЕВОЙ БАЗЕ

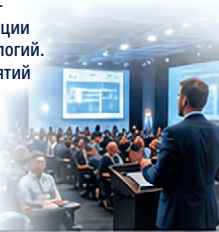
Прямой канал коммуникации с тысячами  
профильных подписчиков:

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



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

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



## ЧТО ПОЛУЧАЕТЕ ВЫ?

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



## СТА – МЕДИАПАРТНЁР ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЫНКА

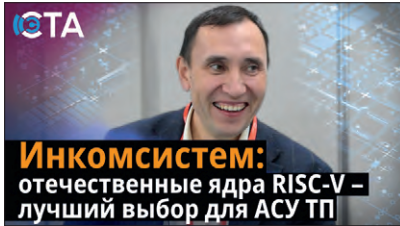
Мы объединяем отраслевое медиа, профессиональное сообщество, цифровые площадки и офлайн-мероприятия в единую систему продвижения для высокотехнологического бизнеса.

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

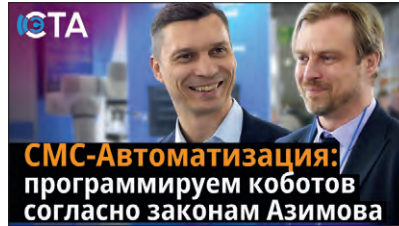
**РАЗМЕСТИТЕ РЕКЛАМУ  
ИЛИ СТАТЬЮ НА СТА –  
И О ВАС УЗНАЮТ ТЕ,  
КОМУ ВЫ НУЖНЫ**

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

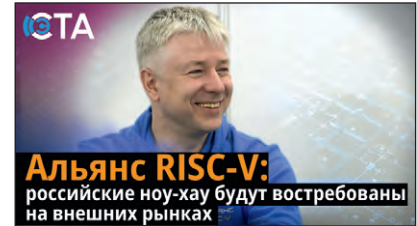




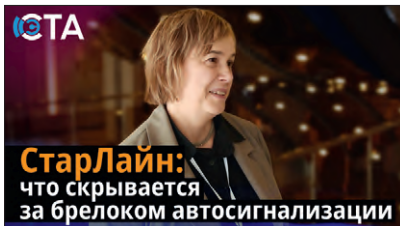
Интервью с Александром Тяплашкиным –  
директором по разработке и  
технологическому развитию  
департамента ПТК АО НИЦ  
«ИНКОМСИСТЕМ»



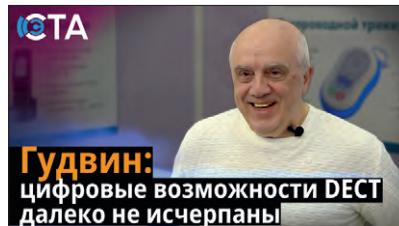
Интервью с Даниилом Сидоровым –  
генеральным директором ГК «СМС-  
Автоматизация»  
и Артёмом Сидоровым –  
генеральным директором  
«Завода автоматизированных и  
робототехнических систем»



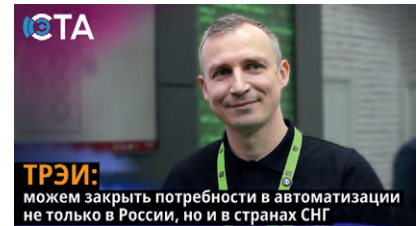
Интервью с Евгением Максимовым –  
Главой Академического комитета RISC-V,  
компания YADRO



Интервью с Екатериной Шестаковой –  
старшим технологом НПО «СтарЛайн»



Интервью с Михаилом Нагорским –  
техническим директором Концерна Гудвин  
(Гудвин Европа)

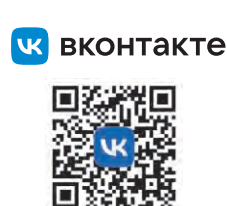


Интервью с Сергеем Жеменюком –  
коммерческим директором АО «ТРЭИ»

## СМОТРИТЕ НА КАНАЛЕ СЭТА



## СЛУШАЙТЕ В ПОДКАСТЕ СЭТА





Здравствуйтесь, уважаемые друзья!

Новые архитектуры силовой электроники, интеллектуальные системы управления и развитие высоконадёжной электронной базы продолжают определять направление современной радиоэлектронной отрасли. Материалы этого номера отражают ключевые тенденции рынка: рост требований к энергетической эффективности, переход к автономным системам и активное внедрение цифровых методов проектирования, моделирования и управления.

Открывает выпуск статья о проектировании резонансного преобразователя для систем беспроводной передачи энергии. Технологии WPT становятся важной частью инфраструктуры электрического транспорта и беспилотных платформ. На примере системы беспроводной зарядки малых БПЛА рассматриваются особенности магнитно-связанного резонанса, влияние взаимного положения катушек на передаваемую мощность и методы стабилизации энергетического обмена.

Тему надёжности при высокоскоростной передаче данных продолжает материал о технологии Press Fit, которая всё активнее рассматривается как альтернатива традиционной пайке. Анализируются механические и физические аспекты формирования соединений, устойчивость к внешним воздействиям и особенности применения технологии в отечественном высокоскоростном соединителе СКП445, рассчитанном на передачу данных до 10 Гбит/с.

Отдельный блок номера посвящён системам электропитания, управления и измерениям. Рассматриваются методы параллельного соединения DC/DC-преобразователей для резервирования и повышения мощности, современные архитектуры систем управления электроприводов, а также вопросы точности аналого-цифрового преобразования и оценки параметра ENOB цифровых осциллографов VESNA.

Не обойдены вниманием интеллектуальные и автономные системы. В статье о групповом управлении БПЛА предлагается подход к формированию базы «идеальных» прецедентов, объединяющий реальные испытания и моделирование для повышения устойчивости алгоритмов коллективного взаимодействия.

Также в выпуске представлены прикладные инженерные решения и перспективные подходы к проектированию РЭА – от компактного измерителя уровня воды до применения бионического дизайна и SLM-технологий при создании лёгких и прочных корпусных конструкций для современной электроники.

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 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 1/67/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 «МЕДИКОЛОР».

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.

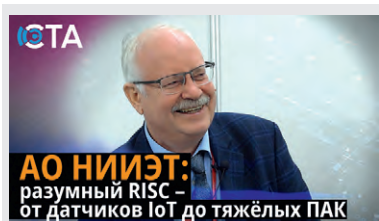
Мнение редакции не обязательно совпадает с мнением авторов.

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

© СТА-ПРЕСС, 2026

## Мы в соцсетях





**АО НИИЭТ:**  
разумный RISC –  
от датчиков IoT до тяжёлых ПАК

Иван Фефилов –  
Советник генерального директора  
АО «НИИЭТ»

## RISC-V против «зоопарка»: 10 контроллеров, 200 МГц и открытый беспилотник

Ветеран радиоэлектроники (35 лет стажа, НИИЭТ) раскрыл в интервью детали перехода на RISC-V. До этого в институте существовал «зоопарк» из 10–15 процессорных ядер (8-, 16-, 32-битных). Единая открытая архитектура теперь масштабируется от датчиков ЖКУ и IoT до ПЛК и серверов.

Что уже в серии и в пути: около 10 микроконтроллеров RISC-V. Двухъядерный на 200 МГц готов для тяжёлых ОС – следующий шаг к программируемым логическим контроллерам.

Коммерческая суть: внешний рынок закрыт, но массовый внутренний (миллионные тиражи простых устройств) делает RISC-V единственным шансом на успех. «Если чисто коммерческий подход – ничего не нужно. Но мы живем в своей стране».

Референс-стратегия: НИИЭТ с партнёром «Чистое небо» делает полностью открытые платформы полетного контроллера и контроллера двигателей для беспилотников. Решения выложат на GitHub — чтобы рынок покупал контроллеры тысячами под готовый софт. Государство должно поддерживать создание открытого беспилотника на критически важных отечественных компонентах.

Для разработчиков АСУ ТП, встраиваемых систем и робототехники — конкретные цифры и дорожная карта.



## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

- 4** Проектирование и оптимизация резонансного преобразователя для систем беспроводной передачи энергии

*Николай Калугин, Валентин Гура, Алексей Суворин, Андрей Костин*

## ЭЛЕМЕНТЫ И КОМПОНЕНТЫ

- 10** Технология Press Fit – надёжные непаяные соединения: применение в высокоскоростном соединителе СКП445 (российский аналог MULTIGIG RT2)

*Денис Баканин*

- 16** Параллельное соединение одностипных модулей электропитания для резервирования с активным принудительным распределением тока нагрузки

*Виктор Жданкин*

## ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- 26** Эффективное количество бит цифровых осциллографов: влияние на результаты измерений и экспериментальное определение для приборов VESNA

*Николай Лемешко*

## ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

- 36** Идеальный прецедент группового управления

*Екатерина Михайлова*

## ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

- 42** Современные системы управления электроприводов: структура и конструкция. Часть 2

*Максим Сергеев*

- 50** Измеритель уровня воды с линейчатым индикатором

*Сергей Бирюков*

- 56** Бионический (генеративный) дизайн и SLM-технология в корпусных конструкциях электроники будущего

*Андрей Кашкаров*

# Проектирование и оптимизация резонансного преобразователя для систем беспроводной передачи энергии

Николай Калугин, Валентин Гура,  
Алексей Суворин, Андрей Костин

Электрические транспортные средства, будь то воздушные или наземные, требуют источник электрической энергии. Одним из возможных источников питания является перезаряжаемая аккумуляторная батарея. Зарядка бортовой батареи транспортного средства осуществляется либо посредством зарядного кабеля, либо с использованием технологии беспроводной передачи энергии (Wireless Power Transfer, WPT, БПЭ). Базовая технология БПЭ – магнитно-связанный резонанс. Резонансная частота и передаваемая мощность зависят от взаимного расположения передающей и приёмной обмоток. В данной статье рассматривается резонансный преобразователь мощности для системы беспроводной зарядки малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Анализируются вопросы изменения передаваемой мощности и резонансных частот в зависимости от относительного положения передающей и приёмной катушек. Статья была впервые представлена на конференции PCIM Asia 2024 [1]. Текст был переведён и дополнен авторами для журнала «Современная электроника».

## 1. Введение

Беспроводная передача энергии – это технология передачи электроэнергии без использования проводов. Один или несколько передатчиков генерируют электромагнитную волну, которая принимается одним или несколькими приёмниками для преобразования энергии в электрическую. Системы БПЭ малой мощности широко распространены для зарядки мобильных телефонов, станции зарядки высокой мощности (до 50 кВт) используют-

ся для зарядки электромобилей. Для зарядки беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) применяют беспроводные зарядные станции с мощностью зарядки до 1 кВт.

В данной работе мы описываем процесс разработки и оптимизации прототипа DC/DC-преобразователя мощностью 500 Вт для станции зарядки малых БПЛА. При разработке были рассмотрены вопросы оптимальной схемы силового преобразователя и конфигурации обмоток.

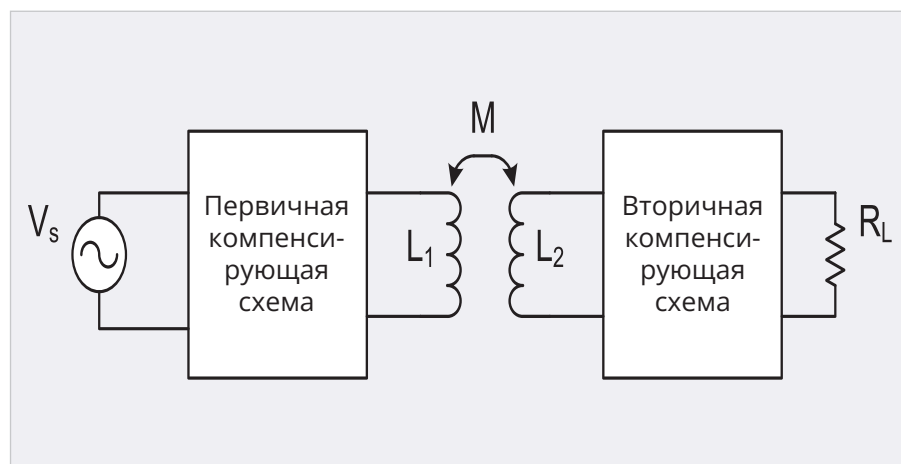


Рис. 1. Блок-схема системы БПЭ

## 2. Основы беспроводной передачи энергии и цели оптимизации

### 2.1. Основы беспроводной передачи энергии

Для беспроводной зарядки транспортных средств часто применяют технологию магнитно-связанного резонанса, которая является одной из разновидностей индуктивной технологии БПЭ [2–4]. Для этих магнитно-связанных резонансных преобразователей характерно, что преобразователь работает на резонансной частоте колебательного контура, состоящего из компенсирующей схемы и передающей обмотки на первичной стороне, приёмной обмотки и компенсирующей схемы на вторичной стороне, как это показано на рис. 1.

Первичный преобразователь генерирует переменное напряжение  $V_s$  на резонансной частоте получившейся схемы, которая включает первичную (передающую) обмотку  $L_1$ , вторичную (приёмную) обмотку  $L_2$  с компенсирующими цепями и выпрямитель на вторичной стороне.

Простая компенсирующая схема состоит из одного конденсатора, который может быть подключён к первичной и вторичной обмоткам последовательно или параллельно. Возможны и более сложные топологии компенсации, интересующимся этой темой мы предложим ознакомиться с [2]. Геометрия первичной и вторичной обмоток, равно как наличие или отсутствие магнитопроводов, имеют решающее значение для определения магнитного поля системы БПЭ и, как следствие, её работоспособности. Комбинации смещений (вертикальное, горизонтальное и угловое), при которых нарушается соосность приёмной и передающих катушек, влияют на магнитную связь и, следовательно, на эффективность и дальность передачи энергии.

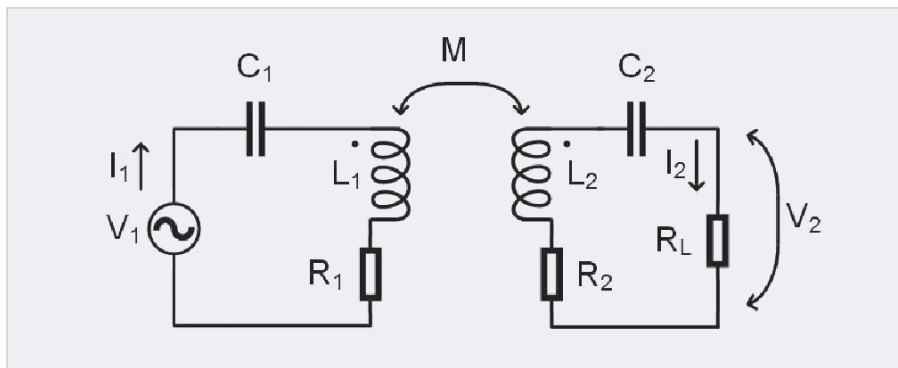


Рис. 2. Последовательно – последовательная схема системы беспроводной передачи энергии

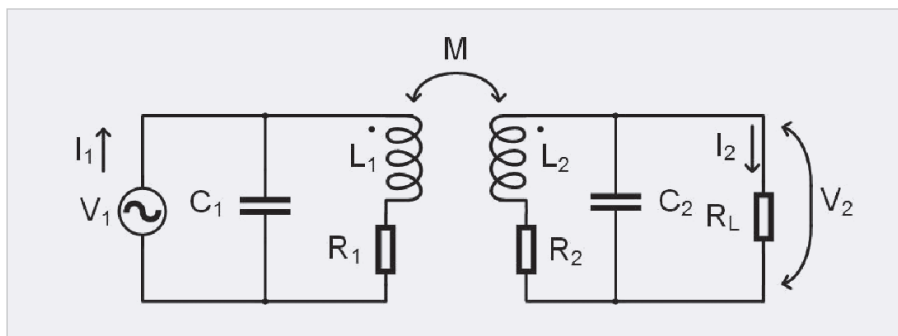


Рис. 3. Параллельно – параллельная схема системы беспроводной передачи энергии

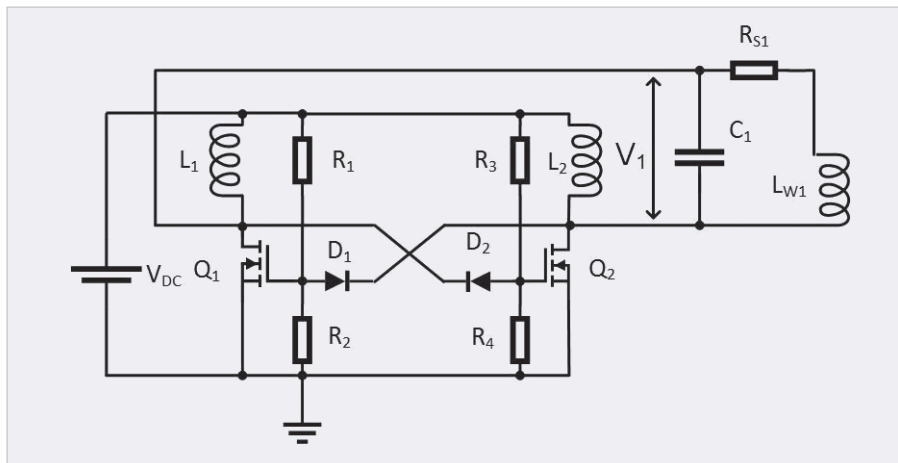


Рис. 4. SPICE-модель первичной стороны устройства БПЭ. Параллельная схема компенсации

В этой связи авторы ставили перед собой задачу исследовать конфигурацию компенсирующей схемы и геометрию обмоток для поиска оптимального режима работы при различных взаимных положениях первичной и вторичной обмоток.

### 2.2. Конфигурация резонансной схемы

Компенсирующая схема с одним конденсатором может быть подключена последовательно или параллельно к обмотке системы БПЭ, что даёт четыре возможные комбинации резонансной схемы (т.е. комбинации топо-

логий первичной и вторичной стороны). Также известны применения схем без компенсации на вторичной стороне, что добавляет пятый вариант, который тоже необходимо рассмотреть. Таким образом, для рассмотрения остаются:

- последовательно – последовательно;
- последовательно – параллельно;
- параллельно – последовательно;
- параллельно – параллельно;
- параллельно – некомпенсированно.

Задача анализа на данном этапе заключается в поиске оптимальной комбинации компенсирующих схем на первичной и вторичной сторонах.

При расчётах и моделировании смещения учитываются как уменьшение коэффициента магнитной связи. Анализ компенсирующих сетей проводился в работах [2, 5, 6]. В работе [2] выведены уравнения для расчёта ожидаемого КПД для различных компенсирующих сетей. Схема для конфигурации «последовательно – последовательно» показана на рис. 2, где:

- V1 – источник переменного напряжения;
- R1 – эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) первичной обмотки L1;
- R2 – ESR вторичной обмотки L2;
- M – взаимная индуктивность;
- RL – сопротивление нагрузки.

КПД этой схемы рассчитывается по формуле:

$$\eta = \frac{R_L}{R_1 \left( \frac{R_2 + R_L}{\omega_0 M} \right)^2 + R_2 + R_1}, \quad (1)$$

где рабочая частота  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}. \quad (2)$$

Конфигурация «параллельно – параллельно» показана на рис. 3.

КПД для этого случая предлагается рассчитывать следующим образом:

$$\eta = \frac{R_L}{\frac{R_1 L_2^2}{M^2} + R_2 + R_L}. \quad (3)$$

Формулы (1)–(3) выведены на основе ряда упрощений, наиболее значимым из которых является предположение, что резонансная частота не зависит от взаимной индуктивности, а нагрузка представляет собой простое активное сопротивление. На практике резонансная частота зависит от взаимной индуктивности, а нагрузка обычно является аккумулятором, потребляющим постоянный, а не переменный ток.

### 2.3. Конфигурация и проектирование обмоток

Оптимальная конфигурация обмоток зависит от передаваемой мощности и возникающих при эксплуатации смещений обмоток. Для снижения смещений предлагается применять пирамидальную конструкцию посадочного модуля [7] или плоский массив [8] передающих обмоток. Авторам представляется, что система

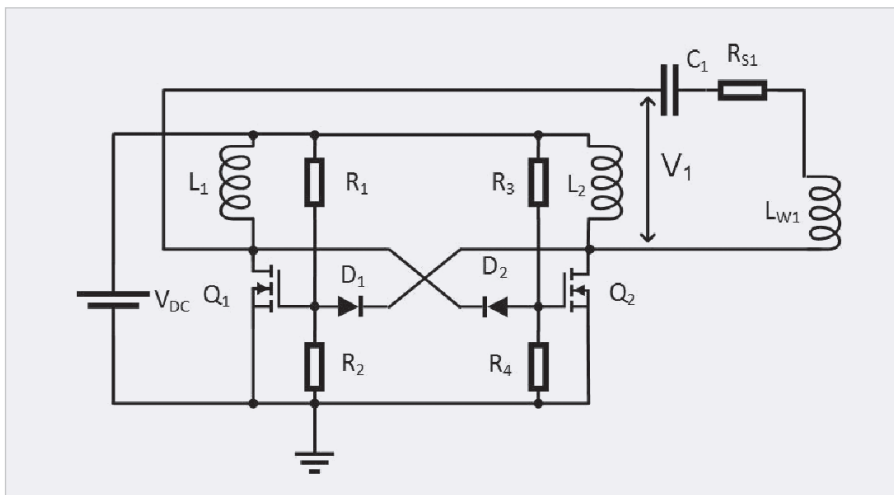


Рис. 5. SPICE-модель первичной стороны устройства БПЭ. Последовательная схема компенсации

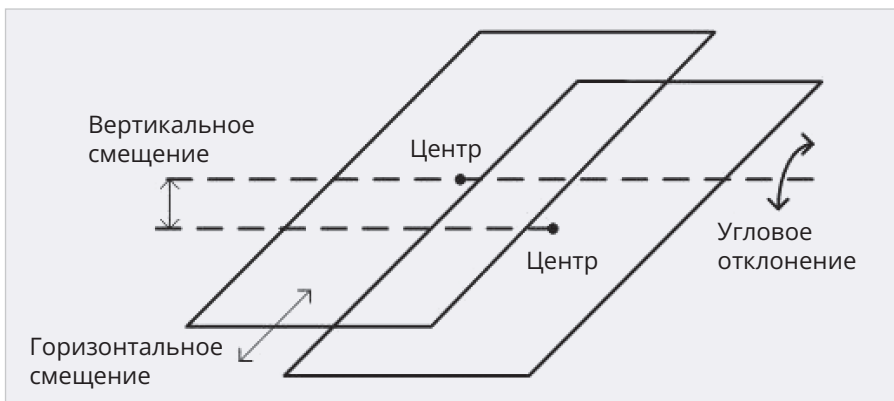


Рис. 6. Вертикальное, горизонтальное и угловое смещения

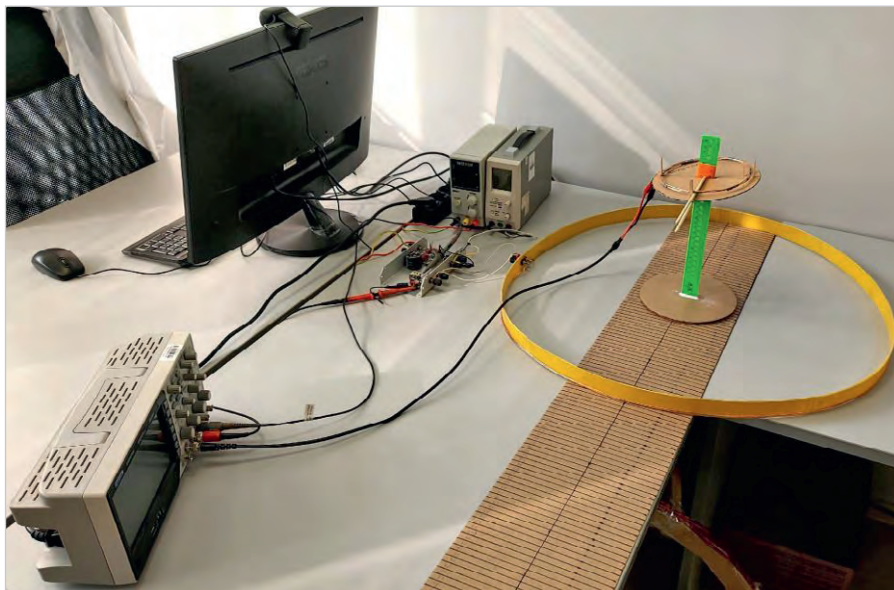


Рис. 7. Стенд для измерения передаваемой энергии в зависимости от смещения по одной из трёх осей

с одной плоской передающей и одной плоской приёмной катушками, описанная в [9], лучше подходит для решения практической задачи, поэтому именно такая система и будет исследована.

### 3. Оптимальная структура первичной и вторичной резонансных схем

Для поиска оптимальной конфигурации первичной и вторичной компенсирующих сетей схема была собрана

на в среде LTSpice. Схема первичной стороны показана на рис. 4. NMOS-транзисторы Q1 и Q2 работают в режиме автоколебаний. Частота колебаний задаётся резонансной частотой передающей обмотки  $L_{W1}$  и компенсирующего конденсатора  $C1$ . Значения индуктивности  $L_{W1}$  и сопротивления  $R_{S1}$  соответствуют измеренным значениям индуктивностей собранных прототипов.

Схема первичной стороны с последовательной компенсирующей сетью показана на рис. 5. Моделирование проводилось как для двух вышеупомянутых схем с компенсирующим конденсатором на вторичной стороне, так и для схемы без компенсирующего конденсатора. В ходе моделирования магнитная связь варьировалась от 0,9 до 0,2. Измерялось напряжение, передаваемое от V1 к RL.

Анализ результатов моделирования показал, что максимальная мощность передаётся при сочетании параллельного подключения конденсатора на первичной стороне и отсутствии компенсации на вторичной стороне.

### 4. Определение подходящей конструкции обмоток

Приёмная обмотка по сравнению с передающей может быть:

- равного или немного меньшего диаметра;
- значительно меньшего диаметра.

Решение должно приниматься на основе наилучшей передачи энергии при различных смещениях: вертикальном, горизонтальном и угловом, как показано на рис. 6.

Влияние смещения по каждой из осей необходимо исследовать отдельно от других. Для исследования был собран испытательный стенд, показанный на рис. 7, его силовая часть соответствует схеме, приведённой на рис. 4.

В качестве нагрузки схемы применялся резистор, подключённый после выпрямителя, что позволяет снимать зависимости напряжений на резисторе для определения передаваемой энергии (мощности).

Процесс снятия зависимостей выглядел следующим образом. Исследование влияния горизонтального смещения на передаваемую мощность проводилось путём измерения зависимости передаваемой мощности от изменяющегося расстояния между центрами двух кату-

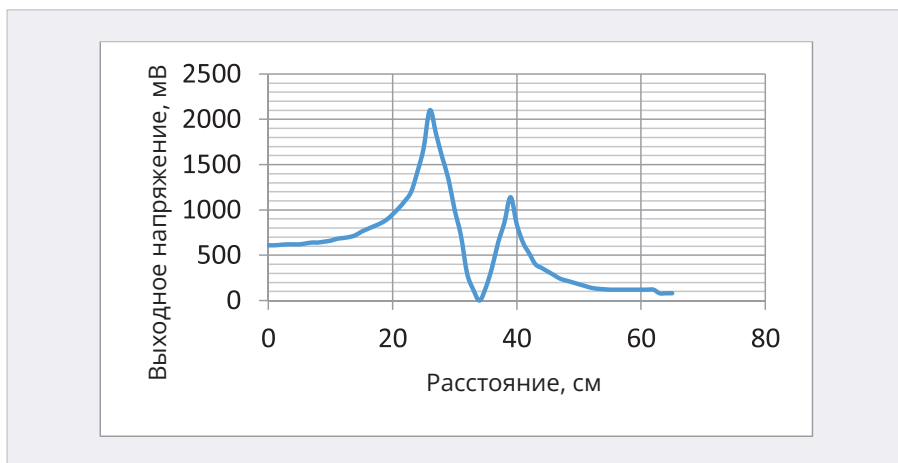


Рис. 8. Передаваемое напряжение в зависимости от расстояния между центрами обмоток



Рис. 9. Передаваемое напряжение в зависимости от вертикального расстояния, центры совмещены

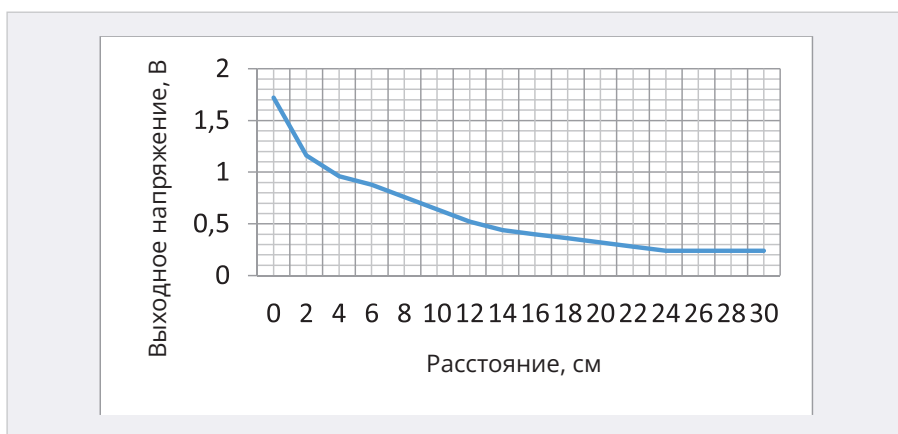


Рис. 10. Передаваемое напряжение в зависимости от вертикального расстояния в точке первого пика

шек при фиксированной высоте расположения приёмной катушки над передающей, исследуя таким образом влияние горизонтального смещения на передаваемую мощность. Для точек с максимальной передаваемой мощностью проводились измерения зависимостей выходной

мощности от угла наклона приёмной обмотки и при изменении вертикального расстояния. Были проведены две серии измерений: для обмоток одинакового диаметра и для приёмной обмотки диаметром меньше передающей. График зависимости передаваемого напряжения

от расстояния между центрами для приёмной обмотки малого диаметра показан на рис. 8.

Два отчётливых пика на графике соответствуют крайним положениям внутри и снаружи передающей обмотки. Минимум на графике соответствует положению, когда центр приёмной обмотки находится строго над краем передающей обмотки.

Графики зависимости передаваемого напряжения от вертикального расстояния показаны на рис. 9 и рис. 10. Рисунок 9 показывает график для совмещённых центров передающей и приёмной обмоток. График зависимости передаваемого напряжения от вертикального расстояния для первого пика на рис. 8 показан на рис. 10.

Проанализировав выполненные измерения, авторы пришли к выводу, что оптимальная конструкция должна иметь диаметр приёмной обмотки значительно (от 3 до 5 раз) меньше диаметра передающей обмотки.

### 5. Проектирование резонансного преобразователя мощностью 500 Вт

Результаты исследований были применены при разработке резонансного преобразователя мощностью 500 Вт со следующими основными характеристиками:

- входное напряжение 380–420 В;
- выходное напряжение 65 В;
- максимальный выходной ток 8 А;
- диаметр передающей обмотки 700 мм;
- индуктивность передающей обмотки 35,2 мкГн;
- диаметр приёмной обмотки 150 мм;
- индуктивность приёмной обмотки 2,3 мкГн.

Диапазон изменения входного напряжения преобразователя выбран типичным для выходного напряжения однофазного выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности (ККМ).

Силовая схема первичной стороны преобразователя представляет собой полномостовой преобразователь. Транзисторы моста управляются резонансным контроллером FAN7631, который эффективно подстраивает рабочую частоту моста под резонансную частоту итогового контура, состоящего из приёмной и передающей обмоток. На вторичной стороне применена схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой трансформатора и

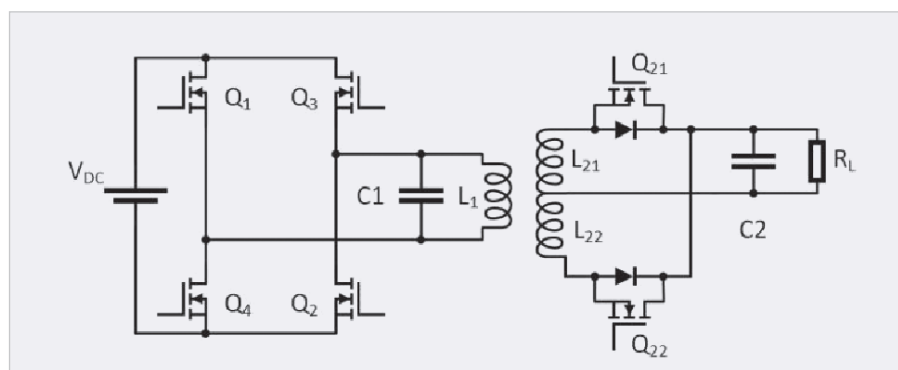


Рис. 11. Упрощённая схема силовой части резонансного преобразователя



Рис. 12. Общий вид системы беспроводной передачи энергии

Таблица 1. Результаты измерений частоты и КПД

Зазор, мм	5	11	15	20	32	45	55	65
Резонансная частота, кГц	122	108	102	93	90	83	79	76
КПД, %	92	92	92	91	88	85	80	75

синхронным выпрямлением на NMOS-транзисторах. Упрощённая схема первичной и вторичной сторон силовой части резонансного преобразователя приведена на рис. 11.

На рис. 12 представлен общий вид экспериментального стенда беспроводной передачи энергии. Здесь изображены: передающая станция (включающая резонансный преобразователь мощности и передающую катушку), приёмный модуль (объединяющий приёмную катушку и выпрямитель со схемой

управления) и беспилотный летательный аппарат (БПЛА). БПЛА на рисунке показан для примера; система может быть адаптирована для зарядки различных потребителей.

Зависимость резонансной частоты и КПД от расстояния между обмотками представлена в табл. 1.

## 6. Заключение

Моделирование и эксперименты на прототипе показали, что параллельно-нескомпенсированная схема является предпочтительной для зарядных станций малых БПЛА. Выполненные серии измерений также показали, что диаметр приёмной обмотки должен быть в 3–5 раз меньше диаметра передающей. Найденные решения были применены при создании преобразователя мощно-

стью 500 Вт, чьи испытания подтвердили правильность этих выводов. Рабочая частота преобразователя в условиях эксперимента изменялась в диапазоне от 75 до 125 кГц, а максимальный КПД передачи энергии составил 92%.

## 7. Литература

1. Kalugin N. et al. Design and Optimization of a Resonant Converter for Wireless Power Transfer. PCIM Asia Shenzhen 2024 Conference proceedings, p. 205–209.
2. Alicia Triviño-Cabrera, José M. González-González, José A. Aguado. Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach. Springer Cham 2020.
3. Kalwar K.A., Aamir M., Mekhilef S. Inductively Coupled Power Transfer (ICPT) for Electric Vehicle Charging. A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 47, 462–475 (2015).
4. Triviño-Cabrera A., Aguado-Sánchez J. A review on the Fundamentals and Practical Implementation Details of Strongly Coupled Magnetic Resonant Technology for Wireless Power Transfer. Energies 11(10), 2844 (2018).
5. Jiang Chaoqiang et al. An Overview of Resonant Circuits for Wireless Power Transfer. Energies 10, 7 (June 2017): 894.
6. Weijie Li, Lijun Diao, Weiyao Mei et al. Optimized Resonant Network Design for High Energy Transfer Efficiency of the WPT System April 2023 Electronics 12(9):1984.
7. Shuichi Obayashi, Yasuhiro Kanekiyo, Kiyokazu Sugaki et al. 750-W 85-kHz Inductive Rapid Charging System for Mid-Sized UAV. Wireless Power Week Proceedings 2022 Bordeaux, France 605–610.
8. Mirbozorgi S.A., Bahrami H., Sawan M., Gosselin B. A Smart Multicoil Inductively Coupled Array for Wireless Power Transmission. IEEE Trans. Ind. Electron. 61(11), 6061–6070 (2014).
9. Sampath J.P.K., Alphons A., Vilathgamuwa D.M. Coil Optimization Against Misalignment for Wireless Power Transfer. 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), Auckland, New Zealand, 2016, pp. 1–5.



Решения для беспроводного заряда



## Серия КАН-Д

Блоки и модульные  
системы питания

- Мощность: 75-480 Вт
- Крепление на DIN-рейку
- Напряжение: AC (85...264), DC (90...372)
- Индивидуальные решения
- КПД > 92%



## Серия МАА

Высокоэффективные  
AC/DC-преобразователи

- Мощность: 20-3000 Вт
- Напряжение: AC 115/220/380 В, DC (3...68)
- Температура: от -50°C до +70°C
- Соответствие требованиям ЭМС
- КПД > 90%

## Серия КАН

Универсальные  
AC/DC-преобразователи

- Мощность: 5000 Вт
- Адаптивная система охлаждения
- Цифровое управление с интерфейсом RS-485
- Параллельное подключение до 15 модулей
- Горячая замена
- КПД > 94%



Реклама



# Технология Press Fit – надёжные непаяные соединения: применение в высокоскоростном соединителе СКП445 (российский аналог MULTIGIG RT2)

Денис Баканин (d.bakanin@ranet.ru)

В работе выполнено комплексное исследование технологии механической запрессовки контактов (Press Fit), рассматриваемой в качестве альтернативы классическим методам пайки. Проанализированы физические механизмы образования газонепроницаемого сопряжения, способы предотвращения фреттинг-износа, специфические требования к металлизации посадочных мест печатных плат. На основании результатов сертификационных испытаний согласно стандартам IEC 60352-5 и IEC 60068-2 выполнено сопоставление эксплуатационной надёжности соединений Press Fit и паяных аналогов при воздействии экстремальных климатических и механических факторов. Отдельное внимание уделено геометрии комплаентных зон (область контакта) и свойствам гальванических покрытий. Практическая значимость работы продемонстрирована на примере внедрения технологии в высокоскоростной соединитель СКП445 – отечественную разработку, обеспечивающую передачу данных на скоростях до 10 Гбит/с.

## Введение

Развитие электронной индустрии сопровождается постоянным увеличением плотности компоновки, ростом быстродействия аппаратуры и ужесточением требований к условиям эксплуатации изделий. Классические способы формирования электрических связей, включая пайку волной или групповую пайку оплавлением, обладают рядом принципиальных ограничений. К ним относятся возникновение термических напряжений, вероятность деформации печатных плат (ПП), риск образования случайных перемычек в условиях плотного монтажа, а также подверженность соединений усталостному разрушению под воздействием вибраций [1]. В качестве ответа на указанные технологические вызовы метод механической запрессовки контактов (Press Fit) эволюционировал из узкоспециализированного решения в общепринятый стандарт для широкого спектра устройств, включая телекоммуникационное оборудование и силовую электронику [2].

Особую актуальность данная технология приобретает при работе с многослойными печатными платами объединительных панелей. Наличие

массивных слоёв питания и земли в таких платах создаёт эффект мощного теплоотвода, что существенно затрудняет качественную пайку сквозных отверстий. В подобных условиях припой зачастую не прогревается равномерно, застывая на уровне одного из слоёв, что приводит к образованию непропаев. Попытки ликвидировать дефекты посредством дополнительного перегрева панели влекут за собой разбрызгивание припоя и ставят под угрозу термоустойчивость диэлектрического материала платы [2].

Целью настоящего исследования является систематизация технических требований к контактам Press Fit с опорой на физику контактных явлений, оценка их работоспособности в экстремальных режимах и анализ возможностей использования в рамках отечественной компонентной базы на примере высокоскоростного соединителя СКП445.

## Физика контактирования и сопоставление с паяными соединениями

Фундаментом надёжности соединения типа Press Fit (рис. 1) служит формирование газонепроницаемого интерфейса (gas-tight interface).

В соответствии с фундаментальными положениями, сформулированными Р. Холмом, величина переходного сопротивления контакта находится в прямой зависимости от количества и радиуса токопроводящих мостиков [3]. Геометрия комплаентной зоны контактов Press Fit проектируется таким образом, чтобы в процессе запрессовки генерировать нормальное усилие в пределах 100...300 Н на контакт. Данное усилие инициирует пластическую деформацию микронеровностей сопрягаемых поверхностей, способствуя разрушению оксидных плёнок толщиной до 100 нм и образованию зон холодной сварки [4].

При сопряжении двух металлических поверхностей реальная электрическая связь («металл–металл») возникает лишь в нескольких точках, что характерно даже для полированных деталей. Минимальный радиус подобной области контакта, как правило, не превышает 10 мкм. Применение технологий усиленного прижима, к которым относится Press Fit, вызывает необходимую пластическую деформацию контактных точек внутри зоны соединения. Это обусловлено высоким давлением, возникающим вследствие концентрации значительной прижимной силы на микроскопической площади контакта [4].

Ключевым преимуществом технологии считается устойчивость к фреттинг-коррозии (коррозия, возникающая при колебательном перемещении двух металлических поверхностей относительно друг друга в условиях воздействия коррозионной среды). В ходе эксплуатации электронного оборудования наблюдаются механические перемещения компонентов, спровоцированные вибрационными нагрузками или температурными циклами. Экспериментальные данные компании Infineon Technologies свидетельствуют о том, что высокое нормальное усилие в соединении

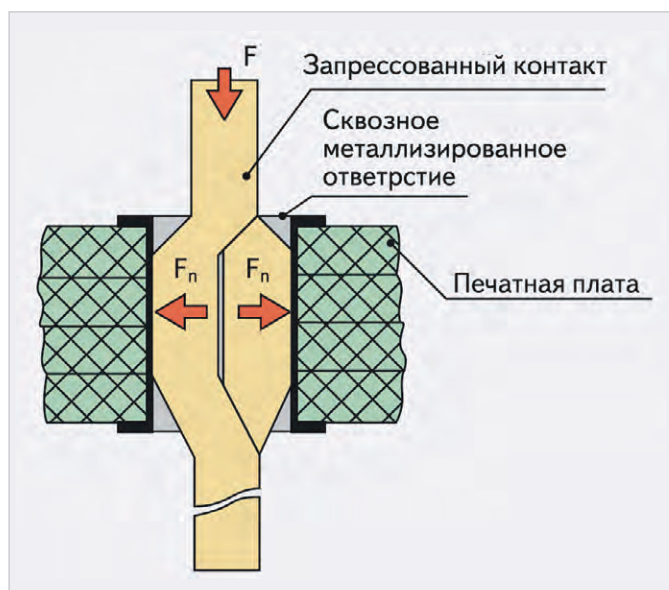


Рис. 1. Соединение Press Fit

ях Press Fit ограничивает амплитуду микроперемещений значением менее 10 мкм. При таких параметрах не фиксируется заметных вариаций контактного сопротивления. В противоположность этому, если амплитуда фрикций превышает 10 мкм (что типично для деградировавших паяных соединений при усталости материала), контактное сопротивление стремительно возрастает до нескольких Ом, что приводит к отказу системы [4].

Сопоставление надёжности обеих технологий в условиях экстремальных нагрузок верифицировано данными квалификационных испытаний по стандартам IEC 60352-5 и IEC 60068-2. В рамках тестов на тепловой удар (TST) в температурном диапазоне  $-40...+125^{\circ}\text{C}$  и вибрационных испытаний с ускорением 20g соединения Press Fit не продемонстрировали прерывания цепи или существенного изменения контактных свойств. В отличие от паяных соединений, где различие в коэффициентах теплового расширения (КТР) материалов провоцирует накопление усталости в интерметаллической фазе, механическое соединение Press Fit не содержит хрупких слоёв и демонстрирует стабильность даже после 150 циклов термоударов и многократного демонтажа модулей [4].

Дополнительные испытания на воздействие агрессивных газов с повышенным содержанием  $\text{H}_2\text{S}$  (50 ppm вместо нормативных 10 ppm) при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$  и влажности 93% подтвердили отсутствие деградации контактов Press Fit. Онлайн-мониторинг сопротивления в ходе

испытаний не зафиксировал прерываний или заметного изменения контактных свойств, что критически важно для силовых модулей с интегрированными функциями измерения тока при низком напряжении. Напряжение устанавливается на уровне  $\sim 1,3$  мВ (1,2...1,4 мВ, в зависимости от температуры и соответствующей электрической проводимости), ток 1 А. Подобные низкие значения необходимы для исключения эффекта спекания, влияние которого может нивелировать малые изменения контактного сопротивления [4].

### Конструктивные особенности комплаентных элементов

Эффективность соединения определяется геометрией комплаентной зоны (пуклёвки). Запрессовываемая часть контакта играет ключевую роль в формировании соединения. Ее конфигурация в поперечном сечении может варьироваться, имея общепринятые англоязычные наименования (рис. 2). Основная задача данной части контакта – создание давления на боковые стенки сквозного металлизированного отверстия, устойчиво удерживающего штырь в отверстии в напряжённом состоянии [2].

*Bow-Tie* («Галстук-бабочка»). Поперечный элемент с расширенными окончаниями. Испытания продемонстрировали, что данная конструкция способна создавать локальные концентрации напряжений, приводящие к недопустимым повреждениям

металлизации отверстия, в связи с чем её применение в ответственных соединениях ограничено.

*Eye of Needle* (EON, «Игольное ушко»). Конический элемент, сужающийся к окончанию. Гарантирует равномерное распределение нормального усилия и высокую плотность монтажа. Указанный тип является стандартом для высокоскоростных соединителей, таких как СКП445, где шаг контактов минимизирован.

*C-Pin* (С-образный). U-образный изгиб, выполненный из металлической ленты. Обеспечивает значительную общую деформацию, что предпочтительно для силовой электроники (модули Econo, Easy) с высокими токовыми нагрузками, где требования к плотности монтажа менее жёсткие.

Выбор типа элемента обусловлен компромиссом между плотностью монтажа и механической надёжностью. Для высокоскоростных приложений, где критична геометрия дифференциальных пар, конструкция EON признаётся оптимальной.

Важно подчеркнуть, что упругая деформация пуклёвки компенсирует релаксацию материалов и погрешности размеров отверстий плат. Без специальной пуклёвки материал основания платы «плывёт», ослабляя первоначально тугое соединение, и штыри могут выпасть из отверстий через некоторое время. Положительный эффект был достигнут, когда удалось реализовать на контактном штыре специальную пуклёвку, создающую упругую деформацию при впрессовывании штыря в отверстие [2].

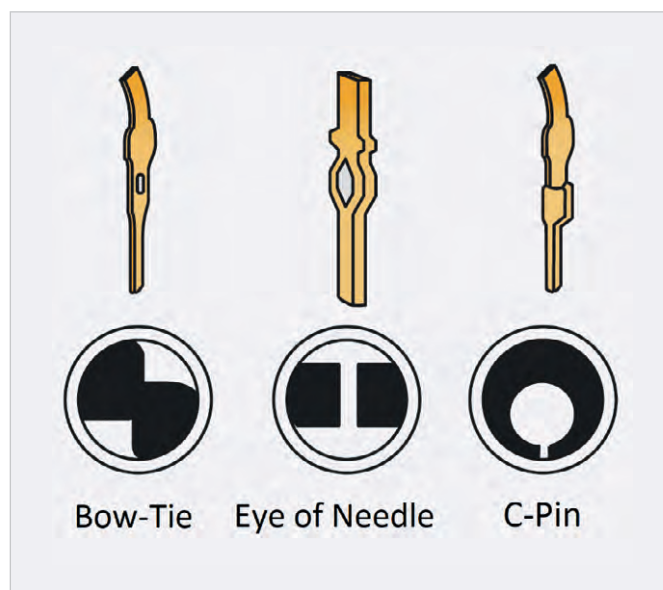


Рис. 2. Формы комплаентной зоны (пуклёвки) контакта

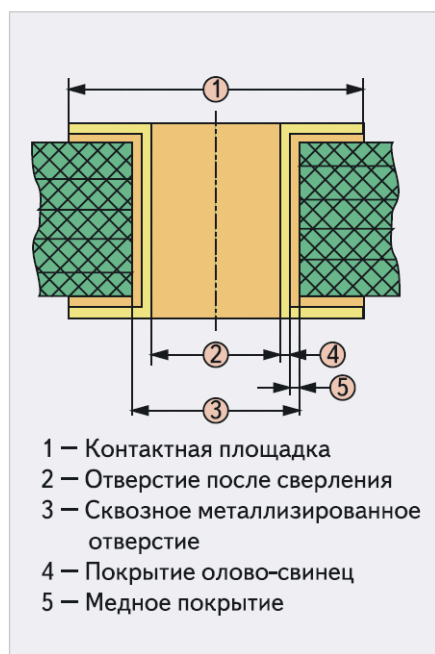


Рис. 3. Металлизированное отверстие

Жёсткость пуклёвок должна быть ограничена, в противном случае внедрение контакта может разрезать металлизацию отверстия. Степень деформации элементов сочленения определяется соотношением диаметра металлизированного отверстия и размера пуклёвки контактного штыря, а также соотношением их жёсткости [2].

### Гальванические покрытия и коррозионная стойкость

Выбор покрытия определяется балансом между технологичностью монтажа и эксплуатационной стойкостью. На любой контактной поверхности присутствуют следы коррозии, органические отложения (например, жиры), различные загрязнения и оксидные слои. Большинство проблем создаётся именно оксидными слоями, и для борьбы с ними используются покрытия из благородных металлов [4].

Толщина коррозионных слоёв на поверхности благородных металлов составляет около 2 нм. На всех «базовых» металлах могут образовываться коррозионные слои толщиной от 5 до более чем 100 нм. Существует два механизма создания хорошего контакта и поддержания его характеристик: «спекание» и разрушение загрязнений в процессе формирования контакта [4].

Наиболее распространённым покрытием является матовое олово (Matte Tin), обладающее низкой твёрдостью и хорошими антифрикционными

свойствами [6]. Однако для агрессивных сред требуются более стойкие решения.

Исследования коррозионной стойкости в условиях воздействия сероводорода ( $H_2S$ ) показали критическую важность выбора материала. При концентрации  $H_2S$  50 ppm, температуре +40°C и влажности 93% (условия теста IEC 60068-2-43 с ужесточёнными параметрами) стандартные покрытия могут деградировать. Многослойные плёнки на основе олова с легирующими добавками серебра (Sn/Ag<sub>3</sub>Sn) демонстрируют выдающуюся стойкость к сульфидной коррозии, сохраняя стабильное сопротивление даже после 120 часов воздействия [7].

Для высокоскоростных соединителей применяется система никель-золото (Ni/Au) в контактной зоне и олово или олово-свинец на хвостовиках Press Fit. Никель служит диффузионным барьером, предотвращая миграцию меди, а золото обеспечивает низкое переходное сопротивление. Хвостовики контактов покрываются оловом или оловянно-свинцовым сплавом для обеспечения оптимального коэффициента трения при запрессовке [8].

Характер покрытия по меди в отверстиях также влияет на прочность удержания контактного штыря. Оловянно-свинцовое покрытие не должно быть слишком толстым, так как в этом случае его частицы будут выдавливаться из отверстия запрессовываемым контактом и создадут опасность замыкания. Допустимые финишные покрытия отверстий включают: HASL (олово-свинец), иммерсионное олово, OSP, иммерсионное серебро, ENIG (золото по никелю) [9].

### Требования к печатным платам и монтажу

Надёжность соединения Press Fit на 50% зависит от качества посадочных мест на ПП. В отличие от пайки, где припой компенсирует неточности, здесь требуется прецизионное сопряжение. Технология запрессовки требовательна к конечному диаметру металлизированного отверстия в печатной плате (рис. 3) в большей мере, чем для процессов пайки [2].

Согласно стандарту IPC-6012 и спецификациям производителей, для высокоскоростных соединителей предъявляются следующие требования [8, 9]:

- материал платы: стеклоэпоксид (FR-4). Минимальная толщина платы – 1,60 мм;
- толщина меди в отверстии: 25...50 мкм;
- покрытие олово-свинец: 4...12 мкм;
- допуски на диаметр: отклонение более ±0,05 мм от номинала может привести либо к недостаточному усилию контакта, либо к разрушению отверстия;
- качество стенки отверстия: отсутствие заусенцев и разрывов металлизации. Заусенцы могут срезаться при монтаже и попадать в зазор, увеличивая переходное сопротивление.

Процесс монтажа осуществляется с помощью прессового оборудования, обеспечивающего перпендикулярность установки. Основными компонентами комплекта для запрессовки одиночных контактов и многостыревых соединителей с запрессовываемыми контактами являются пуансон, передающий давление со штока пресса на соответствующие опорные поверхности контакта, и подплатная матрица, обеспечивающая дополнительную жёсткость платы, чтобы она не прогибалась под воздействием усилия запрессовки.

Важно отметить, что запрессовку рекомендуется выполнять после пайки остальных компонентов, чтобы исключить влияние нагрева на материал основания платы, который может «поплыть» при температуре выше точки стеклования, ослабляя соединение. Однако при высоком уровне заселённости платы компонентами может оказаться недостаточно пространства для размещения подплатной матрицы, что требует поиска взаимоприемлемого компромисса. При пайке после запрессовки разъемов печатные платы нагреваются до температур, превышающих температуру стеклования связующего материала платы [2].

Модули с Press Fit-контактами можно демонтировать, а печатная плата может быть использована с новым модулем ещё два раза без потери надёжности соединения [4]. Результаты тестов подтверждают отсутствие измеримой деградации контактных характеристик после многократного использования [4]. Для проведения теста на повторное использование первый модуль был запрессован на печатную плату. После предваритель-

ного измерения сопротивления выполнялось 50 циклов TST (-40...+125°C) и повторное измерение сопротивления. Далее модуль был демонтирован и произведена установка нового компонента [4].

### Высокоскоростной соединитель СКП445

Соединитель СКП445 (рис. 4) является достойным российским аналогом высокопроизводительного соединителя MULTIGIG RT2 производства TE Connectivity [9].

Разработка данного соединителя была направлена на обеспечение импортозамещения в сегменте высокоскоростных интерфейсов отечественного оборудования. Конструкция контактов СКП445 основана на оригинальных технических решениях, защищённых патентом на полезную модель [10], что обеспечивает соответствие международным стандартам при сохранении технологического суверенитета.

Целостность сигнала (Signal Integrity). Основное преимущество технологии Press Fit в соединителе

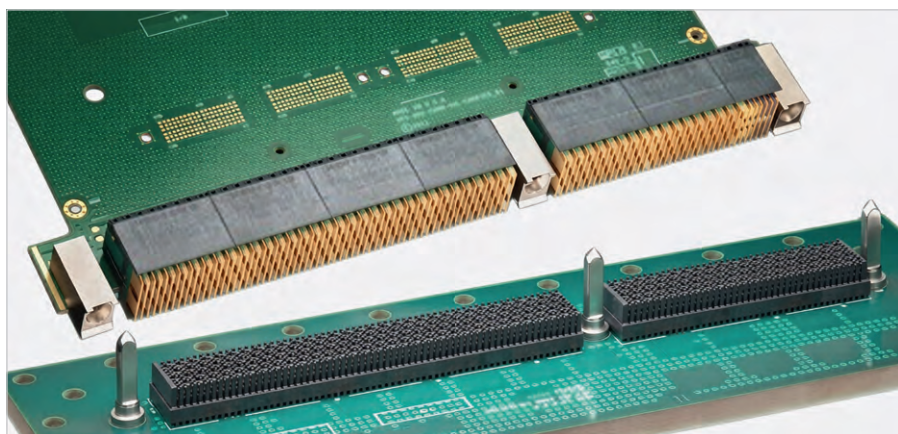


Рис. 4. Высокоскоростной соединитель СКП445

СКП445 заключается в минимизации импедансных неоднородностей. При пайке сквозных отверстий остаточная часть металлизации работает как резонатор, вызывая потери на определённых частотах. Конструкция контактов Press Fit в СКП445 позволяет оптимизировать длину перехода, снижая потери на вставке (Insertion Loss). Соединитель обеспечивает следующие параметры.

- Поддержка скоростей передачи данных до 10 Гбит/с.

- Возвратные потери (Return Loss): > 20 дБ в рабочем диапазоне частот.
  - Волновой импеданс: стабильные 100 Ом для дифференциальных пар [9].
- Надёжность и ремонтпригодность.* В условиях эксплуатации оборудования связи (вибрация, термоциклирование) механическое соединение Press Fit лишено недостатков пайки, таких как рост интерметаллидов и усталостные трещины. Кроме того, возможность выпрессовки контакта позволяет заменять повреждённый



РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

<p><b>Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...</b>                  Номинальное напряжение, <math>U_{ном}</math>, В,                  Номинальная ёмкость, <math>C_{ном}</math>, мкФ,                  Диапазон температур среды при эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</p>	<p>3,2 ... 485                  1,0 ... 470 000                  -60 ... 125</p>	
<p><b>Объёмно-пористые танталовые конденсаторы K52-...</b>                  Номинальное напряжение, <math>U_{ном}</math>, В,                  Номинальная ёмкость, <math>C_{ном}</math>, мкФ,                  Диапазон температур среды при эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</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 ёмкость, <math>C_{ном}</math>, мкФ,                  Диапазон температур среды при эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</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 ёмкость, <math>C_{ном}</math>, Ф,                  Диапазон температур среды и эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</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 ёмкость, <math>C_{ном}</math>, Ф,                  Диапазон температур среды при эксплуатации, <math>T_{ср}</math>, °C</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, www.elecond.ru



разъём без утилизации дорогостоящей печатной платы, что экономически эффективно для сервисных служб.

Внедрение СКП445 означает упрощение технологического процесса производства (отсутствие отмывки от флюса, снижение энергозатрат на пайку) и повышение выхода годной продукции. Использование отечественной компонентной базы также снижает риски цепочки поставок (supply chain) и обеспечивает соответствие требованиям локализации.

*Применение в специальных системах.* Уникальные характеристики соединителя СКП445 определяют его широкое применение в критически важных системах специального назначения, где требования к надёжности и целостности сигнала значительно превышают стандартные промышленные нормы.

- Бортовые вычислительные комплексы (БВК). В авиационных и космических бортовых компьютерах соединение СКП445 обеспечивает высокоскоростную передачу данных между процессорными модулями и платами памяти. Стойкость к вибрационным нагрузкам (до 20g) и термоциклированию (–60...+125°C) делает технологию Press Fit предпочтительной для бортовой электроники, работающей в условиях постоянных механических и температурных воздействий. Отсутствие паяных соединений исключает риск образования усталостных трещин при многократных взлётах и посадках летательных аппаратов.
- Системы радиолокационных станций (РЛС). В РЛС нового поколения с фазированными антенными решётками (ФАР) требуется передача больших объёмов данных с минимальными задержками. СКП445 обеспечивает необходимую пропускную способность для обработки радиолокационных сигналов в реальном времени. Высокая плотность монтажа позволяет размещать большее количество каналов обработки сигнала на единицу площади, что критически важно для компактных мобильных РЛС.
- Системы радиоразведки. В комплексах радиоэлектронной разведки (РЭР) требуется обработка слабых сигналов в широком диапазоне частот. Технология Press Fit минимизирует паразитные шумы и потери сигнала на переходах «разъём–пла-

та», что повышает чувствительность приёмных трактов. Герметичность контакта защищает от воздействия агрессивных сред, включая солевой туман и повышенную влажность, что важно для морского базирования систем радиоразведки.

- Станции спутниковой связи. В оборудовании спутниковой связи, работающем в экстремальных условиях космического пространства и наземных станций, надёжность соединений является критическим параметром. СКП445 обеспечивает стабильную передачу данных на скоростях, необходимых для современных протоколов спутниковой связи. Возможность многократного демонтажа и замены модулей без повреждения печатной платы упрощает обслуживание дорогостоящего оборудования наземных станций. Во всех перечисленных применениях ключевым преимуществом СКП445 является сочетание высокой скорости передачи данных с исключительной механической надёжностью, что делает данный соединитель универсальным решением для современной электронной аппаратуры специального назначения.

## Заключение

Технология контактов Press Fit представляет собой научно обоснованное решение для высокоскоростных соединительных систем. Физика контактирования, базирующаяся на создании высокого нормального усилия и множественных мостиков проводимости, гарантирует стабильное переходное сопротивление и защиту от фреттинг-коррозии даже в экстремальных условиях.

Использование данной технологии в соединителе СКП445 позволяет достигнуть высоких показателей целостности сигнала благодаря исключению паразитных эффектов пайки. Для инженеров-разработчиков и технологов производства внедрение Press Fit требует строгого контроля качества печатных плат, но обеспечивает значительный выигрыш в надёжности, ремонтопригодности и производительности конечного изделия. Переход на отечественные соединители, такие как СКП445, сохраняет все преимущества технологии Press Fit, обеспечивая технологический суверенитет в критически важных отраслях, включая авиацию, космонавтику, радиолока-

цию и системы связи специального назначения.

Соединения, выполняемые запрессовкой, обладают высоким уровнем надёжности, способным конкурировать с паяными соединениями. При этом они лишены тех проблем, которые традиционно сопровождают процессы пайки. Данные соединения сравнительно просты в реализации, требуют минимального комплекта оборудования и отличаются экономической эффективностью, экологичностью и ремонтопригодностью.

## Список литературы

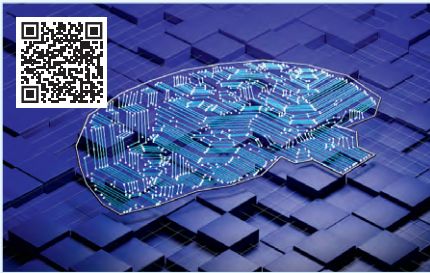
1. *Богатинов Ю.А.* Конструкция и расчёт печатных плат. М.: Горячая линия – Телеком, 2019. 352 с.
2. *Медведев А.* Соединения типа Press Fit // Компоненты и технологии. 2006. № 8. С. 12–15.
3. *Holm R.* Electric Contacts: Theory and Application. 4th ed. Springer, 2013. 658 p.
4. *Штольц Т.* Надёжность Press FIT-соединений // Силовая электроника. 2015. № 3. С. 83–88.
5. *Harper C.A., Sampson R.N.* Electronic Materials Handbook: Packaging. McGraw-Hill Education, 1995. 1136 p.
6. *Antler M.* Survey of Contact Fretting in Electrical Connectors // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. 1985. Vol. CHMT-8, No. 1. P. 87–104.
7. IPC-6012DA. Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards. IPC Association Connecting Electronics Industries, 2020. 120 p.
8. *Баканин Д.* Отечественный модульный высокоскоростной соединитель стандарта VPX (VITA 46) от АО «РАДИАНТ-ЭК» // Электронные компоненты. 2023. № 2. С. 56–59.
9. TE Connectivity. Application Specification 114-13056 Rev J. MULTIGIG RT, RT2, and RT2-R Signal Connectors. 11 JUL 16. 19 p.
10. Пат. 238215 U1 Российская Федерация, МПК H01R 12/58. Контакт под запрессовку пресс-фит / А.А. Кабанов, Д.В. Баканин, В.И. Шаломанов, Э.А. Шадронов; заявитель и патентообладатель Акционерное общество «РАДИАНТ-ЭК». № 2025117845; заявл. 17.06.2025; опубл. 22.10.2025, Бюл. № 30. 8 с.: ил.
11. IEC 60068-2-43:2003. Environmental testing – Part 43: Test Kd: Hydrogen sulphide test for contacts and connections.



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

### Китай начал первое клиническое испытание полностью имплантируемого нейроинтерфейса

Китай официально запустил первое многоцентровое клиническое исследование полностью имплантируемой системы интерфейса мозг–компьютер (BCI), сделав ещё один шаг к практическому применению инвазивных нейроинтерфейсов в медицине и нейрореабилитации.



Новая система ориентирована прежде всего на пациентов с тяжёлыми повреждениями верхнего отдела спинного мозга, приводящими к квадриплегии и утрате двигательных функций конечностей. На первом этапе в исследование планируется включить 32 пациента, а в дальнейшем программу намерены расширить и на другие категории неврологических нарушений.

В отличие от неинвазивных BCI-систем, использующих внешние датчики, полностью имплантируемая архитектура предполагает прямое взаимодействие электродов с нейронами мозга. Такой подход позволяет значительно повысить качество и разрешение регистрируемых нейронных сигналов, обеспечивая более точную расшифровку двигательных намерений пациента.

Исследователи отмечают, что именно низкая точность считывания сигналов долгое время оставалась одним из главных ограничений существующих нейроинтерфейсов. Повышение качества данных открывает возможности для более эффективного управления внешними устройствами, восстановления двигательных функций и точечной нейростимуляции.

Сегодня технологии BCI условно делятся на три основных направления: неинвазивные, полуинвазивные и полностью инвазивные системы. Неинвазивные решения проще и безопаснее, однако уступают по скорости и точности передачи сигналов. Полностью имплантируемые платформы считаются наиболее сложным, но одновременно наиболее перспективным направлением развития нейроинтерфейсов.

Развитие подобных платформ в ближайшие годы может существенно изменить подходы к лечению тяжёлых неврологических

нарушений, позволив пациентам восстанавливать управление устройствами, средствами коммуникации и, потенциально, собственными двигательными функциями напрямую через нейронную активность мозга.

### Гуманоидных роботов научили «предугадывать прикосновения» для работы в реальном мире

Исследователи из Carnegie Mellon University и Bosch Center for Artificial Intelligence представили новую ИИ-систему для гуманоидных роботов, которая позволяет значительно улучшить работу с объектами в сложной реальной среде. Технология получила название Humanoid Transformer with Touch Dreaming (HTD) и ориентирована на решение одной из главных проблем современной робототехники – надёжного взаимодействия с физическим миром.

В отличие от большинства существующих систем, опирающихся преимущественно на компьютерное зрение, HTD активно использует тактильную и силовую обратную связь. Робот не просто реагирует на контакт, а пытается заранее предсказать, как он изменится во время выполнения действия. Исследователи называют этот подход «мечтанием о прикосновении» (Touch Dreaming).

Подобная способность особенно важна для задач, которые остаются сложными даже для современных гуманоидных платформ: складывание ткани, перенос хрупких предметов, зачерпывание сыпучих материалов или манипуляции с объектами, положение которых постоянно меняется. В таких сценариях одной только визуальной информации недостаточно – малейшее изменение контакта может привести к полной потере контроля над задачей.

В основе HTD лежит трансформерная модель, обученная методом имитационного об-

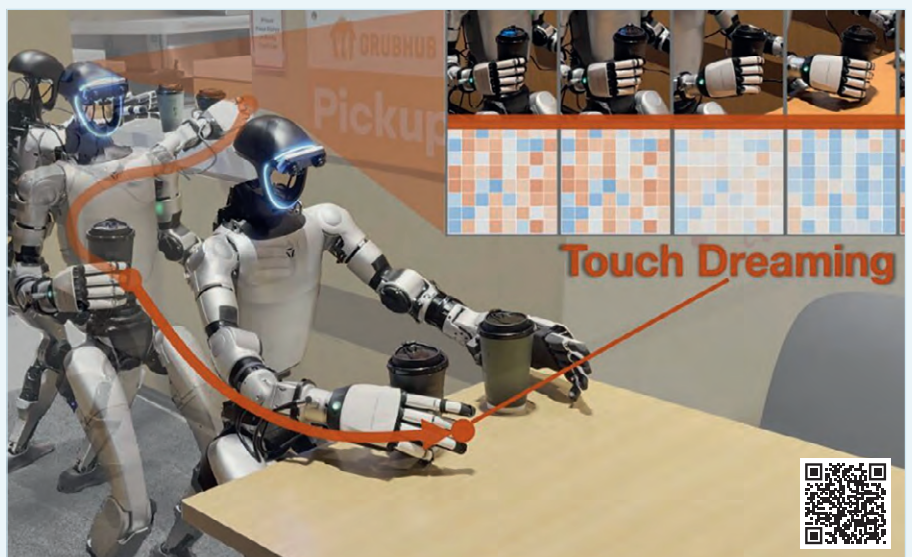
учения. Однако система предсказывает не только будущие действия робота, но и будущие тактильные состояния, силы и взаимодействия с объектом. Вместо обработки «сырых» данных сенсоров модель использует компактные латентные представления тактильной информации, что помогает снизить влияние шумов и сосредоточиться на действительно значимых физических взаимодействиях.

Дополнительной особенностью платформы стала разделённая архитектура управления телом. Нижняя часть робота отвечает за поддержание баланса и устойчивости, тогда как верхняя часть занимается манипуляциями и движениями рук. Такой подход снижает взаимное влияние между локомоцией и работой манипуляторов – одной из ключевых проблем гуманоидной робототехники.

Во время испытаний система выполняла пять сложных реальных задач, включая складывание полотенец, организацию книг, уборку кошачьего наполнителя и подачу чая. По данным разработчиков, HTD обеспечила улучшение успешности выполнения задач почти на 91% по сравнению с сильной базовой системой АСТ.

Платформа объединяет сразу несколько технологий: управление телом на базе обучения с подкреплением, обратную кинематику, VR-телеоперацию, тактильное сенсорное восприятие и имитационное обучение. Часть программного кода уже опубликована на GitHub в открытом доступе.

Авторы проекта считают, что подобные системы могут стать важным шагом к созданию гуманоидных роботов, способных работать в больницах, магазинах, домах и на производстве – в условиях, где требуется постоянное взаимодействие с непредсказуемой физической средой, а не только выполнение заранее заданных движений.



# Параллельное соединение однотипных модулей электропитания для резервирования с активным принудительным распределением тока нагрузки

Виктор Жданкин (info@prochip.ru)

В статье кратко рассмотрены основные проблемы, возникающие при параллельном соединении модулей электропитания для увеличения мощности и резервирования в современных распределённых системах электропитания для сложных радиотехнических, компьютеризированных и телекоммуникационных комплексов. Рассмотрен метод равномерного распределения тока нагрузки и синхронизации высокой частоты преобразования включённых параллельно однотипных модулей DC/DC-преобразователей напряжения Brick (2-го поколения) компании Wibbow с применением двунаправленного цифрового интерфейса между модулями, обеспечивающий несложное надёжное параллельное соединение для повышения выходной мощности и резервирования.

Специалисты по преобразовательной технике, проектирующие системы электропитания, могут подтвердить, что разработка является нетривиальной задачей, пронизанной тонкостями, которые могут проявлять себя в трудно диагностируемых системных особенностях. Удачный пример, относящийся к данному вопросу: многие системы электропитания заявляют о своей высокой надёжности, но тщательный анализ выявляет случаи отказа системы вследствие часто игнорируемых отказов одного её элемента.

Высокая надёжность требует, чтобы в случае отказа одного элемента система электропитания была способна обеспечить заданное значение выходной мощности или работающая система была способна снижать требования к полной мощности. В высоконадёжных системах электропитания обычно используется резервирование, опирающееся на дополнительные источники питания в системе электропитания сверх тех, которые требуются для питания нагрузки. При аварийном режиме эти дополнительные источники питания могут восполнить недостаток неисправных модулей, таким образом значительно повысив надёжность системы и минимизировав или даже устранив время простоя. Так как резервированные системы электропи-

тания фактически имеют большую стоимость, их использование обычно ограничивается применениями, требующими высокой эксплуатационной готовности системы, такими как высокопроизводительные компьютеры обработки транзакций, локальные и глобальные сети, телекоммуникационное оборудование.

Стоимость, как правило, ограничивает использование резервированных систем электропитания несмотря на то, что ранее развивавшаяся тенденция к понижению стоимости одного ватта мощности закрыла разрыв между действительной стоимостью и желательной стоимостью реализации системы. Действительная стоимость определяется здесь как материальная стоимость технических средств, необходимых для создания требуемой системы электропитания без учёта возможных издержек, понесённых вследствие отказа системы. Определение точной стоимости является не очень простым делом, так как оно должно учитывать сложные для оценки показатели, такие как упущенные возможности и вероятные правовые последствия. Действительная стоимость уменьшается, в то время как оценочная стоимость этих дополнительных факторов возрастает. Аналогично реальная стоимость снижается,

так как снижается материальная стоимость силовых компонентов, которые должны быть использованы в системе. Поэтому, прежде чем определять, требуется или нет резервированная система питания, необходимо учитывать влияние отказа системы. Важным фактором является то, что поскольку зависимость общества от технических средств возрастает, приемлемые затраты на реализацию резервированной системы питания будут возрастать, так как время вынужденного простоя системы будет становиться менее допустимым и более дорогостоящим для пользователей системы.

В компоновке резервированных систем электропитания должны быть приняты компромиссные решения, которые непосредственно влияют на стоимость, сложность системы и её работоспособность. Формула  $(N+M)$  используется для определения уровня резервирования, где  $N$  – это количество источников питания, требуемых для обеспечения заданного значения выходной мощности для питания нагрузки, а  $M$  – количество дополнительных резервных источников питания, применяемых для повышения надёжности. Очевидно, что, поскольку  $M$  резервных модулей питания повышают надёжность системы, стоимость системы также увеличивается. Например, возьмём компоновку, где к нагрузке подключены два преобразователя напряжения Модуль 1 и Модуль 2. В этом случае  $N = 1$  и  $M = 1$ , означая, что один преобразователь требуется для обеспечения заданного значения мощности нагрузки, а другой дополнительный преобразователь является резервным и используется для повышения надёжности системы. Рассмотрим несколько проблем, связанных с этой компоновкой. Главное, несмотря на то что система резервированная, здесь нет обязательного сохра-

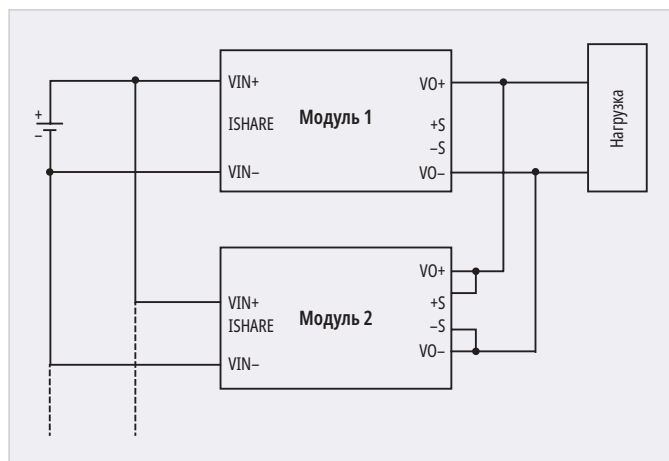


Рис. 1. Блок-схема системы электропитания с параллельным соединением модулей преобразователей напряжения без механизма распределения тока нагрузки

нения работоспособности при отказе отдельных элементов модуля. Например, в том случае, когда видом отказа является закороченный выходной конденсатор, допустим, в Модуле 1, выход Модуля 2 также будет закорочен, если модули работают параллельно (рис. 1). Этот недостаток можно исправить включением блокирующих диодов по схеме «ИЛИ» последовательно с каждым выводом положительного напряжения, таким образом разделяя выходы друг от друга в случае короткого замыкания выхода (рис. 2).

### Режим перенапряжения

Дистанционное измерение напряжения на нагрузке (или отслеживание тока нагрузки и формирования управляющего сигнала для источника опорного напряжения) позволяют преобразователю контролировать и регулировать выходное напряжение непосредственно на нагрузке (выводы внешней обратной связи +S и -S подключены непосредственно к зажимам нагрузки, рис. 2). В некоторых системах, где существует чрезмерное падение напряжения на соединительных проводах, дистанционное измерение компенсирует эти потери, позволяя формировать в результате стабилизированное напряжение на нагрузке. Но когда напряжение на выходе преобразователя повышается для компенсации потерь напряжения на токоведущих проводах, необходимо соблюдать осторожность для гарантирования, что выходное напряжение не достигнет условия перенапряжения, которое во многих устройствах приведёт к блокировке преобразова-

теля. Снабжение электропитанием в таком случае может быть восстановлено повторным включением преобразователя – в результате возникает простой системы.

При параллельном соединении с развязывающими диодами почти всегда в этом случае должно быть использовано дистанционное измерение напряжения на нагрузке для компенсации падения напряжения на диодах. Альтернативой является подстройка выходного напряжения модулей для компенсации падения напряжения на диоде. Но у обычного преобразователя с 5-вольтовым выходом допустимая величина компенсации дистанционного измерения равна 10% или 0,5 В. И при приблизительной величине падения напряжения на блокирующем диоде 0,4 В это допущение оставляет небольшой запас для любых дополнительных потерь напряжения на соединительных проводах. Для преобразователей с выходными напряжениями 3,3 В и 2 В проблема становится ещё более острой: может потребоваться смещение уставки выше номинала (например, до 3,7 В и 2,4 В), а также переход от дистанционного к локальному измерению напряжения [1]. В этой ситуации блокирующие диоды должны быть подобраны по соизмеримым значениям прямых падений напряжений. Эта проблема может быть решена применением в качестве защитных элементов МОП-транзисторов с небольшим сопротивлением сток-исток в открытом состоянии и падением напряжения на транзисторе несколько десятков мВ, но в этом случае потребуются приме-

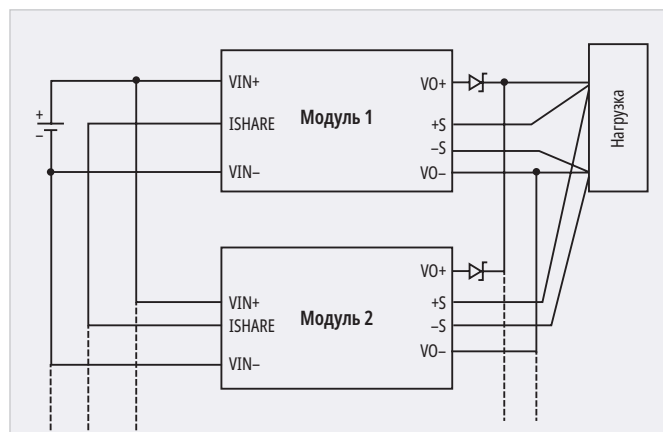


Рис. 2. Блок-схема системы электропитания с параллельным включением модулей питания, равномерным распределением мощности нагрузки с защитными диодами (по схеме «ИЛИ») от короткого замыкания по выходу и дистанционным измерением напряжения на выводах нагрузки

нение дополнительной схемы управления МОП-транзисторами [2], [3].

Кроме того, преобразователи не могут гарантировать равномерное распределение токов, так как обратная связь регулирования выходного напряжения с высоким петлевым усилением вызывает дисбалансы выходных токов. Это означает, что Модуль 1 может быть нагружен на 100%-ную нагрузку, в то время как Модуль 2 будет находиться в режиме холостого хода. Эта компоновка имеет несколько негативных последствий. Первое, в том случае, когда Модуль 1 обеспечивает полную нагрузку, он также рассеивает всю тепловую энергию. Это приведёт к значительно меньшему значению среднего времени наработки до отказа для Модуля 1, чем для случая, когда ток был бы распределён между преобразователями в равной степени. Второе, в случае выхода из строя Модуля 1 Модуль 2 должен переключиться фактически из режима холостого хода в режим работы при полной нагрузке. Это скачкообразное изменение нагрузки, вероятно, приведёт к резкому падению напряжения на выходе Модуля 2, так как его внутренний выходной конденсатор в начальной стадии лишится всей своей накопленной энергии, в то время пока модуль пытается достичь своего заново установленного рабочего режима.

Это резкое понижение выходного напряжения может привести к нарушению работы функциональных частей питаемой аппаратуры, вызвав системный сбой, перезагрузку, защёлкивание и даже выключение. Если бы в начальной стадии нагрузка между



Рис. 3. Внешний вид модулей семейства Brick 2-го поколения с выводом «PR» двунаправленного цифрового порта для синхронизации частоты преобразования и равномерного распределения мощности нагрузки между отдельными однотипными модулями при параллельном включении

модулями была распределена поровну, Модуль 2 был бы значительно ближе к рабочему режиму в его новых условиях полной нагрузки, и кратковременное падение напряжения было бы менее жёстким, зачастую – незначительным.

В этом случае однопроводное соединение с равномерным распределением токов, установленное между двумя или более преобразователями, вынуждает их обеспечивать равные доли мощности нагрузки.

### Распределение тока – важный аспект надёжности системы и резервирования

Распределение тока является весьма важным аспектом надёжности системы и резервирования. Существует широкий спектр подходов к обеспечению равномерного распределения тока: от пассивных методов, основанных на введении балансирующих резисторов или формировании регулируемого падающего участка выходной характеристики преобразователя, что позволяет компенсировать технологические разбросы, до активных решений, реализующих принцип «включай и работай» [4]. В одном методе активного распределения токов модули взаимодействуют между собой для форсирования распределения тока (метод разделения тока последовательным опросом). Этот механизм может произвести впечатление универсального средства для системотехников, ищущих достоверное решение; эта схема представляется такой, что многие разработчики считают, что она может быть стойкой к отказам. Однако во множестве раз

проверенных элементах схемы один необнаруженный вид отказа может отключить всю систему.

Но что, если что-нибудь пойдёт неправильно с выбранным каналом распределения тока преобразователя, например, если внутренняя схема распределения тока выйдет из строя, замкнётся на землю или любой другой потенциал, отличный от того, который гарантированно обеспечивает одинаковое распределение токов? Это разрушит всю шину распределения тока (I share) и приведёт к отказу системы. А что, если действующие линии, которые соединяют выводы управления распределением мощности нагрузки (I share) преобразователей, каким-нибудь образом выйдут из строя, возможен ли разрыв цепи или непреднамеренное замыкание с другой линией или компонентом?

Если вероятность возникновения некоторых из этих механизмов отказа высокая, выше других, фактом является то, что это внутренний неотъемлемый недостаток схемы. Слабым звеном являются выводы распределения тока нагрузки (I share), не изолированные друг от друга, которые в большинстве случаев просто не могут быть изолированными. То есть, поскольку многие преобразователи используют аналоговые сигналы распределения токов, их выводы распределения токов (I share) должны быть соединены непосредственно друг с другом. Кроме того, эти аналоговые сигналы имеют ограниченную помехозащищённость. Усиление и защита этой части системы электропитания применением специально разработанного преобразователя или серийного пре-

образователя, имеющего соответствующее схемное решение, будет обеспечивать действительную стойкость к отказам или повышенную надёжность.

### Параллельная работа

Для совершенствования архитектуры системы электропитания в модулях DC/DC-преобразователей второго поколения Brick компании Wibbow (рис. 3) применяется оригинальный цифровой сигнал распределения тока, который способствует параллельной работе преобразователей для увеличения мощности и резервирования. Вывод «PR» является двунаправленным портом, который отправляет и получает информацию между модулями. Импульсный сигнал в параллельной шине служит для синхронизации высокой частоты переключения каждого модуля, который, в свою очередь, заставляет их равномерно (с точностью до 5%) распределять ток нагрузки между модулями. Эти модули обладают способностью распределять роль управления, то есть имеет место демократический массив (принудительное распределение тока в определённом порядке). В системе имеется один модуль, передающий синхронизирующие импульсы по параллельной шине, в то время как другие модули на шине принимают сигнал – находятся в режиме прослушивания. Далее в статье рассмотрена структура шины интерфейса PR с трансформаторной развязкой и пример реализации системы электропитания мощностью несколько кВт с принудительным распределением тока нагрузки, обеспечивающей достаточно высокую точность разделения тока.

### Соединения шины распределения мощности нагрузки

#### Связанный по переменному току однопроводной интерфейс

Все выводы PR подключаются к единой коммуникационной шине через конденсатор ёмкостью 0,001 мкФ (500 В). Отрицательные выводы входного напряжения –IN должны быть подключены к одинаковому электрическому потенциалу. Это соединение обеспечивает равномерное распределение тока нагрузки и является стойким к отказам, за исключением канала связи (рис. 4). С применением этого

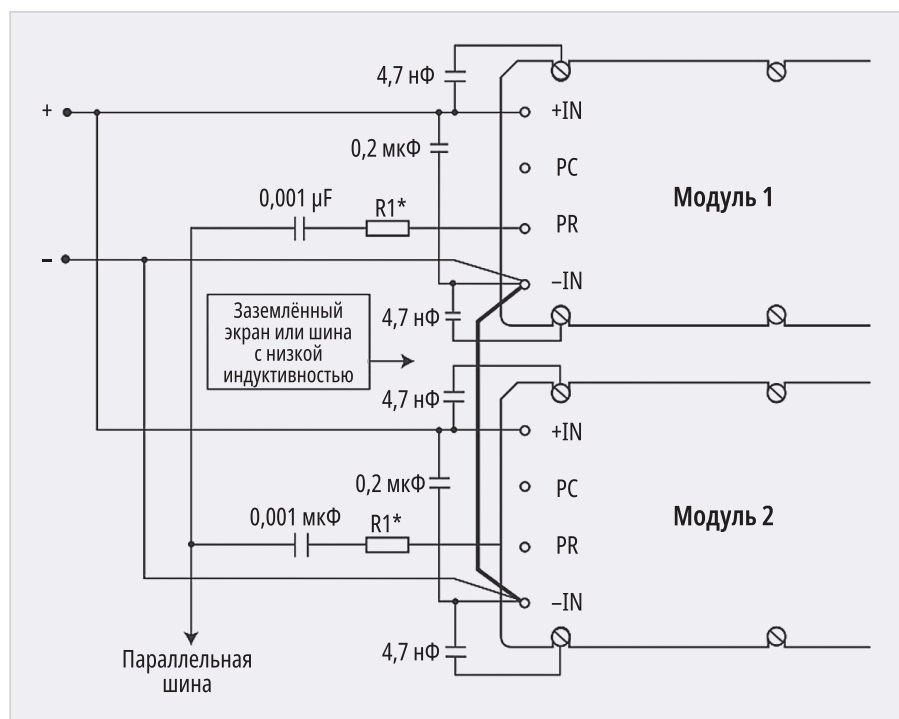


Рис. 4. Однопроводной интерфейс по переменному току, организованный через порт PR-модулей Brick (2-го поколения)

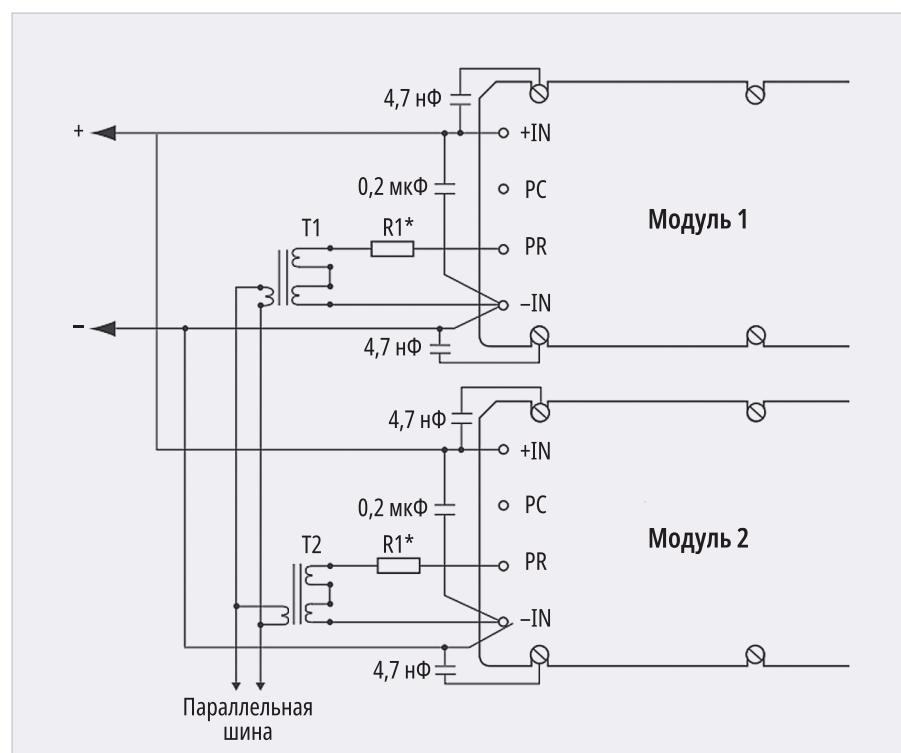


Рис. 5. Двухнаправленный интерфейс между выводами PR с гальванической развязкой, обеспечиваемый трансформатором

метода могут быть соединены параллельно до шести модулей.

### Интерфейс с трансформаторной связью

Модули или массивы модулей могут также быть соединены для распределения мощности нагрузки с обеспечением гальванической развязки между

выводами PR посредством интерфейса с трансформаторной связью (рис. 5). Этот метод позволяет включить параллельно четыре и более преобразователя (до 12) без буферизации шины.

Для больших массивов преобразователей или длинных сигнальных линий (> 30 см) может потребоваться использование буферной схемы.

Источник напряжения для буферной схемы может быть получен от выводов РС (управление включением/выключением с первичной стороны). Во многих применениях будет полезно подключить последовательно с выводом PR каждого модуля дополнительный резистор (формирующий дополнительный импеданс Z1 на входе). Для улучшения формы сигнала PR может быть использовано ферритовое кольцо с низкой добротностью 33 Ом, 100 МГц или резистор сопротивлением 5...15 Ом.

### Рекомендации по параллельному соединению

Внимание должно быть уделено исключению влияния мешающих сигналов (шумов) на параллельную шину, так как они могут препятствовать правильному распределению мощности между модулями. Одними из возможных источников помехи являются пульсации входного тока, протекающие через входные выводы подводимой мощности. Входы сигнала PR и питания совместно используют общий обратный провод, которым является вывод отрицательного напряжения. Для устранения пульсаций входного тока на параллельной шине требуется принимать специальные меры. Для шунтирования пульсаций входного тока на входе каждого модуля между выводами +IN и -IN устанавливаются керамические конденсаторы ёмкостью 0,2 мкФ (рис. 5). Они обеспечивают шунтирующую пульсации входного тока цепь и существенно его уменьшают. Для снижения синфазной составляющей тока применяются конденсаторы  $C_V$  ёмкостью 4,7 нФ, которые устанавливаются между выводами +IN и основанием модуля и между выводами -IN и основанием каждого модуля, таким образом образуя шунтирующую цепь для синфазной составляющей пульсаций входного тока.

Некоторые применения требуют физического разделения параллельно включённых модулей на разных платах и/или входной мощности от отдельных источников энергии. В этих случаях требуется трансформаторная связь сигнала PR для предотвращения межмодульного отражения сигнала в виде синфазной помехи от взаимодействия с передачей синхронизирующего импульса. Высокоскоростная буферизация может потребоваться

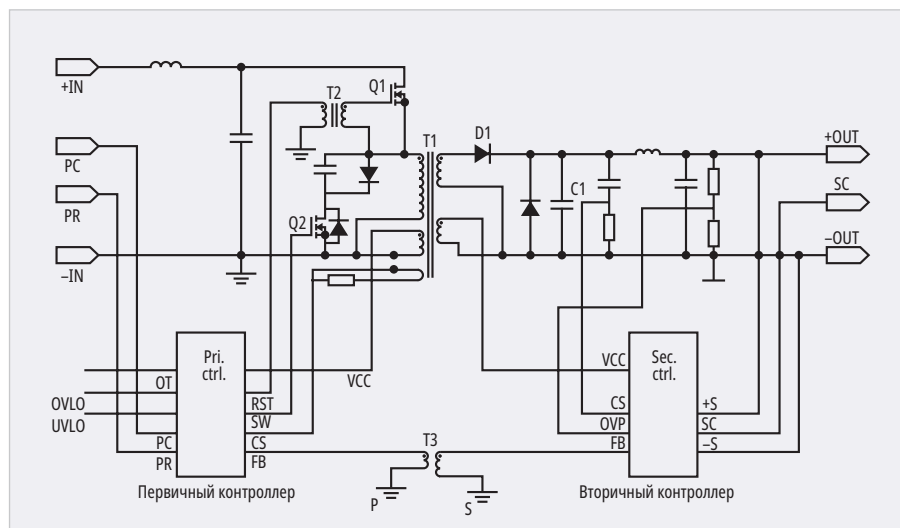


Рис. 6. Упрощённая принципиальная схема DC/DC-преобразователей Brick 2-го поколения с перечнем защитных функций

для больших массивов преобразователей или в том случае, когда расстояние между модулями больше, чем 30 см. Это необходимо вследствие того обстоятельства, что все модули, за исключением одного, передающего данные, находятся в режиме прослушивания. Каждый приёмник в канале связи представляет собой нагрузку для источника сообщений, равную примерно 500 Ом и зашунтированную ёмкостью 30 пФ. Длинные соединительные провода вносят потери и создают паразитное реактивное сопротивление на шине, которое может ослабить и исказить синхроимпульс. Для стабильности работы ширина полосы пропускания шины должна быть по крайней мере 60 МГц, а ослабление сигнала менее 2 дБ. В большинстве случаев достаточно применения трансформаторной связи без буферизации.

### Создание массивов высокой мощности с использованием DC/DC-преобразователей напряжения семейства Brick (2-го поколения)

Как отмечалось ранее, преобразователи серии Brick 2-го поколения имеют функцию параллельной работы нескольких модулей на общую нагрузку. Уникальный интерфейс для организации параллельной работы позволяет создавать системы мощностью несколько киловатт с применением нескольких внешних компонентов. Для соединения в массивы с мощностью несколько киловатт более чем 12 однотипных модулей требуется буферизация сигнала PR, так как

достигается предел нагрузочной способности по выходу канала связи. Далее будет показано, как использовать буферизацию, чтобы увеличить способность канала управлять большим числом преобразователей, и приводится пример, каким образом быстро создать макет системы мощностью несколько киловатт. Это даёт семейству Brick эффективность функционирования при использовании для создания систем электропитания с выходной мощностью в диапазоне нескольких киловатт.

### Структура шины PR

#### Конфигурации верхний уровень / нижний (ведомый) уровень

Первое, что должно быть выполнено при разработке больших массивов, – определение количества модулей верхнего уровня. Большие количества модулей верхнего уровня усилят резервирование, но усложнят организацию шин PR и дистанционного измерения напряжения на нагрузке (+S/-S). Выглядит заманчивым сконфигурировать все модули в демократический массив, когда каждый модуль оказывает равное влияние на результирующее напряжение шины, но это может оказаться громоздким для массивов с числом модулей более трёх. Для больших массивов лучшим вариантом является установка до трёх модулей в качестве модулей верхнего уровня и добавление дополнительного управляемого модуля для большей мощности. Это обеспечивает достаточное резервирование для большей части применений. На рис. 6 показана

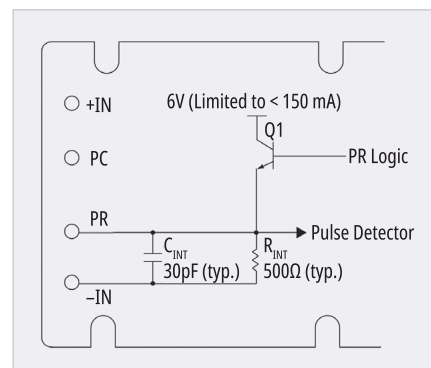


Рис. 7. Эквивалентная схема вывода PR

на весьма упрощённой принципиальной схеме преобразователя постоянного напряжения семейства Brick (второго поколения), выполненная по квазирезонансной схеме прямоходового преобразователя с управлением преобразованием методом частотно-импульсной модуляции (ЧИМ) и перечнем основных защитных и сервисных функций. Переключение силового транзистора Q1 из закрытого состояния в открытое происходит при нулевом значении протекающего через него тока (режим «мягкой» коммутации). Резонансный контур образован индуктивностью рассеяния трансформатора T1 и дополнительной ёмкостью C1. Отрицательная волна синусоиды отсекается диодом D1. Таким образом, на конденсаторе C1 формируются импульсы положительной полярности одинаковой длительности и амплитуды – «кванты» энергии величиной  $CV^2/2$ . Регулирование выходного напряжения осуществляется путём изменения числа «квантов» (частоты их следования), а не длительности импульсов, как в схеме с широтно-импульсной модуляцией. Частота импульсов зависит от мощности в нагрузке, величины входного напряжения и может изменяться от сотни килогерц на холостом ходу до 1,5 МГц при минимальном входном напряжении и максимальной мощности в нагрузке.

Схемы управления (контроллеры на первичной и вторичной сторонах) выполнены в виде специализированных интегральных микросхем. Схема активного демпфирования – узел на транзисторе Q2 – формирует напряжение, величина которого может приближаться к значению входного напряжения, и, таким образом, переключение транзистора происходит при нулевом напряжении сток-исток. В результате КПД преоб-

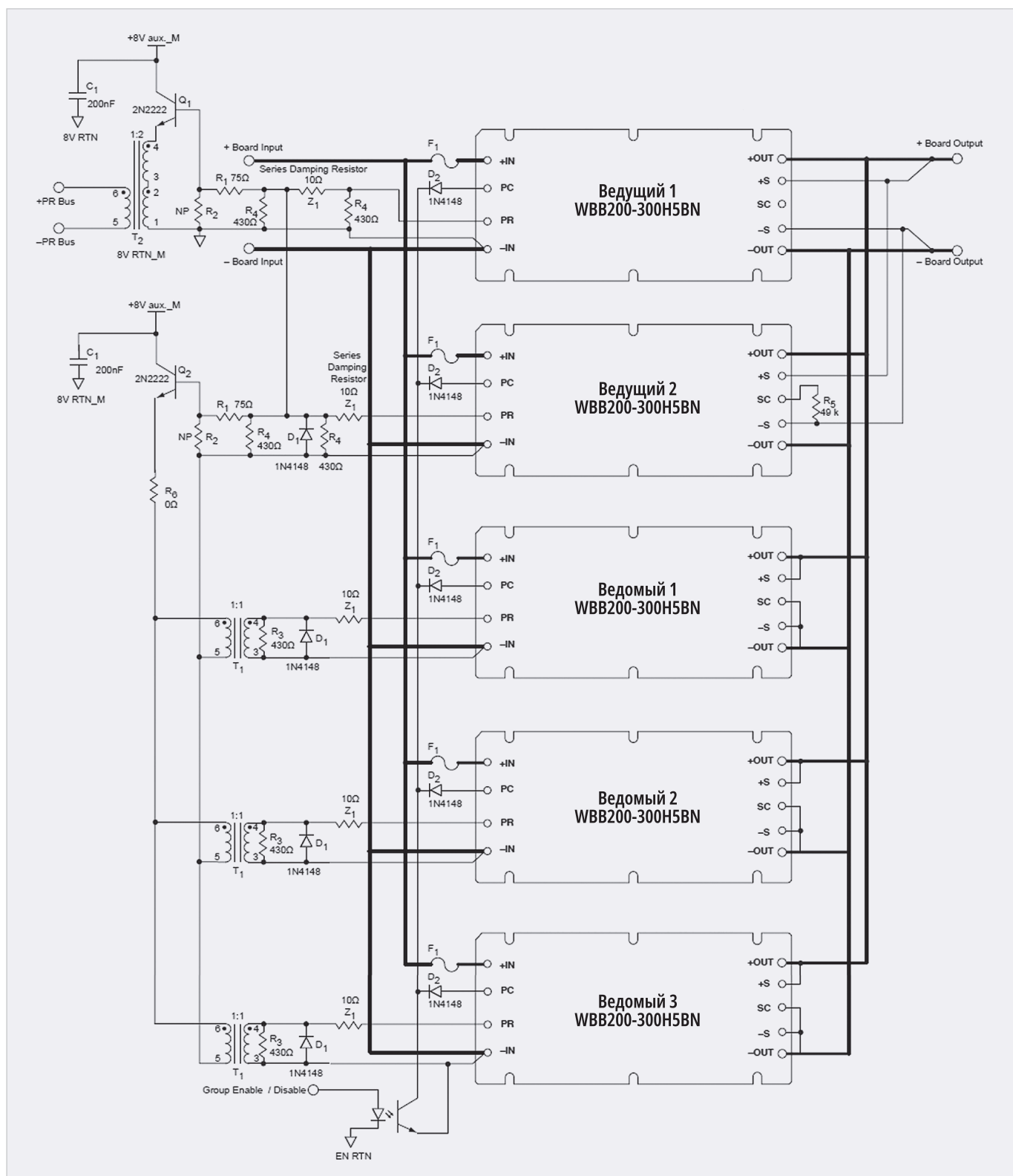


Рис. 8. Макетная плата массива модулей верхнего уровня, одна плата в системе

разователей возрастает на несколько процентов (до 92,5% макс.).

Благодаря использованию резонансной схемы с ЧИМ удалось значительно уменьшить размеры модулей и достичь высокого значения удельной мощности. Ещё одним достоинством резонансной схемы является существенное снижение уровня шумов и помех.

Преобразователи соответствуют требованиям к модулям для применения в высоконадёжных системах вторичного электропитания:

- управление включением и отключением внешним сигналом;
- взаимная синхронизация;
- подключение цепи внешней обратной связи;

- регулировка выходного напряжения (в пределах 75...110% от номинального);
- контроль сигнала технического состояния внешними узлами;
- параллельная работа в системе «N+1» при N = 12;
- наличие гальванической развязки и обеспечение стандартного значения прочности электрической изоляции;

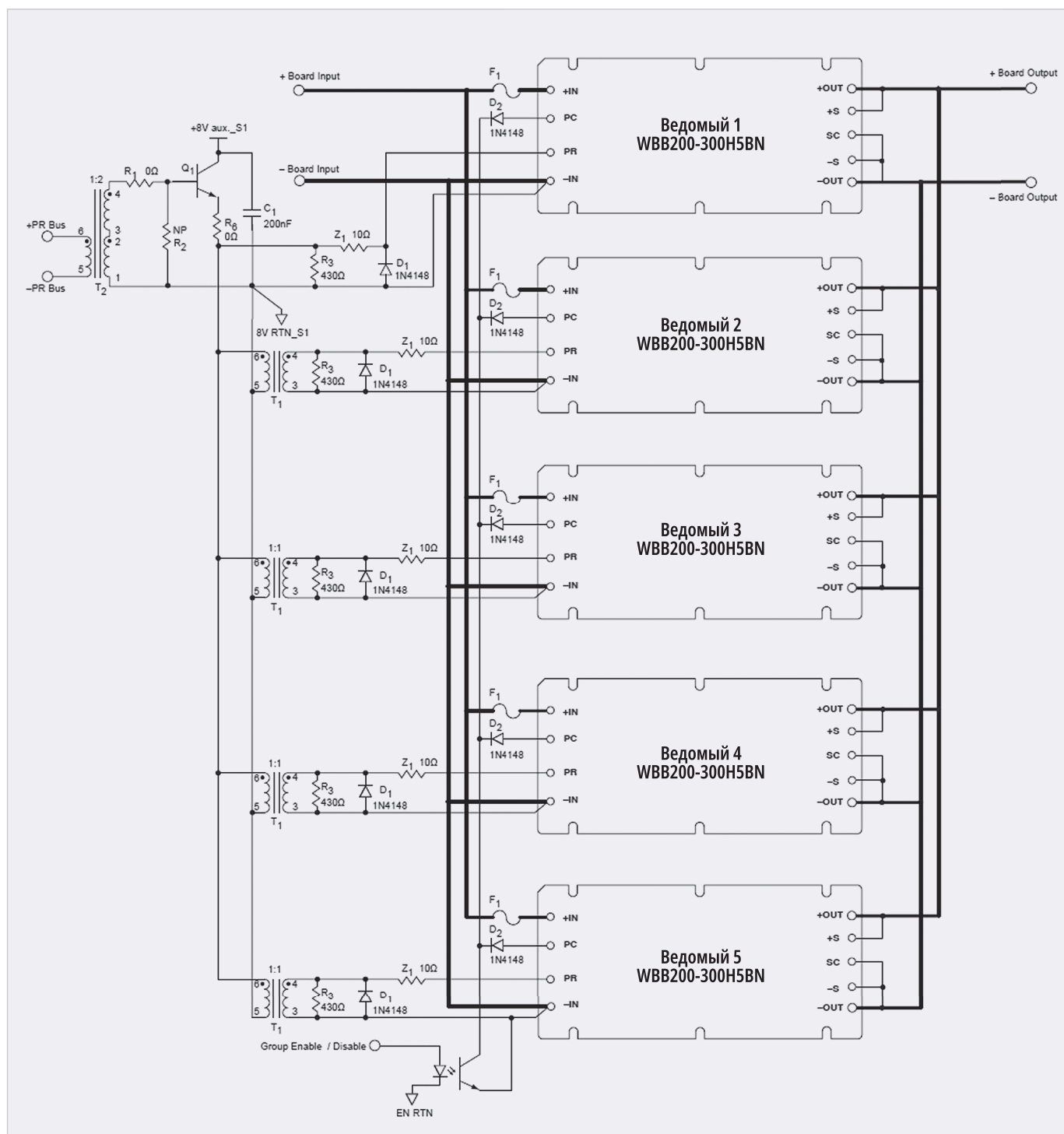


Рис. 9. Макетная плата массива модулей преобразователей второго уровня (четыре платы в системе)

● комплект защит (от перегрева, от перенапряжения на входе, от низкого напряжения на входе, перенапряжения на выходе, перегрузки и короткого замыкания на выходе).

При соединении вывода SC (контроллер выхода) с выводом -OUT внутренняя схема управления отключается, и модуль переходит в режим повторителя напряжения (усилитель тока) с управлением по выводу PR от задающего модуля (управляющего модуля верхнего уровня). При этом осуществляется синхронизация рабочей

частоты всех модулей системы и, как следствие, равномерное (с точностью 2...5%) распределение мощности между модулями. В системе электропитания применяются однотипные модули, не требуется использования более сложного ведущего преобразователя, что упрощает формирование склада запасных модулей.

Следует заметить, что модули серии Brick 2-го поколения компании Wibbow являются полными функциональными аналогами популярных модулей компании Vicor (семейства

Maxi, Mini, Micro), но применение собственных схемотехнических решений позволило повысить значение КПД на 7% по сравнению с изделиями Vicor за счёт снижения рассеиваемой мощности. Обмотки силовых трансформаторов интегрированы в несущую печатную плату. В связи с этим существенно облегчён тепловой режим элементов схемы, что обеспечивает надёжную работу преобразователей.

Из-за различий рабочих характеристик оригинальных изделий Vicor и преобразователей Brick Wibbow

не рекомендуется использовать их совместно в системе распределённого питания во всём диапазоне мощностей. Для надёжной и устойчивой работы выходная мощность преобразователей в таком случае не должна превышать 50% от максимального значения.

Принцип и алгоритм работы интерфейса для обеспечения параллельной работы аналогичны алгоритму организации параллельного включения у модулей компании Vicor, синхронизирующие импульсы также имеют длительность около 20 нс. Это позволяет просто осуществлять замену в текущих проектах модулей Vicor, которые в течение многих лет применяются в высоконадёжных распределённых системах вторичного электропитания для ответственной радиоэлектронной аппаратуры. Немногие компании, предлагающие альтернативы модулям Vicor, реализуют функцию параллельной работы – только одна российская компания предлагает 600-ваттные модули собственной разработки в формате Brick для работы от сетей постоянного напряжения 300 В с выходным напряжением 28 В с встроенным цифровым двунаправленным портом PR.

### Разводка магистралей между многочисленными платами

Часто необходимо распределить массив преобразователей на многочисленных печатных платах из-за требований к площади и температурным условиям. Разделение между платами внесёт дополнительный импеданс между преобразователями из-за дополнительной длины печатных проводников и соединительных проводов. Для предотвращения искажения сигналов управления вследствие разности импедансов разводки между преобразователями необходимо применить разделительный трансформатор, изолирующий шину PR. Рекомендуется размещать все преобразователи верхнего уровня на одной и той же плате. Это обеспечит минимальный уровень шума и задержку в линии между модулями верхнего уровня. Это особенно важно для очень больших массивов, которые будут критичны к воздействию высоких значений изменений тока  $di/dt$  и напряжения  $dV/dt$ . В том случае, когда применение требует резервирования между пла-

тами или между более чем 12 модулями, должна осуществляться двунаправленная буферизация. Но это находится за пределами рассмотрения данной статьи.

Между платами с относительно небольшими потерями сигнал PR должен быть проложен линией с небольшой индуктивностью.

Рекомендуется использовать витую пару, тогда как коаксиальный кабель для этой цели не подходит. Отражения, вызванные рассогласованием источника PR-шины, нагрузки и импеданса кабеля коаксиальным кабелем с низким уровнем потерь, демпфированы не будут, что приведёт к снижению качества импульсного сигнала PR.

### Буферизация

Применение высокоскоростного буферного устройства может потребоваться для больших массивов или в том случае, когда расстояние между модулями больше, чем 30 см. Это происходит, потому что все модули, за исключением одного, который передаёт, находятся в режиме приёма. Каждый приёмник представляет собой нагрузку для модуля верхнего уровня (источник сообщения) примерно 500 Ом, шунтированную конденсатором 30 пФ (см. схему на рис. 7). Длинное соединение вносит потери и паразитное реактивное сопротивление на шине, которое ослабляет и искажает импульсный синхронизирующий сигнал. Ширина пропускания шины должна быть по крайней мере 60 МГц.

Одна простая и надёжная буферная схема для сигнала PR показана на рис. 8 и рис. 9. Система разделена на одну плату верхнего уровня (рис. 8) и ряд плат второго уровня (рис. 9). Плата верхнего уровня содержит пять модулей. Два из них сконфигурированы в демократический массив, где у одного модуля выходное напряжение установлено резистором R5 на 2% ниже относительно другого. Схема узла регулировки выходного напряжения модуля Brick показана на рис. 10. Установка постоянного напряжения осуществляется путём добавления резистора между выводом –S и выводом SC (для понижения выходного напряжения). Эти модули управляют двумя буферными схемами через вывод PR. Первая буферная схема (транзистор Q2) управляет тремя дополнительными модулями второго уровня на плате верхнего уровня. Вторая схема управ-

ляет платами второго уровня. Каждая плата второго уровня содержит пять модулей, сконфигурированных как повторители напряжения (усилители тока) с подключёнными выходами SC (вывод индикации состояния модуля) с выводами –S. На каждой плате второго уровня установлен развязывающий трансформатор, который развязывает входной сигнал PR. Этот сигнал затем буферизируется (транзистор Q1 на рис. 9) и подводится к каждому модулю второго уровня.

Буферные схемы, по существу, являются эмиттерными повторителями, которые используют pnp-транзистор общего назначения. Трансформаторы, обозначенные на схеме как T1, имеют коэффициент трансформации 1:1. Трансформаторы, обозначенные как T2, имеют коэффициент трансформации 2:1 для того, чтобы обеспечить лучшее согласование распределительной шины PR. Обратный провод каждого трансформатора или буферной схемы должен быть подключён к выводу –IN соответствующего преобразователя через обмотку развязывающего трансформатора. Вспомогательный источник питания 8 В обеспечивает достаточный запас по мощности для повторителей. Это маломощная шина, которая может быть получена из более высокого напряжения с использованием линейного стабилизатора. Отдельный вспомогательный источник питания должен быть выведен на каждую плату для того, чтобы была осуществлена развязка PR-шины. Весьма важным является высокочастотное шунтирование непосредственно на каждом буферном устройстве.

Из-за высокой частоты сигнала PR должно быть уделено особое внимание качеству сигнала на шине PR. В компоновке должны быть предусмотрены места для последовательного и демпфирующего резисторов, как показано на рис. 8 и 9. Размещение всех этих компонентов может не потребоваться для всех массивов – всё зависит от конфигурации шины PR. Но модули высокого уровня и ведомые модули на выводах PR должны иметь защитные диоды (D1) для защиты от обратной полярности.

### Шунтирование

Выбор компонентов для шунтирования имеет важные последствия для стабильности и показателей электро-

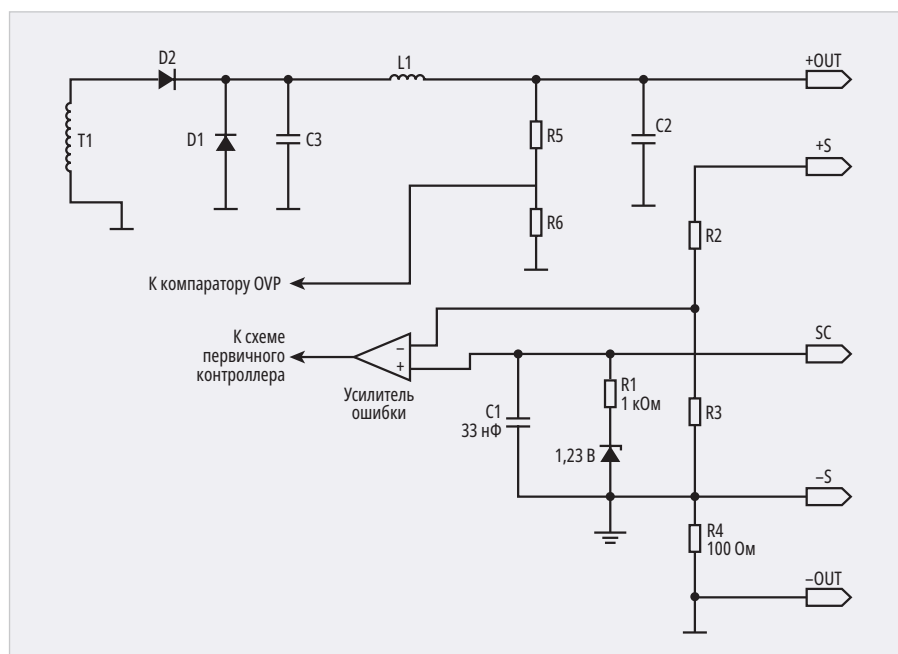


Схема узла регулировки выходного напряжения – уменьшение выходного напряжения модуля верхнего уровня осуществлено подключением резистора R5 (49 кОм) между выводами –S и SC, как показано на рис. 8

магнитной совместимости массивов большой мощности. Шунтирование синфазной помехи для каждого преобразователя должно быть выполнено, как показано в руководстве пользователя.

Шунтирование дифференциальной помехи должно быть рассмотрено в двух аспектах. Низкочастотное шунтирование, которое сохраняет импеданс источника низким и стабилизирует в преобразователе петлю обратной связи по напряжению, и высокочастотное шунтирование, которое подавляет импульсы, имеющие отношение к электромагнитным помехам, должны быть выполнены в соответствии с руководством по эксплуатации. Входной импеданс массива преобразователей определяется как отрицательный импеданс отдельного модуля, делённый на количество преобразователей в массиве. Это может представлять серьёзную проблему для очень большого массива с низким входным напряжением, где импеданс должен поддерживаться очень низким.

### Пример массива с мощностью 4,1 кВт и током нагрузки 817 А

Представленный далее опытный образец был выполнен на основе модулей, размещённых на макетных платах и соединённых, как показано на рис. 8 и 9. В прототипе используется 25 модулей WBB200-300H5BN, рабо-

тающих параллельно. Сборка имеет входное напряжение 300 В, выходное напряжение 5 В с суммарным током в нагрузку 817 А и состоит из массивов, объединённых в матрицу 5×5. Предусмотрен запас по мощности примерно 15%. Выходные соединительные проводники должны иметь очень большой диаметр, для того чтобы обеспечить достаточную токовую нагрузку, чтобы надёжно проводить сильные выходные токи. Для уменьшения риска помех, которые могут послужить причиной потери управления модулями высокого уровня, присутствует резистор R5, понижающий выходное напряжение на 2%. Когда используются преобразователи Half Brick в массивах параллельно включённых модулей, крайне важно, чтобы выходное напряжение каждого модуля высокого уровня настраивалось на разное значение с минимальной разницей в 2%.

Выводы РС (управление включением с первичной стороны) преобразователей имеют диоды, включённые по схеме «ИЛИ» для обеспечения группового включения/выключения в массиве. Этот сигнал может обеспечить внешняя схема управления, такая как микропроцессор (модуль контроля и управления). Весьма важно наличие в модулях схемы блокировки при минимальном входном напряжении и перенапряжении на входе. Вследствие падения напряже-

ния между входными проводниками отдельных плат для корректного управления выводами РС (сигнал Group Enable/Disable) должна использоваться оптопара (см. рис. 8 и 9).

Для шунтирования дифференциальной и синфазной составляющих пульсаций входного тока добавлены конденсаторы. Кроме того, параллельно входу всего массива добавлена демпфирующая цепь из последовательно включённых конденсатора 24 мкФ и резистора 6,8 Ом (рис. 11). Метод определения значений этих компонентов при полной нагрузке 4,1 киловаттного массива приводится в документации.

### Проверка системы

Даже детальный расчёт массива не может спрогнозировать все факторы, которые будут влиять на технические характеристики. Для определения оптимальных параметров компонентов и исключения возможных проблем рекомендуется проводить тщательную проверку на этапе макетирования. Испытания должны включать динамическое изменение нагрузки, проверку пульсаций на входе и выходе, анализ частотной характеристики на запас устойчивости по фазе и качество сигнала на шине PR. Для безопасности и упрощения проверки первичное включение питания следует выполнять для подгруппы модулей. Например, плата с модулями верхнего уровня упомянутого ранее массива была протестирована первой, и затем система тестируется по мере добавления каждой новой платы нижнего уровня.

Необходимо оценить значение показателя безотказности с учётом загрузки модулей  $(N/[N+1]) \cdot I_{ннр}$ ,  $I_{нн}$  – номинальное значение выходного тока модуля), средней наработки до отказа при реальной температуре корпуса и минимальном значении уровня вероятности безотказной работы ( $\gamma$ ) для устройств силовой электроники, равным 95%, а также своевременном проведении предусмотренных регламентных работ.

Оценка значения показателя безотказности для реальной системы вторичного электропитания, реализованной на основе 600-ваттных модулей Brick с выходным напряжением 28 В и входным напряжением 300 В для различных способов резервирования, рассмотрена в работе [5].

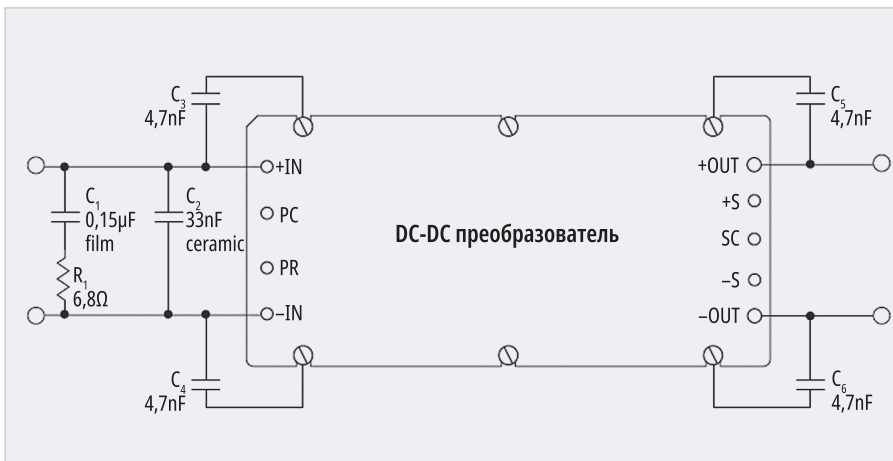


Рис. 11. Шунтирование дифференциальных и синфазных помех на каждом модуле 4,1 кВт матрицы

Применение в системах электропитания резервирования и специальных алгоритмов функционирования позволяет достичь очень высоких значений наработки на отказ при достаточно жёстких значениях  $\gamma$  (95% и выше).

### Заключение

Перед разработчиками систем электропитания, стремящимися создать

структуру с повышенной надёжностью, возникает много проблем. Осведомлённость об общих подводных камнях в системе, устойчивой к отказам, и доступность высокоэффективных модулей питания с необходимым комплектом сервисных и защитных функций для реализации высоконадёжных систем позволяют разработчикам достичь недоступных ранее уровней надёжности.

Поскольку мир становится всё более зависимым от коммуникационных технологий, время вынужденного простоя системы становится менее допустимым, чем когда-либо прежде.

### Литература

1. Золло Б. Достоинства и недостатки систем защиты от перенапряжения // Компоненты и технологии. 2015. № 3.
2. Патока М. Основы объединения систем электропитания // Электронные компоненты. 2007. № 8.
3. Джонстон Дж. Выбор силовых полевых транзисторов для контроллеров ORING MOSFET // Электронные компоненты. 2015. № 12.
4. Герасимов А.А., Кастров М.Ю., Лукин А.В. Принудительное распределение тока нагрузки в резервированных системах электропитания // Практическая силовая электроника. 2002. № 7.
5. Либенко Ю.П., Четин А.Н. Способы обеспечения параметрической многовариантности системы вторичного электропитания с магистрально-модульной архитектурой // Электропитание. 2011. № 1.





# ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ МОДУЛИ ПИТАНИЯ

- ✦ Совместимость с модулями питания DC-DC 2-го и 3-го поколений компании Vicor
- ✦ Обширный выбор моделей с выходными мощностями от 75 до 600 Вт
- ✦ Входные напряжения 9-77 В, 100-425 В
- ✦ Форм-факторы Full Brick, Half Brick, Quarter Brick
- ✦ Широкий диапазон рабочих температур от -55 до +100 °C






**АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА**

+7 (495) 232-52-22 ✦ INFO@PROCHIP.RU ✦ WWW.PROCHIP.RU



# Эффективное количество бит цифровых осциллографов: влияние на результаты измерений и экспериментальное определение для приборов VESNA

Николай Лемешко, Антон Тимонович

В статье рассмотрены особенности измерения эффективного числа бит (ENOB) для цифровых осциллографов. Представлен анализ ENOB как характеристики аналого-цифрового преобразования, отмечены ключевые причины искажений сигналов при аналого-цифровом преобразовании. Проанализированы особенности определения эффективного количества бит цифровых осциллографов на основе прямых измерений, обоснован наиболее простой способ определения ENOB на базе сопоставления среднеквадратичного напряжения на выходе генератора синусоидального сигнала и аналогичного значения, измеренного осциллографом. Для осциллографов серий OVA3, OVS3, OVU2 нового для российского рынка бренда VESNA проведены экспериментальные оценки эффективного количества бит.

## Введение

В настоящее время цифровые осциллографы по праву заняли центральное место в оснащении радиоизмерительных лабораторий. Переход к методам измерений, основанным на цифровой обработке сигналов, значительно расширил основные возможности приборов: к ним добавились автоматическое измерение параметров сигналов, гибкие варианты синхронизации по заданным условиям, а также специализированная постобработка, включая цифровую фильтрацию и декодирование сигналов по стандартным протоколам передачи данных, наряду со множеством других полезных функций. Первичны-

ми данными для их реализации, равно как и для построения осциллограмм, является поток оцифрованных отсчётов входного сигнала.

При выборе осциллографа для решения конкретных измерительных задач пользователи, если они не имеют глубоких познаний в области процесса аналого-цифрового преобразования (АЦП), обычно ориентируются на заявленные погрешности по амплитуде и разрядность  $N$ , которая определяет разрешение по амплитуде и отношение сигнал/шум SNR (Signal to Noise Ratio) преобразования. Однако значение SNR, определяемое разрядностью АЦП, не даёт решительной никакой информации о качестве

реализации АЦП. Этот параметр можно сопоставить только идеальному аналого-цифровому преобразователю (АЦП), который отличается абсолютной линейностью, отсутствием временных погрешностей АЦП и внутреннего шума. Таким образом, ориентация только на разрядность преобразования при выборе цифровых осциллографов хоть и возможна, но не должна являться определяющим фактором.

Широкое применение АЦП в области радиосвязи потребовало использования более приемлемой для этой цели характеристики. В качестве неё справедливо был избран динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (Spurious-Free Dynamic Range – SFDR). Значение этого параметра может быть сопоставлено также цифро-аналоговым преобразователям и аналоговым радиоприёмникам. Измерение SFDR реализуется при синусоидальном входном сигнале на основе преобразования Фурье (рис. 1, [2]) сопоставлением уровня спектра на несущей частоте и наибольшей спектральной составляющей, что делает этот параметр весьма показательным при приёме узкополосных сигналов. Однако задача получения осциллограмм не соответствует этому случаю, поскольку влияние на результат будет оказывать интегральный уровень шумов и искажений. Для характеристик АЦП в этом смысле следует использовать эффективную разрядность, или эффективное количество бит ENOB (Effective Number of Bits) [3], которое является обобщённой характеристикой качества оцифровки сигналов. Чем выше значение ENOB, тем точнее воспроизводятся уровни напряжения, зарегистрированные при ЦАП. Применительно к осциллографии этот параметр определяет качество измерения в части соответствия картины на экране прибора фактически имеющемуся сигна-

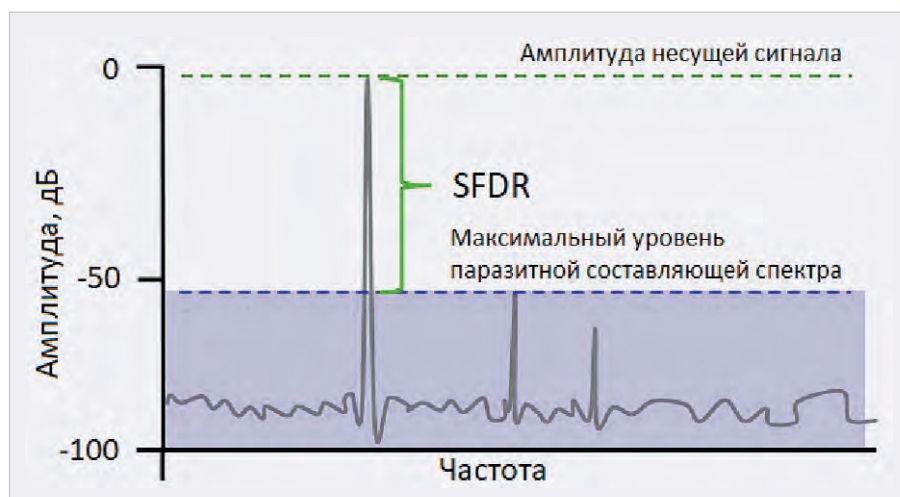


Рис. 1. Принцип измерения SFDR

лу, т.е. охватывает не только процесс взятия выборок, но и всю последующую обработку. Поэтому целесообразно рассмотреть его сущность и методы экспериментального определения для осциллографов.

### ENOB как характеристика аналого-цифрового преобразования

В основе функционирования цифровых осциллографов лежит АЦП, обеспечивающее квантование сигналов по амплитуде и по времени с их переводом в двоичный код с разрядностью  $N$ .

Идеальный АЦП обладает идеальной линейной характеристикой преобразования (ХП), эквидистантными напряжениями межкодového перехода, отсутствием смещения нуля. У такого АЦП нет дифференциальной нелинейности, проявляющейся в отклонении шагов квантования от младшего значащего разряда. Также у него отсутствует погрешность опрокидывания, что означает равенство выходных кодов при подаче на вход АЦП противоположных по знаку напряжений с точностью до разряда, определяющего его полярность [1]. Реальные АЦП не обладают такими свойствами, в результате чего в составе выходного кода появляются шумовые составляющие и искажения. Для их обобщенного краткого обозначения часто используется понятие «шума квантования», что не вполне корректно, поскольку нелинейность ХП может приводить к появлению в выходном сигнале АЦП гармоник входного сигнала, которые ввиду переноса ими информации не могут быть классифицированы как шум [4].

Если на вход идеального АЦП поступает синусоидальный сигнал с размахом, охватывающим всю шкалу оцифровки, то отношение сигнал/шум составит

$$SNR = 1,5 \cdot 2^{2N}. \quad (1)$$

Перевод этого выражения в шкалу относительных значений даёт  $SNR_{об} = 1,76 + 6,02N$ , откуда следует, что  $N = (SNR_{об} - 1,76)/6,02$ . Последнее уравнение справедливо как для идеальных, так и для неидеальных АЦП. Оно показывает, как из отношения сигнал/шум может быть получено число битов на основе анализа выходного кода, и служит основой для вычисления параметра  $ENOB$ . Для идеальных АЦП  $ENOB = N$ , для реальных же преобра-

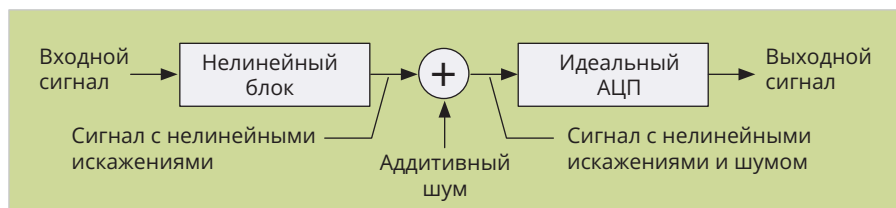


Рис. 2. Модель реального (неидеального) АЦП

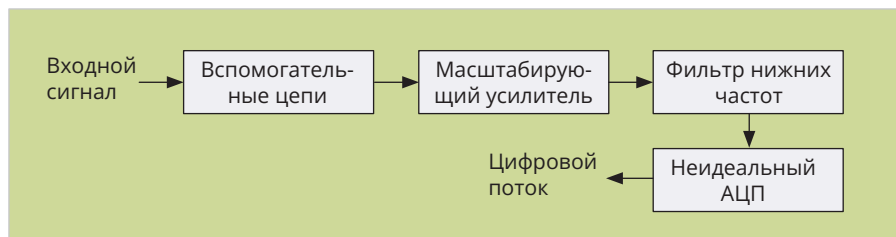


Рис. 3. Модель входного каскада осциллографа

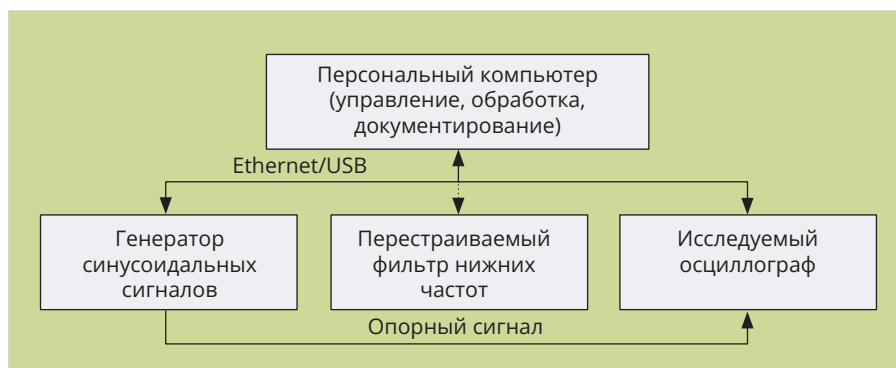


Рис. 4. Схема измерений ENOB в соответствии со стандартом [6]

Таблица 1. Сопоставление идеального и реального АЦП

Параметр	Идеальный АЦП	Реальный АЦП
Реальная разрядность	$N$	$ENOB < N$
Характеристика преобразования	Линейная	Нелинейная
Напряжение смещения, В	Нулевое	Может быть ненулевым
Шаг квантования	Постоянный	Имеет случайные отклонения
Погрешность опрокидывания	Нулевая	Может быть ненулевой
Шум квантования	Отсутствует	Имеется

зователей значение  $ENOB < N$ , и оно может быть дробным числом. Следовательно, параметр  $ENOB$  является мерой реального динамического диапазона АЦП и его разрешающей способности.

Наиболее значимыми искажениями для реальных АЦП являются шум, нелинейная ХП, а также погрешности усиления и смещения. Модель такого АЦП можно представить в виде трёх блоков (рис. 2). Первый из них – нелинейный блок с передаточной характеристикой, определяющий отклонение реальной ХП от идеальной линии. Он служит для учёта смещения нуля, дифференциальной нелинейности, погрешности опрокидывания. Нелинейность ХП приводит к

появлению гармоник, которые также понижают  $SNR$  и  $ENOB$ . Вторым блоком является источник аддитивного шума, который моделирует все прочие случайные явления, в частности, флуктуационные изменения младших разрядов АЦП в силу случайных факторов, включая артефакты посторонних сигналов, циркулирующих в АЦП. Шум также ухудшает отношение  $SNR$ . Третьим же блоком является идеальный АЦП.

В зависимости от конструкции АЦП значение  $ENOB$  может зависеть от частоты входного сигнала  $f$ . С повышением частоты обычно более проявляется нелинейность и частотная избирательность АЦП даже в пределах рабочего частотного диапазона,

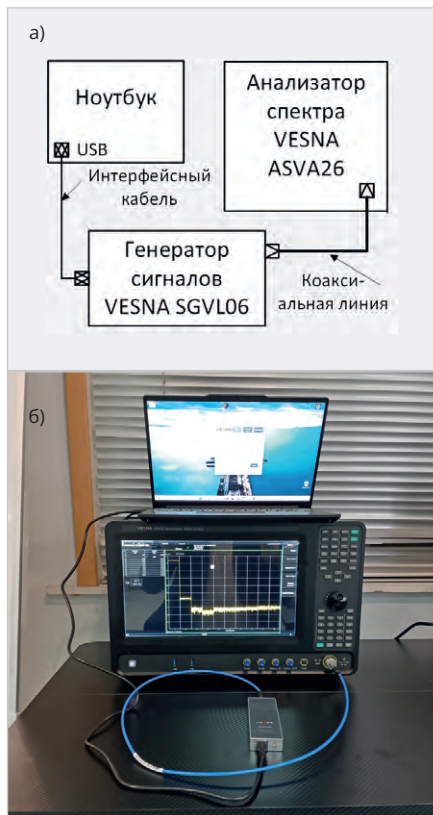


Рис. 5. Измерительная установка для проверки качества сигнала генератора:  
а) схема; б) фотография

что снижает значение эффективного количества бит. Следовательно, для некоторого образца АЦП исчерпывающей характеристикой в части разрядности будет являться зависимость  $ENOB(f)$ , построенная для значений  $f$  вплоть до частоты Найквиста. В табл. 1 приведено обобщённое сопоставление идеального и реального АЦП.

Типовое значение разности  $N - ENOB$  составляет 1...2,5 бит. Например, 12-битный АЦП может иметь  $ENOB = 10,5$ . Это означает, что, хотя выходная разрядность АЦП и равна 12 битам, достижимое отношение SNR соответствует идеальному АЦП с разрядностью 10,5 бит. В качестве ключевых факторов снижения  $ENOB$  следует рассматривать дифференциальную нелинейность и отклонение ХП от идеальной линейной характеристики.

Для осциллографов существуют и другие причины снижения качества отображения сигналов, связанные с их преобразованием в трактах, предшествующих АЦП (рис. 3). Входные сигналы осциллографа лишь при определённом коэффициенте вертикальной развёртки (КВР) соответствуют шкале оцифровки используемого АЦП, поэтому после вспомогательных цепей,

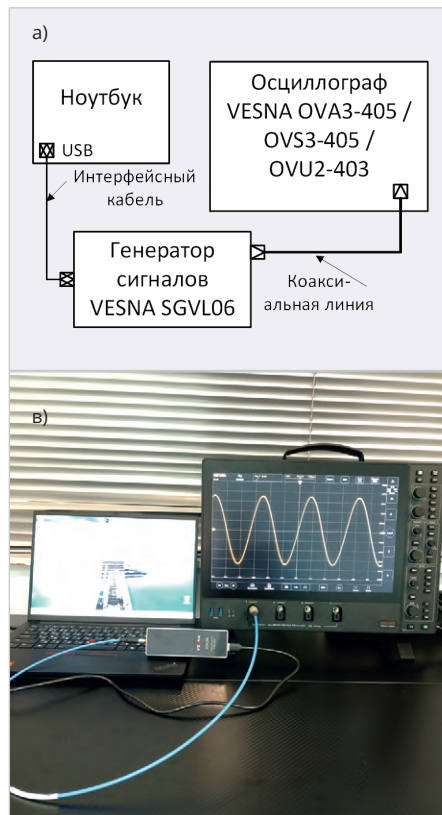


Рис. 6. Измерительная установка для оценки  $ENOB$ : а) схема; б) фотография, используется осциллограф VESNA OVA3-405; в) фотография, используется осциллограф VESNA OVS3-405; г) фотография, используется осциллограф VESNA OVU2-403

обеспечивающих выбор режима пропускания постоянного или переменного напряжения, установлен перестраиваемый усилитель с переменным коэффициентом усиления, который масштабирует входной сигнал для оптимального использования динамического диапазона АЦП осциллографа. Далее установлен сглаживающий фильтр низких частот, служащий для ограничения полосы пропускания и, соответственно, интегральной мощности шума. Он может включаться или отключаться через меню управления прибором и, как правило, имеет частоту среза не выше 10...20 МГц, что позволяет снизить уровень отображаемого шума. Все перечисленные компоненты вносят дополнительные искажения во входные сигналы. Усилитель характеризуется собственной нелинейностью, имеет частотно-зависимый коэффициент усиления и нелинейную фазовую характеристику – свои для каждого значения КВР. Влияние аналогового фильтра менее критично, но он также обладает неидеальной частотной характеристикой. К перечисленным узлам осциллографических каналов предъявляются требования по минимизации таких

искажений на уровне, достаточном для сохранения заданной амплитудной погрешности.

Любые виды цифровой фильтрации, реализуемые в осциллографах в рамках вторичной обработки для выделения из выходного сигнала отдельных составляющих спектра, выполняются на основе оцифрованного сигнала, который уже включает перечисленные выше искажения. Их применение способно несколько повышать  $ENOB$ , в первую очередь, для сигналов с узкой занимаемой полосой. Однако такие фильтры, как правило, имеют настройки, не охватывающие весь диапазон рабочих частот осциллографа из-за ограниченной вычислительной производительности аппаратной платформы. Следовательно, значение  $ENOB$  нужно определять при отключённой цифровой фильтрации, даже если она имеется у прибора конкретной серии.

Как следует из изложенного, для использования осциллографов при решении практических задач, критичных к реальному отношению сигнал/шум, значительную ценность представляют методы экспериментального определения значений  $ENOB$ , которые рассматриваются ниже.

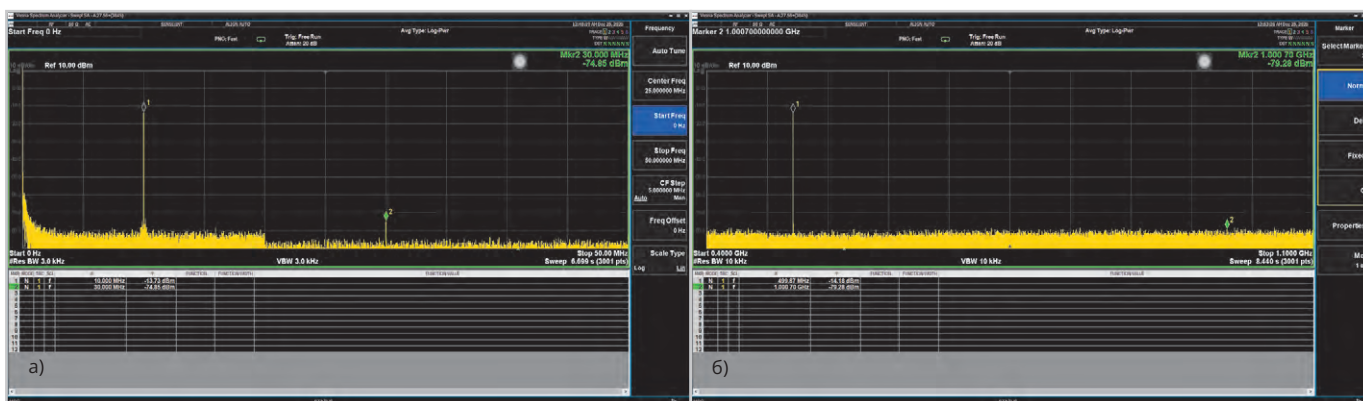


Рис. 7. Результат оценки уровня наибольшей гармоники при мощности на генераторе, равной -13 дБм: а) на частоте 10 МГц; б) на частоте 500 МГц

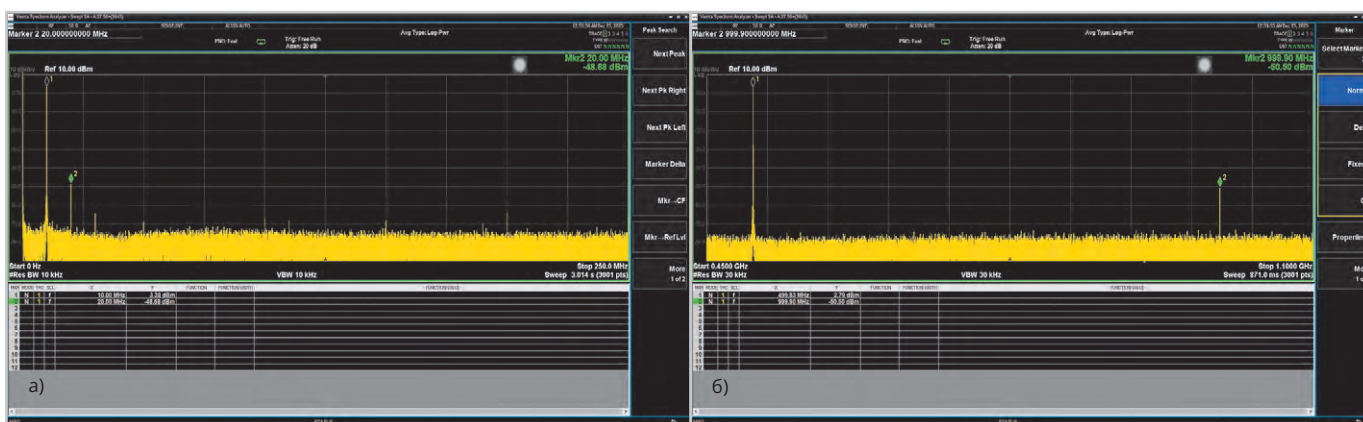


Рис. 8. Результат оценки уровня наибольшей гармоники при мощности на генераторе, равной +3 дБм: а) на частоте 10 МГц; б) на частоте 500 МГц

### Способы определения эффективного количества бит цифровых осциллографов

Несмотря на наличие дополнительных каскадов, к цифровым осциллографам в части определения *ENOB* применимы те же методы испытаний, что и для аналого-цифровых преобразователей. Методы испытания АЦП определены Институтом инженеров электротехники и электроники (IEEE) в стандарте [5]. Стандарт предусматривает измерение *ENOB* при входном синусоидальном воздействии и содержит следующее его определение:

$$ENOB = 0,5 \log_2(SINAD) - 0,5 \log_2(1,5) - \log_2(A/V). \quad (2)$$

В формуле (2) *V* – предельный диапазон (шкала) для осциллографа при текущих настройках, *A* – размах гармонического сигнала; *SINAD* – отношение уровня сигнала к шуму в сумме с искажениями. В [1] отмечается, что *SNR* и *SINAD* соответствуют отношениям среднеквадратических напряжений сигнала и шума (или шума с искажениями), а не мощностей, что, например, типично для техники радиосвязи. Таким образом, в трактовке упомя-

нутого стандарта  $SINAD = V_S / V_{NAD}$ , где  $V_S$  – среднеквадратичное значение напряжения сигнала с мощностью  $P_S$ ,  $V_{NAD}$  – среднеквадратичное напряжение, соответствующее сумме мощностей шума и искажений  $P_{NAD}$  во всех частотных элементах (бинах) вплоть до частоты Найквиста, исключая бины с частотой полезного сигнала и с нулевой частотой. Исходя из такого определения  $V_S$  и  $V_{NAD}$ , параметр *SINAD* можно определить как разность  $P_S$  и  $P_{NAD}$  или  $V_S$  и  $V_{NAD}$ , выраженных в дБ, и тогда его использование в (2) требует пересчёта в линейные единицы. Учитывая необходимость осуществления анализа в частотной области, измерение *ENOB* целесообразно проводить путём взятия ряда последовательных отсчётов, для которых далее выполняется быстрое преобразование Фурье.

Одним из важных вопросов в части экспериментального проведения измерений является выбор амплитуды тестового синусоидального сигнала. Известно [1], что для цифровых измерительных систем минимизация относительной амплитудной погрешности достигается, когда задействована вся шкала оцифровки. Согласно

[5], при измерениях *ENOB* может быть использована любая входная амплитуда, укладываемая в шкалу оцифровки, поскольку правое слагаемое в (2) учитывает их соотношение.

В [6] выделяется два подхода к учёту амплитуды при вычислении *ENOB*.

1. Значение *ENOB* определяется для выбранных амплитуды входного сигнала и развёртки, т.е. заданной шкалы оцифровки. В типовом случае *ENOB* измеряется при  $A = 0,9...0,95 V$ . Как следует из (2), *ENOB* растёт с уменьшением входной амплитуды, потому что на результаты измерений в существенной степени влияет нелинейность ХП.

2. Измерение *ENOB* основывается только на отношении *SINAD*. При использовании такого подхода оптимальная рабочая точка испытываемой системы может быть найдена как наилучший компромисс между размахом входного сигнала и искажениями из-за нелинейностей. Так как это не соответствует строгому определению эффективной разрядности, то обычно такой результат обозначают как *ENOB*. Определённое таким образом значение эффективной разрядности более соответствует наблюда-

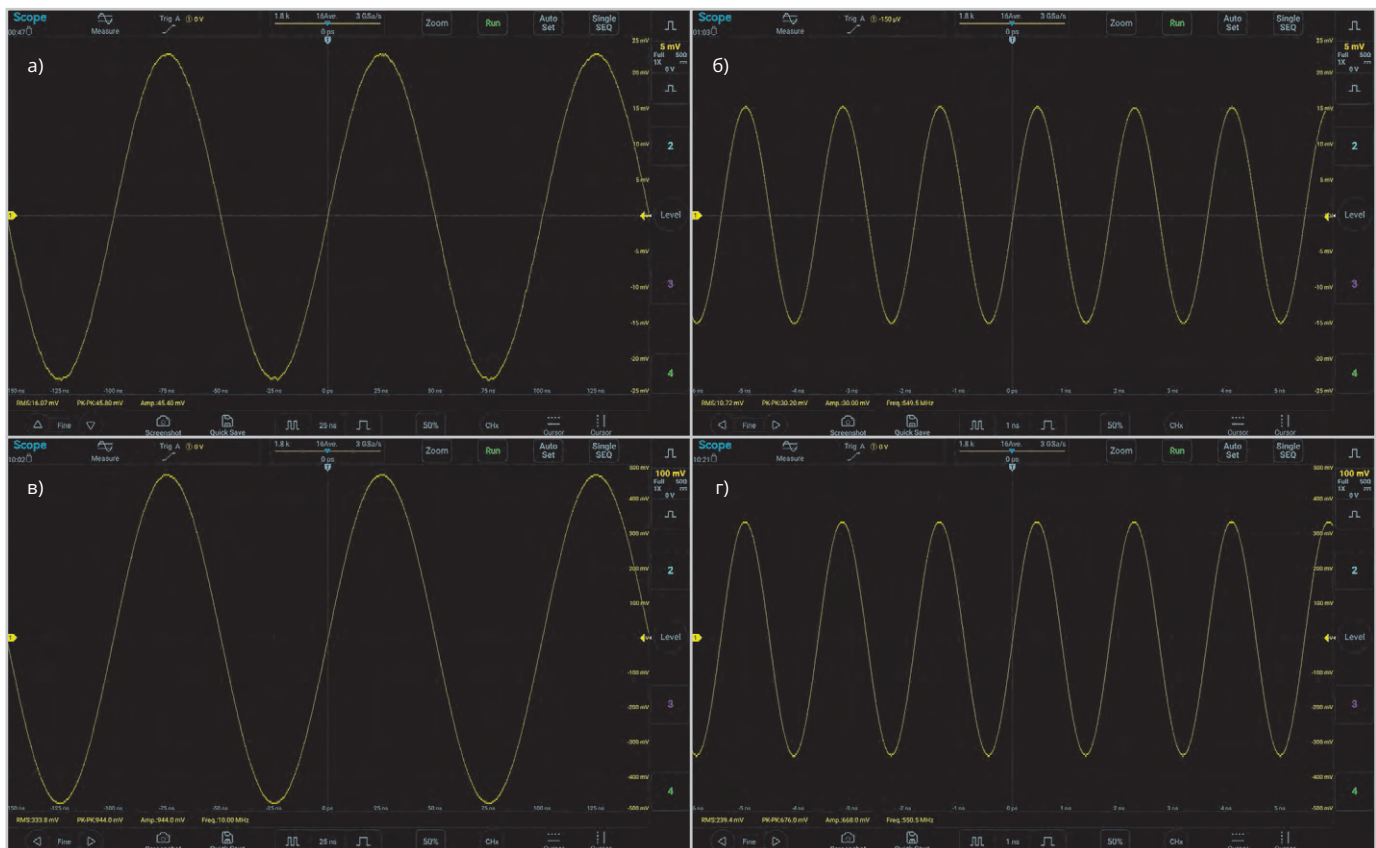


Рис. 9. Автоматические измерения на осциллографе VESNA OVA3-405: а) для частоты 10 МГц и КВП 5 мВ/дел.; б) для частоты 550 МГц и КВП 5 мВ/дел.; в) для частоты 10 МГц и КВП 100 мВ/дел.; г) для частоты 550 МГц и КВП 100 мВ/дел.

емому в измерительном устройстве качеству сигнала. Мера *ENOB* служит единым эталоном для сравнения различных систем при указании амплитуды входного сигнала, при которой проводилось измерение параметра.

Частота, для которой проводится измерение *ENOB*, должна в точности соответствовать середине частотного элемента БПФ. Одновременно требуется, чтобы временной интервал, на котором берётся выборка для измерений, включал целое количество полных периодов синусоидального сигнала на частоте измерений. Такое требование установлено в обеспечение отсутствия разрывов функции полезного сигнала, которые приведут к расширению полосы занимаемых частот и потребуют более сложной математической обработки для достижения той же точности оценки *ENOB*. Кроме того, для получения объективных результатов используемые выборки должны соответствовать разным фазам входного сигнала, и должны быть задействованы все выходные коды АЦП с учётом размаха входного сигнала. Исходя из этого, оптимальные частоты  $f_{\text{опт}}$  для расчёта *ENOB* должны удовлетворять условию  $f_{\text{опт}} = f_s/JM$ , где  $f_s$  – частота дискретизации,

$M$  – число отсчётов в тестовой последовательности;  $J$  – число периодов входного сигнала в тестовой последовательности. Соответственно, посредством изменений  $J$ ,  $M$  и, если это возможно,  $f_s$  измерениями охватывается весь диапазон рабочих частот осциллографа. Поскольку равные отношения  $J/M$  при неизменной частоте дискретизации приводят к одним и тем же значениям оптимальной частоты, то к  $J$  и  $M$  предъявляется дополнительное требование: их отношение должно представлять собой сокращённую дробь, т.е. они не должны иметь общих делителей, кроме единицы. В [6] определена минимальная длина последовательности, составляющая  $M_{\text{min}} = \pi 2^N$ . Если, например, рассматривается 10-разрядный АЦП, то  $M_{\text{min}} = 3216$  отсчётов. В практике измерений *ENOB* значение  $M$  целесообразно выбирать существенно больше, что позволит реализовать скользящее БПФ и использовать усреднённые значения мощностей в каждом частотном элементе.

Метод измерений *ENOB*, предписанный стандартом [6], предполагает использование схемы, представленной на рис. 4. В ней используется высококачественный генератор сину-

соидального сигнала, отличающийся низким уровнем шума и малым коэффициентом гармоник на всех измеряемых частотах. Если генератор работает по принципу прямого цифрового синтеза, то он должен иметь большую разрядность цифро-аналогового преобразования, чем  $N$ . Перестраиваемый фильтр низких частот предназначен для снижения уровня гармоник тестового сигнала на входе осциллографа. Шкалы частот и времени генератора и осциллографа совмещаются за счёт использования единого опорного сигнала. Для управления элементами измерительной установки используется персональный компьютер, на котором также функционирует программное обеспечение для считывания отсчётов с осциллографа, реализации БПФ, расчёта *SINAD* и далее оценки *ENOB* в соответствии с формулой (2). Программное обеспечение для обработки выборок может быть реализовано в MATLAB, LabVIEW или в форме отдельных модулей, написанных на подходящих языках программирования. Если имеется возможность, то автоматизированным управлением должен быть охвачен и перестраиваемый фильтр, что позволит вообще исключить необходимость постоянно-

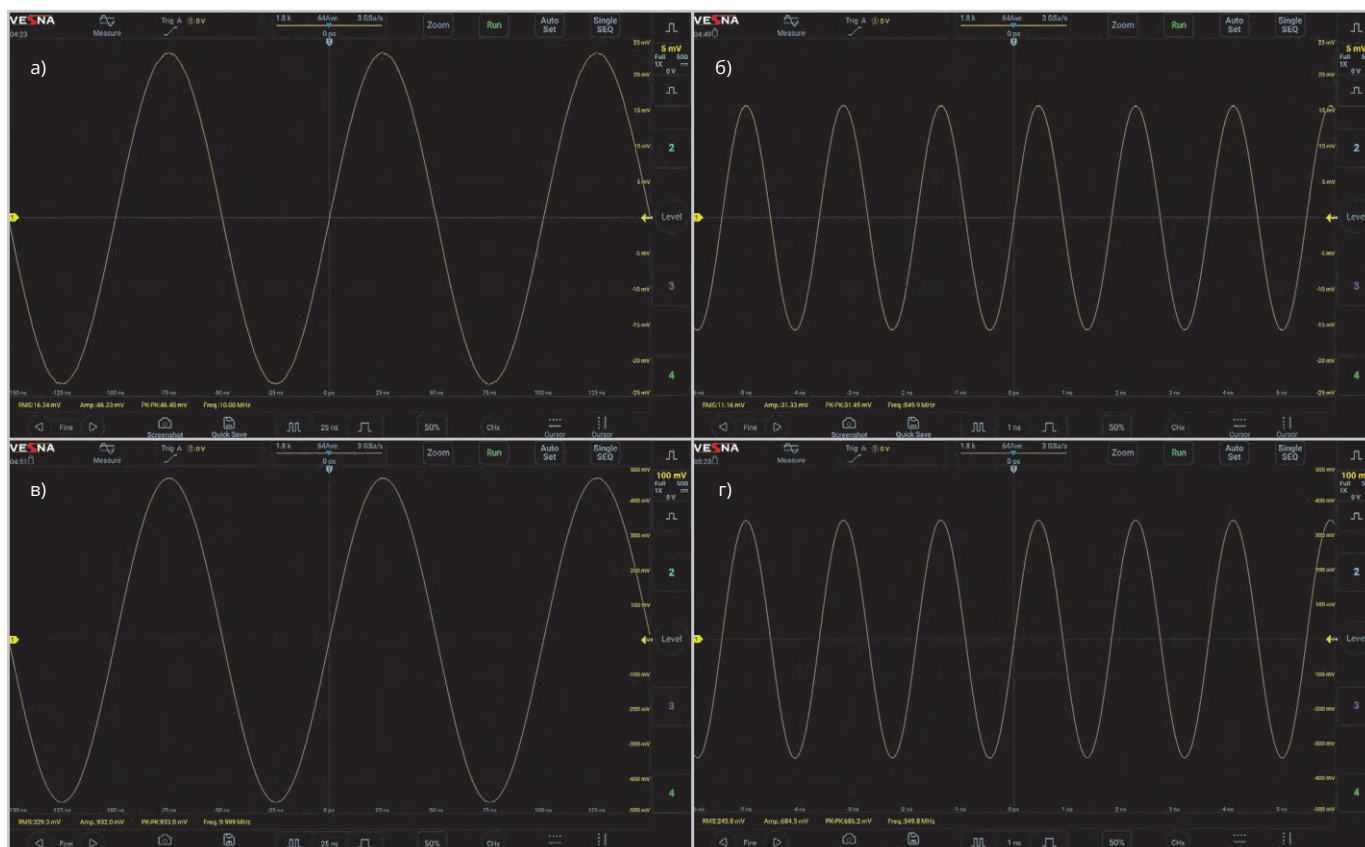


Рис. 10. Автоматические измерения на осциллографе VESNA OVS3-405: а) для частоты 10 МГц и КВП 5 мВ/дел.; б) для частоты 550 МГц и КВП 5 мВ/дел.; в) для частоты 10 МГц и КВП 100 мВ/дел.; г) для частоты 550 МГц и КВП 100 мВ/дел.

го участия оператора в таких измерениях и снизит тем самым появление ошибок из-за человеческого фактора.

Описанный метод измерений *ENOB* является классическим и отличается высоким качеством получаемых результатов. Вместе с тем многие модели современных цифровых осциллографов имеют в составе базовой обработки осциллограмм встроенную функцию БПФ, которая при правильных настройках также позволяет получить первичные данные для вычисления *SINAD* и далее *ENOB* по формуле (2). Условия применимости такого решения состоят в следующем:

- функция БПФ охватывает весь рабочий диапазон осциллографа;
- она реализована качественно, т.е. таким образом, что её результаты можно считать достоверными;
- известно количество точек (разрядность) БПФ;
- результаты БПФ не демонстрируют значительной вариации от реализации к реализации;
- настройки БПФ таковы, что частота измерений в точности соответствует середине одного из частотных элементов.

Практика использования осциллографов показала, что выполнение

всех перечисленных условий для ряда представляющих интерес частот измерений обычно не наблюдается в том числе из-за ограничений настроек БПФ.

Как видно из изложенного, реализация измерения *ENOB* со всей должной строгостью, предусмотренной стандартом [5], требует использования весьма сложной измерительной установки и обработки результатов с использованием специального программного обеспечения. Вместе с тем для осциллографов может быть использован более простой подход, основанный на оценке расхождения среднеквадратичных значений синусоидального сигнала, установленного на эталонном генераторе и измеренного на осциллографе. Сразу необходимо подчеркнуть, что такой способ пригоден для оценки *ENOB* в полосе частот до 1 ГГц, т.е. в условиях, когда коэффициент стоячей волны для входа осциллографа ещё не играет существенного значения. Способ состоит в следующем.

Для выбранной цены деления вертикальной развёртки, определяющей текущую шкалу оцифровки прибора *V*, рассчитывается шаг квантования  $\Delta V_{KB} = V/2^N$ . С высококачественного генератора, отличающегося уровнем гармо-

ник не выше –30 дБн на всех частотах оценки *ENOB*, подаётся синусоидальный сигнал с частотой  $f_g$  и известным среднеквадратичным значением

$$V_{SG} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_g(t))^2 dt},$$

где  $u_g(t)$  – зависимость выходного напряжения генератора от времени, а интегрирование осуществляется на интервале времени, равном периоду сигнала  $T = 1/f_g$ . Поступающий на осциллограф синусоидальный сигнал не коррелирован по отношению к внутреннему шуму АЦП и любым иным искажениям, свойственным входному каскаду прибора. Измеренное на осциллографе среднеквадратичное значение напряжения определяется для суммы  $u_g(t)$  и  $n(t)$ , где последняя функция со случайными значениями характеризует привносимые прибором искажения и шум. Функции  $u_g(t)$  и  $n(t)$  при обработке сигнала в осциллографе складываются арифметически, что может определять отклонение среднеквадратичного измеренного напряжения  $V_{SN}$  как в большую, так и в меньшую стороны относительно  $V_{SG}$ . При этом

$$V_{SN} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (u_g(t) + n(t))^2 dt} =$$

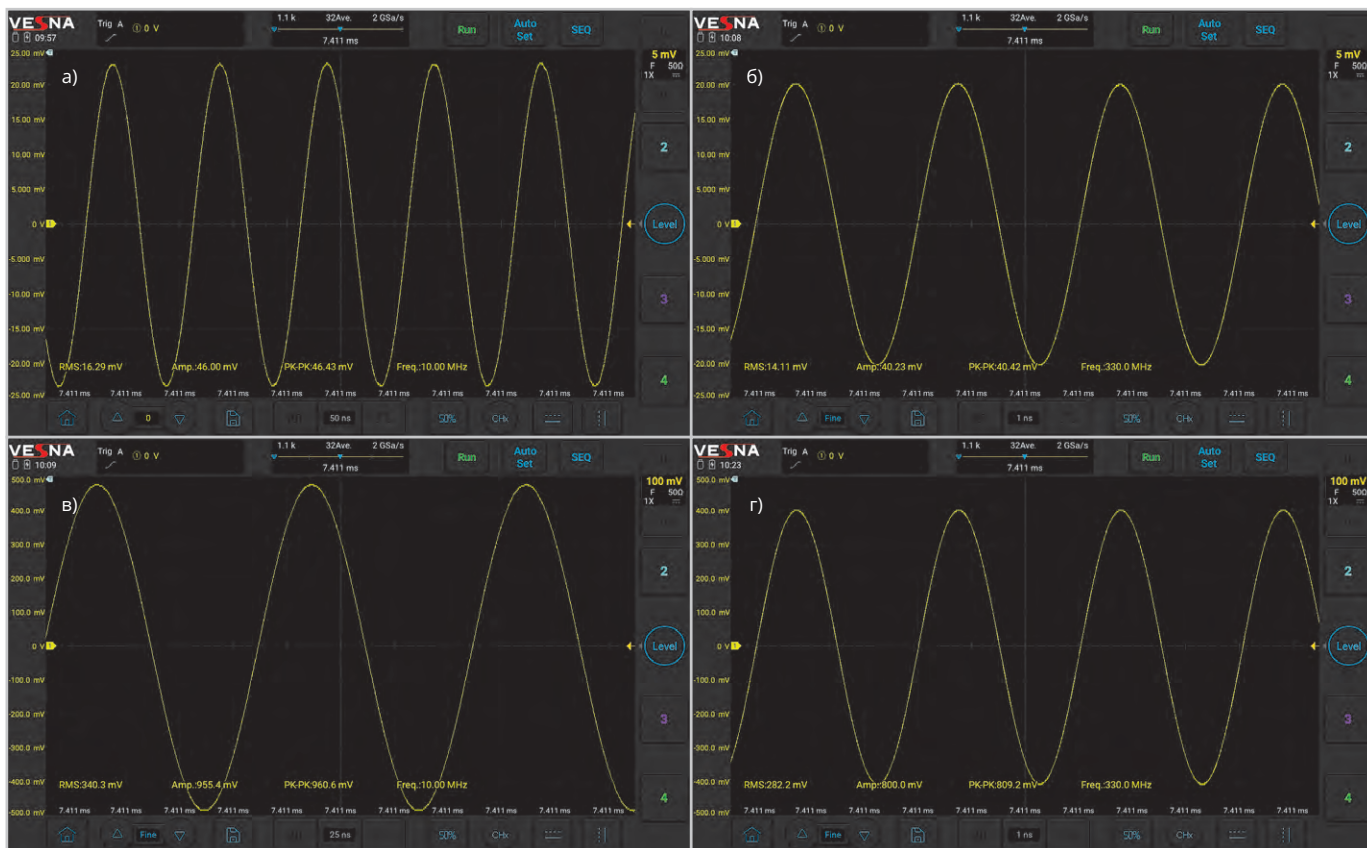


Рис. 11. Автоматические измерения на осциллографе VESNA OVU2-403: а) для частоты 10 МГц и КВП 5 мВ/дел.; б) для частоты 330 МГц и КВП 5 мВ/дел.; в) для частоты 10 МГц и КВП 100 мВ/дел.; г) для частоты 330 МГц и КВП 100 мВ/дел.

$$\begin{aligned}
 &= \sqrt{\frac{1}{T} \int (u_g^2(t) + 2u_g(t)n(t) + n_g^2(t)) dt} = \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} \int (u_g(t))^2 dt +} \\
 &+ \sqrt{\frac{2}{T} \int u_g(t)n(t) dt} + \sqrt{\frac{1}{T} \int n_g^2(t) dt}. \quad (3)
 \end{aligned}$$

В правой части (3) имеется три слагаемых, первое из которых равняется  $V_{SG}$ . Функция  $n(t)$  принимает случайные значения, имеющие нулевое математическое ожидание. Поскольку шум АЦП определяется сочетанием случайных факторов, то он будет иметь нормальное распределение [7]. Если же рассматривать синусоидальный входной сигнал как случайный, то ему сопоставляется арккосинусное распределение. Произведение  $u_g(t)n(t)$  имеет нулевое математическое ожидание и преимущественно арккосинусное распределение. Из этого следует, что  $\int u_g(t)n(t) dt \approx 0$ .

Третье слагаемое в (3) представляет собой среднеквадратичное значение шума на периоде синусоидального сигнала, поступающего с генератора. Он включает все спектральные составляющие, кроме относящейся к частоте  $f_g$ , а постоянной составляющей

входной сигнал не содержит. Отсюда следует, что  $V_{NAD} = \sqrt{\frac{1}{T} \int n_g^2(t) dt}$ .

Исходя из этого, можно считать, что  $V_{NAD} = |V_{SG} - V_{SN}|$ . Оценку значения ENOB можно получить как

$$ENOB = N - \log_2(|V_{SG} - V_{SN}| / \Delta V_{KB}). \quad (4)$$

При использовании описанного способа оценки ENOB необходимо учитывать потери сигнала в кабеле, соединяющем генератор и осциллограф. Из упрощенной схемы входного тракта, показанной на рис. 3, следует, что изменения коэффициента вертикальной развертки и настроек входной фильтрации способны влиять на значение ENOB. В этом и состоит ключевой фактор, определяющий сложность измерений этого параметра.

### Экспериментальная оценка ENOB для осциллографов VESNA

Используемые схемы и средства измерений. Как следует из изложенного, оценка ENOB по наиболее простому принципу, т.е. путём сопоставления мощности на выходе генератора с оценкой среднеквадратичного напряжения на осциллографе, требует проверки качества используемого сину-

соидального сигнала, показателем которого следует выбрать уровень второй или третьей (наибольшей) гармоники относительно основной. Для осуществления такой проверки использовалась схема (рис. 5), включающая генератор сигналов SGVL06 с полосой рабочих частот до 6 ГГц (включён в государственный реестр средств измерений, № 97025-25), а также анализатор спектра ASVA26 до 26,5 ГГц (также включён в государственный реестр, № 96495-25). Эти приборы относятся к новому на российском рынке средств измерений бренда VESNA, который представляет интерес для конечных потребителей не только новизной, но и достаточно высоким качеством и разнородностью средств измерений. В схеме измерений на рис. 5 для управления генератором сигналов используется ноутбук, на котором функционирует специальное программное обеспечение. В этой, а также в основной схеме измерений для образования тракта передачи сигнала используется высококачественный фазостабилизированный коаксиальный кабель, потери в котором в рассматриваемых диапазонах частот малы и были компенсированы в ходе измерений.

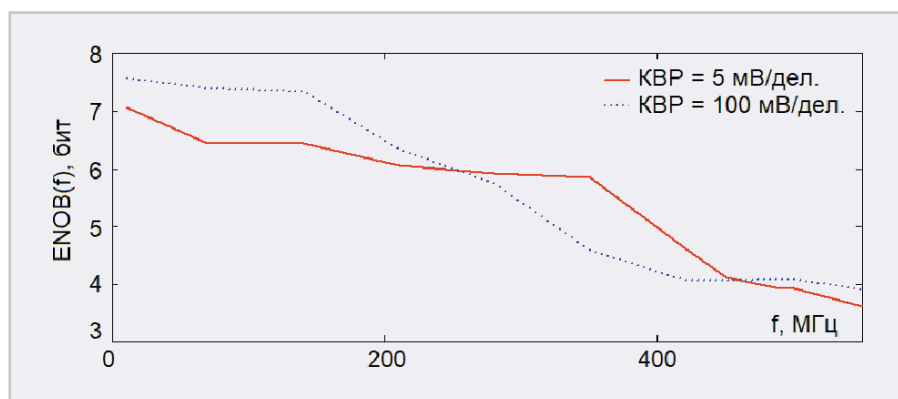


Рис. 12. Зависимости ENOB (f) для осциллографа VESNA OVA3-405

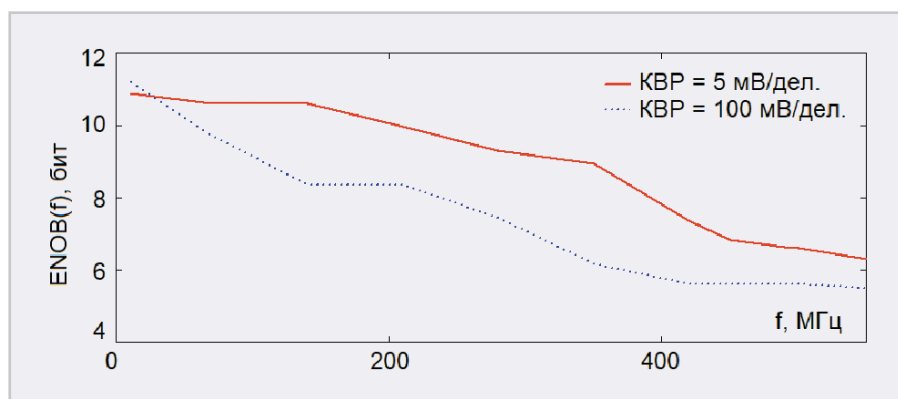


Рис. 13. Зависимости ENOB (f) для осциллографа VESNA OVS3-405

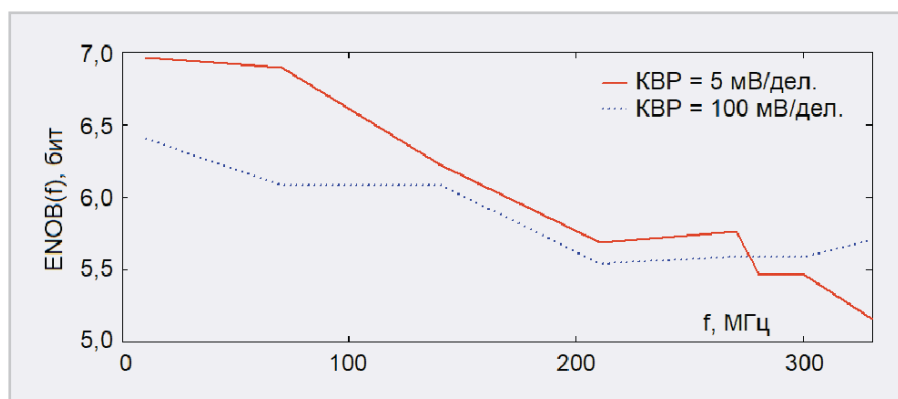


Рис. 14. Зависимости ENOB (f) для осциллографа VESNA OVU2-403

Таблица 2. Результаты измерений уровней наибольшей из гармоник для генератора VESNA SGVL06

Частота, МГц	Значения параметра для выходной мощности -13/+3 дБм			
	$P_1$ , дБм	$G$	$P_G$ , дБм	$\Delta P$ , дБ
10	-13,7/+3,4	3/2	-74,9/-48,7	-60,2/-52,0
500	-14,2/+2,8	2/2	-79,3/-50,5	-65,1/-53,3

В качестве объектов измерений были выбраны три осциллографа того же бренда: VESNA OVA3-405 (полоса до 500 МГц,  $N = 8$  бит), VESNA OVS3-405 (полоса до 500 МГц,  $N = 12$  бит); VESNA OVU2-403 (полоса 300 МГц,  $N = 8$  бит). Измерения для них проводились при KBP 5 и 100 мВ/дел., частоты изменялись с шагом от 10 до 70 МГц для охва-

та всего рабочего диапазона и вплоть до 110% максимальной его частоты. Входное сопротивление каналов составляло 50 Ом, уровень выходного сигнала на генераторе поддерживался постоянным и составлял -23 дБм и +3 дБм для указанных значений KBP соответственно. Схема и фотографии установок для проведения основных

измерений представлены на рис. 6. Среднеквадратичное значение напряжения для использования в уравнении (4) определялось при помощи автоматических измерений. В рамках таких измерений применение единого источника опорной частоты не требуется.

Результаты оценки качества тестового сигнала. Известно [8], что уровень гармоник генераторов синусоидального сигнала может зависеть от текущего значения выходной мощности. Охвату 90% шкалы при выбранных для основных измерений значений KBP соответствуют мощности -23 дБм и +3 дБм, однако более низкую из них для наблюдения второй гармоники потребовалось поднять на 10 дБ. Результаты измерений, полученные для частот 10 МГц и 500 МГц, представлены на рис. 7 и 8 и сведены в табл. 2. Здесь введены следующие обозначения:  $P_1$  и  $P_G$  – измеренные уровни первой гармоники, а также второй или третьей (максимальной) гармоники;  $G$  – номер второй или третьей гармоники,  $\Delta P$  – уровень второй или третьей гармоники относительно первой.

Как видно из представленных результатов, на выбранных для оценки частот работы генератора VESNA SGVL06 значение  $\Delta P$  оказывается существенно ниже -30 дБ. Это сохраняется и для других частот, на которых проводились основные измерения. Таким образом, он соответствует особенностям проведения эксперимента по оценке значения ENOB.

Результаты оценки ENOB для осциллографов VESNA OVA3-405; OVS3-405; OVU2-403 были получены при фиксированных уровнях среднеквадратичного напряжения синусоидального сигнала на входе осциллографа, равного 15,8 мВ и 315,8 мВ (-23 дБм и +3 дБм для тракта сопротивлением 50 Ом, 90% вертикальной развертки) для KBP 5 мВ и 100 мВ соответственно. Примеры осциллограмм, наблюдавшихся на экране осциллографов, для крайних частот измерений приведены на рис. 9–11. К полученным по результатам автоматических измерений данным такого рода был применён описанный выше математический аппарат, а также медианное сглаживание. На основе этого для образцов осциллографов были получены зависимости ENOB(f), показанные на рис. 12–14.

На основе анализа рис. 12–14 можно сделать следующие выводы.

1. С ростом частоты функции  $ENOB(f)$  всегда показывают тренд к снижению.
2. В высокочастотной части рабочего диапазона скорость этого снижения будет несколько ниже.
3. На верхней границе рабочего диапазона значение  $ENOB$  составляет порядка 4...5 бит, если  $N = 8$ , и порядка 6...8 бит, если  $N = 12$ .

Если же говорить об исследованных образцах осциллографов, то можно отметить, что эффективная разрядность АЦП сохраняется на уровне  $N - (0,5...1,5)$  бит примерно до середины рабочего диапазона, а внутри него с ростом частоты значение  $ENOB$  будет показывать тем большие изменения, чем выше разрядность АЦП прибора. Представленные графики в целом характерны как для АЦП, так и в целом для цифровых средств измерений. При этом ожидаемое снижение  $ENOB$  для приборов более высокого класса и ценового сегмента будет ниже в пределах рабочей полосы и резче при выходе

за неё, чем для приборов более низкого класса.

### Заключение

Как следует из изложенного, выбор средств измерений не должен осуществляться в предположении сохранения заявленной разрядности аналого-цифрового преобразования во всём частотном диапазоне. Подбор осциллографов под решение конкретных измерительных задач должен осуществляться с учётом того, что ожидаемое значение  $ENOB$  будет на 1...2 бит ниже, чем заявленная разрядность АЦП. Ввиду снижения зависимости  $ENOB(f)$  с ростом частоты измерения вблизи верхней границы частотного диапазона могут сопровождаться дополнительными погрешностями.

Как показали результаты измерений, осциллографы VESNA серий OVA3; OVS3; OVU2 демонстрируют изменение  $ENOB(f)$  в пределах рабочего диапазона, типовое для таких средств измерений, что во многом характеризует их качество. Можно ожидать, что осциллографы VESNA займут достойное

место на российском рынке средств измерений.

### Литература

1. *Panxop T.C.* Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. М.: Техносфера, 2006. 392 с.
2. URL: <https://www.everythingrf.com/community/what-is-sfdr> (дата обращения: 27.10.2025).
3. *Schaefer A.* The Effective Number of Bits (ENOB) of my R&S Digital Oscilloscope. Technical Paper. Документ R&S, идентификатор 1ER03\_1e, 2011. 17 р.
4. *Гоноровский И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. М.: Радио и связь, 1986. 512 с.
5. IEEE Standard for Terminology and Test Methods for Analog-to-Digital Converters. IEEE Standard 1241. URL: <http://ieee.org> (дата обращения: 27.10.2025).
6. VESNA. Каталог оборудования. 2025. 43 с.
7. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
8. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2003. 462 с.



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

### Imec создала первый квантовый спин-кубит с использованием High-NA EUV-литографии

Бельгийский исследовательский центр Imec объявил о создании первого в мире квантового точечного спин-кубита, изготовленного с применением литографии High-NA EUV. Разработка стала одним из первых практических примеров использования новейшей полупроводниковой технологии не только для классических чипов, но и для будущих квантовых компьютеров.

О достижении было объявлено на технологической конференции Imec Technology Forum. По словам исследователей, речь идёт о первом полноценном квантовом устройстве, созданном с использованием литографии с высокой числовой апертурой – технологии, которая считается ключевой для производства субнанометровых процессоров следующего поколения.

В основе разработки лежат квантовые точечные спин-кубиты – архитектура, которую многие специалисты считают одним из наиболее перспективных направлений для масштабируемых квантовых вычислений. Главное преимущество такого подхода заключается в совместимости с традиционными CMOS-процессами, используемыми

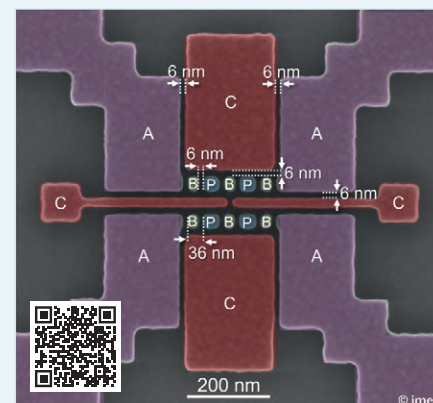
современной полупроводниковой промышленностью.

В кремниевых квантовых точках электроны удерживаются в сверхмалых структурах, а их спиновые состояния используются для хранения квантовой информации. Однако для стабильной работы кубитов требуется предельно высокая точность изготовления: размеры затворов и расстояния между ними должны составлять лишь несколько нанометров, чтобы минимизировать шумы и внешние помехи.

Imec сообщила, что смогла изготовить функционирующую сеть кубитов с расстояниями между затворами всего около 6 нм с использованием High-NA EUV-литографии. Подобная плотность размещения теоретически позволяет интегрировать миллионы кубитов на одном чипе.

Технология High-NA EUV считается следующим этапом эволюции экстремальной ультрафиолетовой литографии. Повышенная числовая апертура позволяет формировать структуры ещё меньшего размера с более высокой точностью. Именно поэтому High-NA EUV рассматривается как базовая технология для будущих ИИ-ускорителей, HPC-процессоров и памяти сверхвысокой плотности.

По сути, Imec демонстрирует переход квантовых устройств от эксперименталь-



ных лабораторных образцов к совместимому с 300-мм фабриками производству. Это особенно важно для отрасли, поскольку многие существующие квантовые платформы остаются сложными для массового изготовления и масштабирования.

Новая работа также продолжает предыдущие исследования Imec, где центр уже демонстрировал низкий уровень зарядового шума и стабильную работу кремниевых кубитов, совместимых с промышленными технологическими процессами. Интеграция High-NA EUV в этот процесс может стать одним из ключевых шагов к появлению полноценных производственных линий квантовых процессоров в будущем.

НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

**Роботы среди роз: ИИ-система для «диагностики» растений получила награду на Chelsea Flower Show**

На знаменитой выставке Chelsea Flower Show, где обычно внимание приковано к редким цветам и ландшафтному дизайну, неожиданной звездой стал сельскохозяйственный робот с искусственным интеллектом. University of Lincoln представил проект RoboCrops: Plant Selection Beyond the Visible и завоевал серебряную медаль Gilt в научно-технологической зоне GreenSTEM.

На знаменитой выставке Chelsea Flower Show, где обычно внимание приковано к редким цветам и ландшафтному дизайну, неожиданной звездой стал сельскохозяйственный робот с искусственным интеллектом. University of Lincoln представил проект RoboCrops: Plant Selection Beyond the Visible и завоевал серебряную медаль Gilt в научно-технологической зоне GreenSTEM.

Экспозицию подготовил Институт агропродовольственных технологий Линкольна – Lincoln Institute for Agri-food Technology. Главным экспонатом стала система PhenAlx – роботизированная платформа, способная

проводить высокоточное «медицинское обследование» растений. Используя методы компьютерного зрения, спектральной визуализации и алгоритмы ИИ, система выявляет ранние признаки стресса, заболеваний и снижения продуктивности, которые невозможно заметить невооружённым глазом.

По сути, технология работает как МРТ или рентген для сельскохозяйственных культур. Вместо многолетнего наблюдения за растениями селекционеры могут значительно быстрее определять перспективные сорта, устойчивые к засухе, жаре и болезням. Это особенно важно на фоне изменения климата и растущих рисков для глобальной продовольственной безопасности.

Выставка вызвала заметный интерес посетителей и представителей властей. Стенд посетил мэр Садик Хан, обсудивший с разработчиками возможности масштабирования подобных технологий для решения будущих проблем продовольственного обеспечения.

Авторы проекта подчёркивают, что демонстрация роботов на столь необычной площадке преследовала ещё одну цель – заинтересовать молодёжь. Особенно это касается школьников и студентов из сельских



регионов, которые традиционно связывают аграрную отрасль исключительно с физическим трудом, а не с искусственным интеллектом, робототехникой и анализом данных.

Основатель и директор LIAT профессор Саймон Пирсон отметил, что одной из самых вдохновляющих частей мероприятия стал именно интерес молодых посетителей к ИИ и автоматизации в сельском хозяйстве.

Проект PhenAlx отражает более широкий тренд в агротехнологиях: современная селекция всё активнее опирается не только на биологию, но и на машинное обучение, сенсоры и роботизированные платформы. В условиях глобального потепления способность быстрее выводить устойчивые сорта растений становится критически важной – от этого напрямую зависит стабильность будущих поставок продовольствия.

**innodisk**

Industrial  
**SATADOM-MV**  
3ME4 Series

**SATADOM — ИДЕАЛЬНОЕ ЗАГРУЗОЧНОЕ РЕШЕНИЕ**

Компактные твердотельные накопители с интерфейсом SATA III с высокой скоростью передачи данных

**PROSOFT®**

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

[WWW.PROSOFT.RU](http://WWW.PROSOFT.RU)



Реклама

# Идеальный прецедент группового управления

Екатерина Михайлова

Создание автономных систем, особенно групп беспилотных летательных аппаратов, опирается в парадокс: чем сложнее поведение, тем труднее его полноценно испытать и зафиксировать. Дефицит данных о редких или плохо наблюдаемых сценариях ограничивает развитие интеллектуальных алгоритмов, а традиционные подходы к испытаниям не учитывают специфику коллективного взаимодействия. В этой работе предлагается новый подход к формированию базы прецедентов, сочетающий реальные испытания и моделирование «идеальных» ситуаций, что открывает возможности для более надёжного и адаптивного группового управления.

## Введение

В вопросах управления активно развивающимся направлением является повышение уровня автономности. Уровень автономности группы объектов управления зависит от степени вовлечённости оператора в управление.

В рамках исследования теории прецедентов группового управления актуальной проблемой является фиксация прецедентов и набор необходимого их количества для формирования базы данных прецедентов.

«Под прецедентами понимается воспринимаемое разнородными и разнотипными техническими средствами явление, возникающее при выполнении (кто?) группой объектов управления заданной миссии (где?) в некоторой среде (когда?) в определённый момент времени (как?), заключающееся в формировании совокупности условий и обстоятельств, которые (почему?) в соответствии с логикой действий каждой из сторон провоцируют (что?) наступление последовательности событий, фиксируемых в виде совокупности фактов и, как следствие, формирующих ситуацию, описываемую текущим состоянием всей группы с возникновением коллизии между стратегиями поведения акторов и среды, потенциально влияющей на эффективность выполнения миссии и приводящей к необходимости принятия решений по дальнейшим действиям, направленным на обеспечение достижения целей миссии, с учётом того, что подобная ситуация уже имела место в прошлом, и по ней

были приняты решения, эффективность которых априори известна» [1].

Прецеденты возникают довольно часто, в частности, в технических задачах, таких как логистика, охрана объектов и другие. Анализ подобных прецедентов имеет критическое значение для совершенствования теоретических моделей и повышения надёжности и автоматизации перспективных образцов техники.

Основная проблема заключается в том, что в реальной практике подобные прецеденты, как правило, не фиксируются надлежащим образом. Процесс группового управления часто протекает в уникальных, невоспроизводимых условиях, что делает последующий анализ и извлечение необходимых данных крайне затруднительным. Отсутствие необходимого количества данных затрудняет анализ ситуаций, методов управления и набор базы прецедентов. Для решения указанной проблемы предлагается получать прецеденты в ходе проведения испытаний и последующего создания синтетических прецедентов. Данный подход предполагает организацию серии экспериментов, специально разработанных для проверки различных сценариев группового управления. Проведение испытаний с фиксацией определённых параметров и генерация синтетических прецедентов позволяют получать чётко документированное максимально возможное количество характеристик прецедентов группового управления, что позволит набрать необходимую базу прецедентов.

## Обзор литературы

Анализ литературы показал, что в основном рассматривается проведение испытаний для отдельных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [2, 3, 4].

Статья [2] обобщает практический опыт проведения испытаний на устойчивость комплексов с беспилотными летательными аппаратами к целенаправленным кибернетическим и радиоэлектронным атакам, обозначаемым как информационно-технические воздействия.

Статья [3] носит обзорный и методический характер. Она систематизирует и подробно описывает полный цикл испытаний беспилотных авиационных комплексов – от заводских до эксплуатационных. Документ является практическим руководством, определяющим цели, этапы, методы и критерии оценки на каждом уровне тестирования.

В [5] предлагается подход для повышения эффективности прецедентного метода в системах поддержки принятия решений. Авторы предлагают извлекать необходимые прецеденты с помощью генетического алгоритма, что позволяет повысить скорость и точность их извлечения.

Наиболее близкой к тематике данной статьи является [6], в которой разрабатывается метод генерации синтетических данных с целью преодоления недостатка размеченных реальных данных. Предложенный метод позволяет быстро создавать большие объёмы автоматически размеченных данных, что особенно ценно для задач с ограниченной доступностью реальных размеченных данных.

Как следует из анализа литературы, при проведении испытаний в контролируемые и фиксируемые параметры включаются в основном тактико-технические характеристики беспилотных летательных аппаратов. Вместе с тем для комплексного описания прецедентов структура существующих баз данных требует расширения за счёт проведения испытаний и последую-

щего создания синтетических прецедентов.

## Подход к испытаниям группового управления

Проблемой испытаний групп объектов с высокой степенью автономности является отсутствие программ и методик испытаний для оценки интеллектуальных беспилотных летательных аппаратов, наземных робототехнических комплексов, так как не оцениваются необходимые характеристики, такие как механизмы координации и расположение объектов на безопасном расстоянии друг от друга в группе, распределение функциональных ролей, принятие решений группой и другие.

Основная цель проведения испытаний заключается в получении объективных данных о функционировании группы как единой системы при решении конкретных задач.

Для фиксации прецедентов в ходе проведения испытаний группы осуществляется предварительная параметризация всех компонентов группы и среды, таких как:

- 1) объекты группы: каждый отдельный объект в группе характеризуется такими параметрами, как его функциональная роль (лидер, исполнитель, наблюдатель), тип (например, беспилотный летательный аппарат, наземный робот) и технические характеристики;
- 2) группа: задаётся набором статических и динамических параметров. К статическим относятся: тип группы, её миссия/задача группы, базовая стратегия взаимодействия (централизованная, децентрализованная, гибридная). Динамические параметры изменяются в ходе испытаний, к ним относится, например, геометрия взаимного расположения объектов в пространстве;
- 3) окружающая среда: описывается комплексом условий, включая географические характеристики района, время суток, метеорологические условия, а также характер и уровень противодействия условного противника.

В ходе испытаний должно фиксироваться максимально возможное количество характеристик, которые записываются в виде логико-лингвистической модели [7].

$$GP = [D, G, E, S, R, B],$$

где  $D$  – объекты (Drone);  $G$  – группа (Group);  $E$  – среда (Environment);  $S$  – ситуация (Situation);  $R$  – решение (Resolution);  $B$  – эффект (Benefit).

Во время проведения испытаний целесообразно выполнить эксперименты со сменой лидера в группе, реконфигурацией структуры и ролей с возможностью фиксации каждого шага.

При проведении эксперимента группе ставится задача и осуществляется регистрация процесса выполнения задачи до достижения результата или истечения отведённого времени.

Эффективность выполнения группой целевой задачи оценивается по дискретной шкале на основе следующих критериев.

1. «Задача выполнена» (количественная оценка = 1): присваивается, если группа в полном объёме достигла всех целевых показателей, сформулированных в условиях задачи.
2. «Задача выполнена не полностью» (количественная оценка = (0;1)): присваивается в случае частичного выполнения условий. К таким ситуациям относятся: неполное достижение целевого показателя (например, уничтожение 80% целей), потеря части функциональности группы (выход из строя незначительного количества объектов, не приводящий к срыву миссии), наличие некритических неисправностей (нестабильная связь, отказ второстепенных систем). Пример: потеря части груза при его в целом успешной доставке в пункт назначения.
3. «Задача не выполнена» (количественная оценка = 0): присваивается, если группа не выполнила основные условия задачи. Это включает: полный срыв миссии, физическую утрату или уничтожение группы, а также выявление критических неисправностей, которые привели к невыполнению задачи. К последним относятся: выход из строя более половины объектов группы, необратимая потеря управления или отказ ключевых систем, делающий продолжение выполнения задачи невозможным.

По результатам испытаний формируются прецеденты. Их структура включает набор зафиксированных характеристик группы, среды, задачи и результата. Записывается метаянформация в форме логико-лингвисти-

ческой модели, которая затем помещается в базу прецедентов.

Для моделирования ситуаций, физическая реализация которых в натуральных испытаниях затруднена или экономически нецелесообразна, применяются высокодетализированное трёхмерное моделирование и компьютерная симуляция. Это позволяет генерировать синтетические прецеденты, которые также предназначены для увеличения обучающей выборки, балансировки неравномерно представленных классов и улучшения обобщающей способности алгоритмов.

Проведение испытаний систем группового управления является необходимым инструментом для перевода исследований из теории в плоскость экспериментально проверяемого научного знания. Накопление обширной базы данных, состоящей из натуральных и синтетических прецедентов, создаёт фундамент для разработки автономных групп, способных к адаптивному поведению и принятию решений на основе прецедентов.

## Проблемы фиксации прецедентов

При проведении испытаний необходимые параметры фиксируются в недостаточном объёме.

К актуальным проблемам фиксации прецедентов относятся:

- 1) **неполнота регистрируемых данных.** Существующие системы мониторинга часто не охватывают весь спектр значимых параметров. В основном фиксируются лётные характеристики, данные о работе системы управления и навигации, оценка надёжности оборудования, проверяется функционирование систем аварийного отключения и контроля расположения объектов на безопасном расстоянии друг от друга в группе [7];
- 2) **отсутствие стандартизированных онтологий.** Отсутствие унифицированных форматов представления данных и терминологии [8] приводит:
  - к невозможности корректного сравнения прецедентов из разных серий экспериментов;
  - трудностям агрегации информации в единую базу знаний;
  - ошибкам интерпретации при анализе логико-лингвистических моделей;

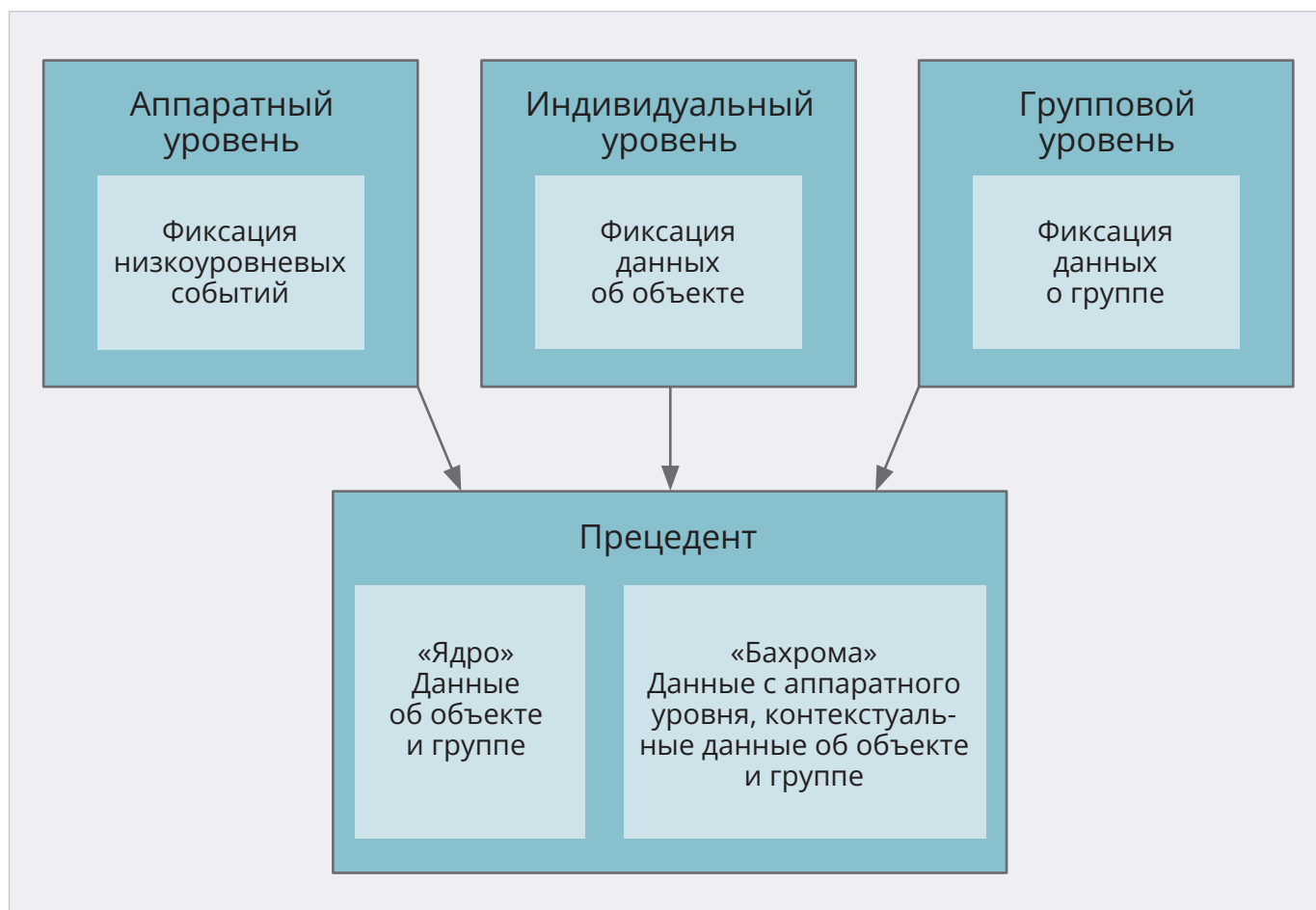


Рис. 1. Уровни фиксации прецедента

**3) проблемы временной синхронизации.** Разнородные системы регистрации данных имеют:

- различные временные разрешения и задержки;
- несинхронизированные временные метки;
- расхождения в частоте дискретизации измерений [9, 10];

**4) ограничения аппаратных средств.** Технические ограничения проявляются:

- в ограниченной пропускной способности каналов передачи данных;
- нехватке вычислительных ресурсов для обработки данных в реальном времени [11];

**5) субъективизм при протоколировании.** Возможно влияние человеческого фактора при проведении испытаний:

- избирательное внимание к отдельным аспектам эксперимента;
- неосознанная интерпретация событий вместо их объективной фиксации;
- расхождения в оценках разных наблюдателей;
- масштаб проводимых испытаний не позволяет учесть необходимые ха-

рактеристики или набрать необходимую статистическую базу;

**6) сложности формализации контекста.** Затруднена адекватная фиксация:

- динамически изменяющихся условий среды;
- неявных предпосылок и допущений;
- косвенных факторов влияния.

Таким образом, для решения указанных проблем требуется разработка комплексной методологии фиксации прецедентов, включающей создание стандартизированных протоколов, внедрение аппаратных средств нового поколения и развитие алгоритмов автоматизированного анализа многомерных данных.

### Формирование прецедента

Зафиксировать все необходимые параметры затруднительно. Анализ показал, что стандартные системы протоколирования испытаний сфокусированы на индивидуальных показателях каждого БЛА (координаты, скорость, курс, заряд батареи, уровень сигнала). Для анализа группового прецедента этого недостаточно. Не фик-

сируются следующие ключевые параметры.

- 1) Межмашинное взаимодействие: задержки в передаче пакетов информации между объектами группы в момент, предшествующий прецеденту. Обычно фиксируется факт отправки/приёма, но не временные задержки в критически важные миллисекунды.
- 2) Контекст принятия решения объектом: записывается итоговое решение (например, «изменить вектор на 10°»), но не фиксируется полное состояние входных данных, на основе которых это решение было принято. А именно: какая именно информация от соседей была получена (и, что важно, какие данные не были получены вовремя).
- 3) Градиент неопределённости среды: групповой прецедент часто является следствием накопления мелких расхождений в индивидуальном восприятии среды (например, небольшие разночтения в данных лидеров из-за пыли или электромагнитных помех). Эти микрорасхождения не регистрируются как ошибки, так как находятся в пределах допусти-

мой погрешности для одиночного объекта. Но их совокупный эффект на групповое решение не отслеживается.

4) Приоритеты в сетевом трафике: в момент высокой нагрузки или потери канала данные, критичные для поддержания групповой когерентности (например, пакеты синхронизации), могут быть отброшены в пользу данных навигации или целеуказания. Механизмы этой приоритизации и её результаты не фиксируются.

Целесообразно разделить параметры на обязательные и уточняющие, то есть в рамках формирования прецедентов группового управления, полученных в ходе испытаний, принципиальное значение имеет чёткое разделение параметров/характеристик на структурное «ядро» и контекстуальную «бахрому».

«Ядро» прецедента представляет собой набор обязательных, формализованных и объективно измеряемых атрибутов. Эти характеристики являются инвариантными и необходимыми для минимально достаточного описания случая, его идентификации, категоризации и сравнительного анализа с другими прецедентами. Отсутствие любой из них делает описание неполным и нефункциональным для исследования и применения [12].

Базовыми характеристиками «ядра» являются:

- тип объекта группы;
- роль объекта;
- тип группы;
- мощность группы;
- миссия группы;
- геометрия действий группы в пространстве;
- среда (географический район, метеорологические условия, противодействие противника);
- задача, поставленная перед группой;
- решение, принятое при решении задачи.

«Бахрома» прецедента – набор дополнительных, уточняющих данных, которые обеспечивают глубину контекста и полноту ситуации. Эти характеристики важны для качественного анализа, интерпретации результатов «ядра», но не являются строго обязательными для первичной фиксации и сравнения [12].

К элементам «бахромы» могут относиться:

- парадигма, которой обучен объект группы;
- автономность объектов;
- количество типов объектов в группе и т.д.

Для разделения «ядра» и «бахромы» был применён подход многоуровневой фиксации прецедентов (рис. 1).

- Уровень 1 (аппаратный): фиксация низкоуровневых событий с привязкой к единому времени – потери пакетов информации, неисправности объектов группы.
- Уровень 2 (индивидуальный): фиксация решений объекта на основе его модели мира («вижу цель», «получил план», «потерял соседа X»).
- Уровень 3 (групповой): запись общих состояний группы (формация, перестроение группы).

Важно зафиксировать основные характеристики, которые входят в «ядро» прецедента. Характеристики, которые входят в «бахрому», являются уточняющими. Прецедент, состоящий только из «ядра», представляет из себя так называемый упрощённый прецедент, который состоит из наиболее значимых характеристик, наиболее полно описывающих ситуацию.

### Идеальный прецедент

При описании прецедентов группового управления часто возникает проблема преждевременной детализации и привязки к конкретной реализации. Чрезмерное описание характеристик «бахромы» ограничивает возможность поиска оптимальных решений и создаёт риски некорректной интерпретации требований.

Идеальный прецедент – это развёрнутый прецедент, выражающий общую сущность процесса без детализации его реализации [13].

К ключевым особенностям идеальных прецедентов относятся краткие и ёмкие описания объектов, группы, среды, противодействия и принятого решения, таким образом выражается общая сущность прецедента. Описания не содержат развёрнутых деталей, указаний на конкретные протоколы, интерфейсы, алгоритмы или технические средства.

Идеальный прецедент описывается следующим образом:

$GP = [TY, RL, F, N, M, FT, GE, C, PF, AF, TZ, RO, RG]$ ,

где  $TU$  – тип объекта;  $RL$  – роль объекта в группе;  $F$  – тип группы;  $M$  – миссия группы;  $FT$  – геометрия действий

группы в пространстве;  $C$  – сложность местности/пространства мониторинга;  $AF$  – активные факторы среды;  $TZ$  – ситуации как логическая связка событий (задача – решение – эффект);  $RO$  – решения для действий объектов, включённых в группу;  $RG$  – решения для действий группы.

Преимуществами применения идеальных прецедентов является:

- 1) чёткость формулировки требований позволяет отделить, «что» должна делать система, от того, «как» она это делает. Пример для БЛА. «Что»: обеспечить непрерывный мониторинг периметра объекта в течение четырёх часов. «Как»: группа БЛА совершает циклический облёт по заданному маршруту;
  - 2) устойчивость к изменениям: изменение протокола связи или аппаратной платформы не требует переписывания самих прецедентов, так как они абстрактны. Пример для БЛА. Прецедент: передать целевую координату от БЛА-разведчика всем БЛА ударной группы. Изменение (Протокол связи): аппаратура меняется с Wi-Fi на LTE/5G. Логика прецедента («БЛА мониторинга нашёл цель → сообщил координаты → группа получила координаты для доставки груза») не меняется. Меняются только низкоуровневые модули кодирования и отправки данных;
  - 3) фокус на взаимодействие «пользователь–система»: позволяет выявить истинные потребности оператора и функциональные требования к системе без отвлечения на технические детали. Пример для БЛА. Без прецедентов: техническое задание может содержать разрозненные пункты, а с использованием прецедентов выявляется ключевой сценарий действий.
- Для применения идеальных прецедентов необходимо:
- 1) разработать библиотеку идеальных прецедентов для всех основных задач группового управления: разведка, ударные действия, логистика и т.д.;
  - 2) на этапе проектирования детализировать каждый параметр идеального прецедента в виде конкретных характеристик и протоколов действий;
  - 3) вести параллельно как библиотеку идеальных (сущностных) прецедентов, так и библиотеку реализационных прецедентов для поддержания

актуальности библиотеки прецедентов.

Идеальные прецеденты предлагают решение для высокоуровневого и целостного, но при этом не перегруженного описанием функциональности сложных систем, которой является система группового управления беспилотными летательными аппаратами. Их внедрение позволит повысить качество требований, ускорить процесс проектирования и создать более автономные и адаптируемые системы управления.

### Пример. Получение идеального прецедента в задаче контроля объекта группой

В рамках проектирования сложных систем, таких как система охраны объектов с использованием групп БЛА, важным этапом является моделирование угрозы. Ключевым моментом на данном этапе выступает разработка идеальных прецедентов, позволяющих не привязываться к уточняющим параметрам.

В качестве примера рассматриваются испытания по проверке выполнения стратегии действий при решении задачи контроля объекта группой БЛА. Основными акторами в данном контексте являются: группа БЛА, объект, за которым производится наблюдение.

Задача заключается в обнаружении отклонений в объекте наблюдения, например, обнаружение засохших посевов на поле.

Назначается группа, например, из  $N$  БЛА, предназначенных для ведения наблюдения и оповещения. Каждый БЛА наблюдения отвечает за выделенную ему территорию, перемещаясь по заранее определённой траектории и обмениваясь информацией с ближайшими соседями. Охрана объекта происходит на определённой территории в дневное время.

При обнаружении засохших посевов объекты группы получают оповещение о возможном отклонении от нормы, автоматически подтверждается достоверность сигнала тревоги и определяется следующая информация: текущее местоположение, предположительная площадь, тип посевов. Отклонениями являются участки с засохшими посевами размером  $l \times m$  см и количеством  $p$  штук.

Объекты группы осуществляют оценку площади участка на основе

полученных данных. Группой принимается решение о дополнительном орошении и об оповещении персонала, при этом действие выполняют только ближайшие БЛА к обнаруженному участку, остальные продолжают наблюдение. В результате наблюдения были обнаружены только  $p - 2$  участков. Следовательно, задача по наблюдению выполнена частично, и оценка эффективности, которая присваивается по результатам выполнения задачи, примет значение  $(0;1)$ , например,  $0,8$  (оценка назначается экспертом).

По результатам выполнения задачи записывается прецедент. В параметры идеального прецедента будут занесены:

- тип объекта группы (БЛА);
- роли объектов группы (БЛА-наблюдения);
- тип группы (гомогенная);
- задача группы (наблюдение за объектом);
- геометрия в пространстве (группа имеет свободное распределение);
- сложность (поле);
- решения для группы (оповещение персонала и выполнение специальных действий для устранения отклонения (орошение));
- решения для одиночного объекта, включённого в группу (оповещение персонала и выполнение специальных действий для устранения отклонения (орошение) для ближайших к обнаруженному участку, наблюдение для остальных).

К уточняющим параметрам относятся:

- мощность группы ( $n$  единиц);
- пассивные факторы среды (день).

Данные параметры записываются в виде логико-лингвистической модели. При проведении испытаний возможна фиксация всех необходимых параметров для составления идеального прецедента.

$GP = [TY, RL, F, M, FT, GE, C, AF, T3, RO, RG]$ ,

$GP = [TY (БЛА), RL (БЛА - наблюдение), F (гомогенная), M (наблюдение_за_объектом), FT (свободное_распределение), C (поле), RG (оповещение, орошение_участка), RO (оповещение, орошение_участка, наблюдение).$

В формуле учитываются основные параметры прецедента, и в таком виде метаинформация заносится в базу данных для дальнейшего использования при выполнении

задач и для создания синтетических прецедентов.

Таким образом, записывается идеальный прецедент, состоящий из основных параметров. Подобная запись выполняемых задач позволит набрать базу данных для дальнейшего использования при принятии решений.

### Заключение

Повышение уровня автономности групп объектов управления является ключевым направлением развития современных систем. Как показано в этой работе, этот процесс сопровождается закономерным снижением роли оператора и переходом к прецедентно-ориентированной парадигме принятия решений, где основой функционирования системы становится накопленная база прецедентов.

Проведённое исследование демонстрирует методологическую ценность предложенного подхода, интегрирующего проведение контролируемых испытаний и разработку идеальных прецедентов для формирования базы знаний группового управления автономными объектами.

Основным научным результатом работы является решение актуальной проблемы недостаточной и несистемной фиксации прецедентов. В работе предлагается использовать многоуровневую фиксацию данных и чёткое разделение на структурное «ядро» и контекстуальную «бахрому», что позволит избежать недостатков традиционного протоколирования и создаст условия для накопления базы данных, необходимой для принятия решений в группе.

Ключевым элементом, обеспечивающим устойчивость разрабатываемых систем к быстро меняющимся условиям, является концепция идеального прецедента. Её применение позволяет абстрагироваться от преждевременной технической детализации и сфокусироваться на сущностных целях системы и взаимодействии, что повышает автоматизацию и адаптивность создаваемых моделей группового управления.

Таким образом, представленный подход формирует теоретический и методологический фундамент для создания надёжных, адаптивных и интеллектуальных систем группо-

вого управления, способных принимать решение на основе прецедентов в сложных и динамически изменяющихся условиях.

## Литература

1. *Абросимов В.К., Михайлова Е.С.* Классификация прецедентов группового управления // Информационно-управляющие системы. 2025. № 2. С. 27–36.
2. *Тихонов Р.И., Бубенищikov Ю.Н.* Практический опыт испытаний комплексов с беспилотными летательными аппаратами в условиях информационно-технических воздействий // Военная мысль. 2019. № 6. С. 118–124.
3. *Василенко О.М., Иванов А.Г., Максимова М.В.* Испытания беспилотных авиационных комплексов // Инженер-механик. 2012. № 1. С. 15–22.
4. Испытания беспилотных летательных аппаратов. Shenzhen SCIEO Electronics Co., Ltd. URL: <https://www.scieo.by/> (дата обращения: 03.10.2025).
5. *Сердюков К.Е., Авдеенко Т.В., Макарова Е.С.* Исследование возможностей генетического алгоритма для извлечения релевантных прецедентов в системах поддержки принятия решений // Сборник трудов III международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017). Самара. 2017. С. 1864–1870.
6. *Пчелинцев С., Юляшкова М.А., Ковалева О.А.* Метод создания синтетических наборов данных для обучения нейросетевых моделей распознаванию объектов // Информационно-управляющие системы. 2022. № 3 (118). С. 9–19.
7. *Михайлова Е.С.* Логико-лингвистическая модель группового прецедента. «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2024). М., 2025. С. 1124–1131.
8. *Поспелов Д.Ю.* Онтологии в эпоху цифровизации. Ч. 1. Мост между мыслью и цифрой (путь к пониманию онтологии) // Информационное моделирование. 2024(3). № 1. С. 105–107.
9. *Ковязина Д.Р.* Синхронизация времени в распределённых информационно-управляющих системах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 45. С. 71–78.
10. *Прошин Ф.А., Сторожук М.Н., Сторожук Н.Л.* Методы синхронизации в сетях связи // Измерения и синхронизация. Первая миля. 2024. № 2. С. 62–69.
11. *Стаффорд Д.* Преимущества ультранизкой задержки при трансляции видео // Современные технологии автоматизации. 2020. № 4. С. 76–81.
12. *Куссуль Э.М.* Ассоциативные нейрноподобные структуры. Киев: Наукова думка, 1991. 144 с.
13. *Constatine L.L., Lockwood L.A.D.* Software for Use: A Practical Guide to the Models and Methods of Usage-Centered Design, Addison-Wesley Professional, 1999, 600 p.



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

### Учёные создали оптический «синапс», имитирующий работу человеческого зрения

Исследователи из King Abdullah University of Science and Technology разработали гибкое оптическое устройство, способное одновременно воспринимать и обрабатывать визуальную информацию по принципу, напоминающему работу человеческого мозга. Технология может стать основой для нового поколения систем машинного зрения, нейроморфных вычислений и носимой электроники.

Разработка представляет собой тонкоплёночный «оптический синапс», полностью управляемый светом. В отличие от большинства существующих светочувствительных синаптических устройств, которым одновременно требуются электрические и оптические сигналы, новая система работает исключительно за счёт воздействия света. Это позволяет снизить энергопотребление и упростить архитектуру устройства.

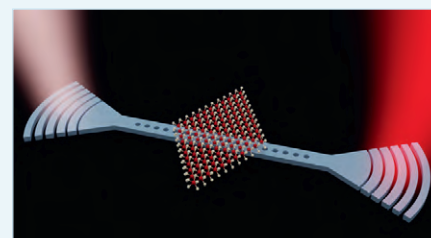
Авторы проекта отмечают, что современные камеры и вычислительные системы по-прежнему разделяют функции сенсора, памяти и обработки данных между разными компонентами. Из-за этого информация постоянно передаётся между блоками, что увеличивает задержки и энергозатраты. Но-

вый подход приближает архитектуру к биологической зрительной системе, где восприятие и обработка сигналов тесно интегрированы.

Устройство способно изменять своё состояние под воздействием света разных длин волн. Одни сигналы усиливают отклик, другие – ослабляют его, что напоминает механизм обучения и забывания в биологических синапсах. Исследователи продемонстрировали работу системы на примере эксперимента с «собакой Павлова»: разные длины волн света использовались как аналоги звука и пищи, после чего устройство научилось ассоциировать один сигнал с другим.

По словам разработчиков, подобный механизм особенно важен для будущих систем искусственного зрения и аппаратного ИИ, поскольку позволяет выполнять распознавание и обработку информации непосредственно на уровне сенсора, без передачи данных в отдельный вычислительный модуль.

Конструкция устройства также была существенно упрощена. В её основе используется ультратонкий слой оксида марганца на гибкой кремниевой подложке. Материал отличается сравнительно низкой стоимостью, доступностью и экологичностью по сравнению с рядом альтернатив, включая



перовскиты и чёрный фосфор. Наличие нескольких степеней окисления помогает формировать дефектные состояния и кислородные вакансии, необходимые для хранения и модуляции информации.

Разработчики подчёркивают, что устройство сохраняет работоспособность даже при изгибе подложки, что делает технологию перспективной для гибкой электроники и носимых систем. Помимо обработки изображений в реальном времени, оптический синапс способен выполнять логические операции, совместимые с существующими полупроводниковыми вычислительными платформами.

Авторы считают, что технология может найти применение в робототехнике, системах искусственного зрения, энергоэффективном ИИ-оборудовании и интеллектуальных сенсорных устройствах следующего поколения.



# Современные системы управления электроприводов: структура и конструкция. Часть 2

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. Излагаются 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

В первой части статьи указаны основные сведения об электроприводах (ЭП) и их системах управления (СУ ЭП). Главными составными частями ЭП являются преобразователь электрической энергии (силовое преобразовательное устройство – СПУ) и электродвигатель (ЭД). ЭД переменного тока подразделяются в основном на асинхронные (АД) и синхронные (СД). В ЭП переменного тока СПУ называется преобразователем частоты (ПЧ), в качестве которого наиболее широкое применение получили ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока на основе двух полупроводниковых преобразователей: управляемых (АВН) или неуправляемых выпрямителей напряжения и автономных инверторов напряжения (АИН). СПУ вместе с его СУ можно рассматривать как регулируемый источник питания (ИП), который питает ЭД или другую нагрузку. Современные СУ ЭП построены либо на базе высокопроизводительных микроконтроллеров (МК) с RISC-архитектурой или специализированных (для управления ЭП) цифровых сигнальных контроллеров (ЦСК), либо на базе программируемых логических микросхем (ПЛИС) или специализированных для этого применения микросхем (СИС).

Отмечено, что современные СУ ЭП имеют в основном распределённо-централизованную структуру и состоят из локальных СУ (ЛСУ), центральной СУ

(ЦСУ) и программируемого логического контроллера (ПЛК). Менее распространёнными являются СУ ЭП с централизованной структурой, когда высокоинтегрированный блок управления ЭП (ВБУ ЭП), в состав которого входят ЛСУ, ЦСУ и ПЛК, выполняет все функции СУ ЭП. Для управления технологическим процессом, рабочей машиной как его частью и, соответственно, ЭП применяется СУ более высокого уровня (СУ ВУ), которая называется СУ электроприводом (или электроприводами, если она управляет несколькими ЭП).

Рассмотрены различные варианты структуры СУ ЭП, отличающиеся элементной базой, схемотехникой и конструкцией.

## Конструкция современных систем управления электроприводов переменного тока

В современных ЭП переменного тока конструкция ПЧ и СУ, которые ими управляют, имеет очень важное значение благодаря основным тенденциям в преобразовательной и микропроцессорной технике: повышению степени интеграции и функциональности и снижению массогабаритных характеристик, которые привели к тому, что совершенствованию конструкции стало уделяться повышенное внимание инженеров.

ПЧ для ЭП различных мощностей имеют разную конструкцию.

ПЧ малой мощности имеют компактное или встроенное исполнение. ПЧ средней мощности состоят из одного шкафа. ПЧ большой и сверхбольшой мощности состоят из нескольких шкафов (секций) – например, силовой секции (или секций, в которых расположены транзисторные преобразователи), секции фильтра, секции управления и др.

В ЭП малой мощности СУ выполняются либо на отдельной плате, либо объединяются на одной плате вместе с силовой частью, в результате чего получается одноплатный ПЧ, причём СУ может располагаться непосредственно на плате ПЧ или подключаться к ней как мезонинная плата<sup>2</sup>. Преимуществами такого подхода являются снижение массогабаритных характеристик и стоимости ПЧ, а недостатками – большая техническая сложность и высокая трудоёмкость разработки, так как на одной плате, имеющей ограниченные габаритные размеры, нужно расположить силовые и информационные электронные компоненты, а также обеспечить их хорошую электромагнитную совместимость.

В ЭП средней, большой и сверхбольшой мощности СУ могут быть одноплатными или состоять из нескольких плат, расположенных в одном корпусе (блоке управления), причём электрическое соединение между этими платами осуществляется без проводов (платы расположены на минимальном расстоянии и имеют разъёмное соединение друг с другом), а корпус обычно является металлическим<sup>1</sup>. Такой подход кро-

*Примечание:* <sup>1</sup> СУ, имеющие не сосредоточенную (в виде блока), а распределённую конструкцию, в которых платы электрически соединяются друг с другом с помощью проводов (кабелей), особенно если они находятся на большом расстоянии друг от друга (более 25 см), желательно не применять в качестве СУ ЭП, так как они имеют низкие помехозащищённость и надёжность.

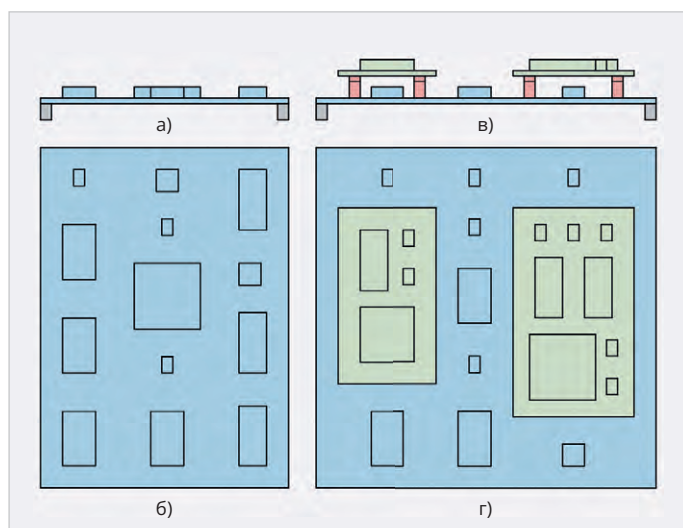


Рис. 1. Конструкция одноплатной СУ

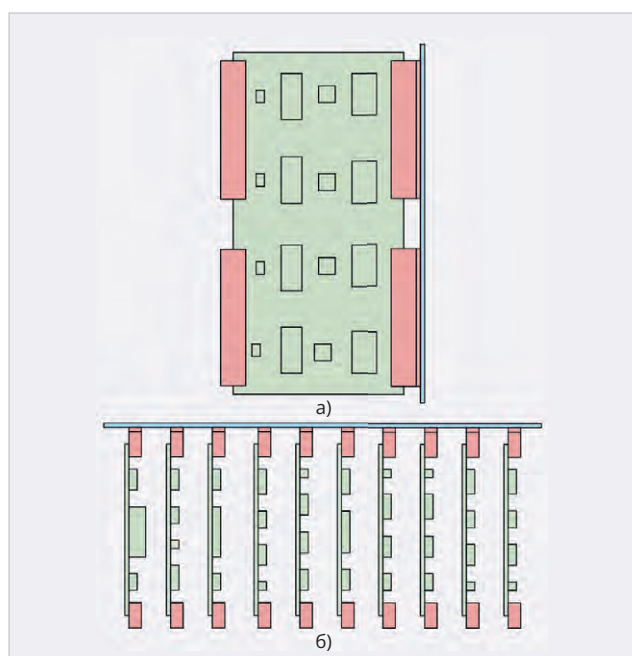


Рис. 3. Конструкция СУ с объединительной платой

ме уменьшения размеров СУ и увеличения количества функций, которые они выполняют, позволяет повысить помехозащищённость и надёжность СУ, что очень важно при управлении ПЧ, которые работают в условиях большого электромагнитного излучения.

СУ ЭП большой и сверхбольшой мощности в основном имеют распределённое размещение, когда ЛСУ располагаются в силовой секции (секциях), а ЦСУ и ПЛК – в секции управления. При этом ЛСУ, управляющие АВН и АИН, могут иметь каждая свой корпус или объединяться в одном корпусе. Но также возможен вариант, когда ЛСУ, ЦСУ и ПЛК объединены в одном корпусе и располагаются в секции управления (ВБУ ЭП).

Конструктивно, по количеству плат, входящих в их состав, СУ ЭП бывают двух типов:

- одноплатные СУ, когда их электронные компоненты расположены на одной печатной плате, и эта плата выполняет все системные функции (рис. 1);
- многоплатные СУ, когда их электронные компоненты расположены на нескольких (двух и более) печатных платах (рис. 2–6).

В свою очередь, многоплатные СУ ЭП можно разделить на следующие основные виды [14]:

- СУ с главной (материнской или системной) платой, которая выполняет основную часть системных функций (обработка информации, управление и контроль) и имеет

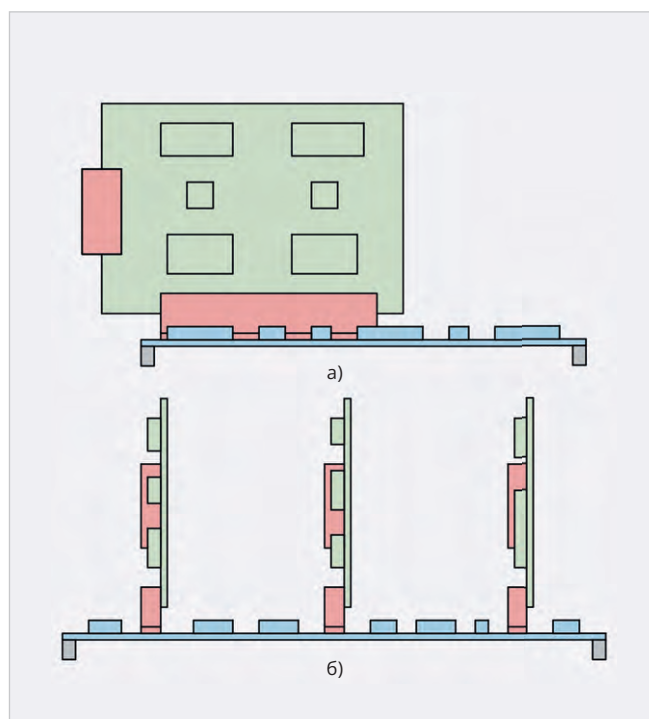


Рис. 2. Конструкция СУ с главной платой

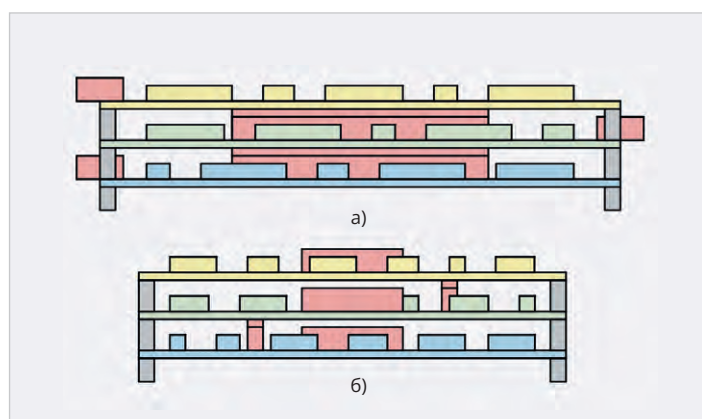


Рис. 4. Конструкция СУ с несколькими функциональными платами – вариант 1

разъёмы, к которым подключаются функциональные платы<sup>3</sup>, выполняющие определённые функции, в основном периферийные (например, плата дискретных входов/выходов, плата аналоговых входов/выходов, плата цифровых интерфейсов и т.д.) (рис. 2);

- СУ с объединительной платой (кросс-платой), которая предназначена для электрического соединения плат и имеет разъёмы, к которым подключаются функциональные модули<sup>4</sup> (например, модуль ИП, модуль МК, модуль дискретных входов/выходов и т.д.) (рис. 3);
- СУ с несколькими функциональными платами (например, платой ИП, цифровой платой, аналоговой платой, платой интерфейсов и т.д.), ко-

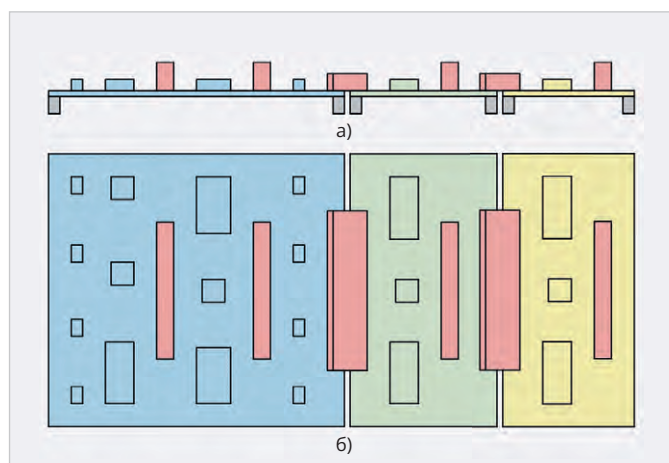


Рис. 5. Конструкция СУ с несколькими функциональными платами – вариант 2

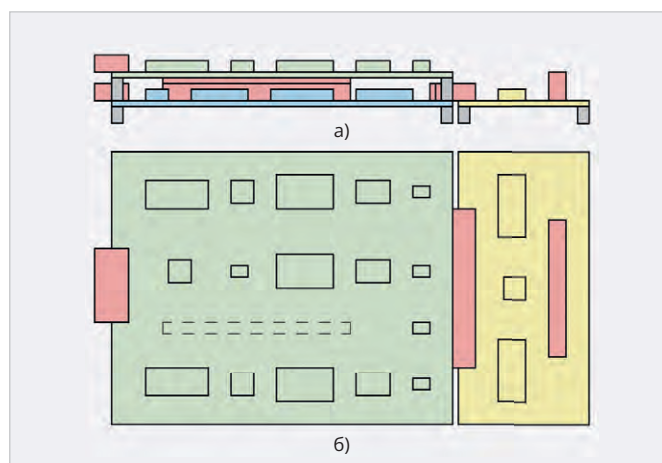


Рис. 6. Конструкция СУ с несколькими функциональными платами – вариант 3

торые выполняют определённые функции и электрически соединяются друг с другом с помощью разъёмов (рис. 4–6).

Конструкция СУ с несколькими функциональными платами имеет два основных варианта:

- платы имеют разъёмы с вертикальными контактами и устанавливаются параллельно друг другу одна над другой (вертикальное соединение), образуя вертикальную (объёмную, «многоэтажную») конструкцию (рис. 4);
- платы имеют разъёмы с горизонтальными контактами, расположенными вдоль края платы, и устанавливаются параллельно друг другу в одной плоскости (торцевое соединение), образуя горизонтальную (плоскую, «одноэтажную») конструкцию (рис. 5).

Возможно объединение этих двух вариантов (третий вариант), когда платы устанавливаются как одна над другой, так и в одной плоскости, образуя вертикально-горизонтальную конструкцию (рис. 6).

#### Примечания:

<sup>2</sup> Мезонинная плата (мезонин) представляет собой дополнительную плату, которая подключается к разъёму (разъёмам) основной платы и устанавливается параллельно ей (над ней). Возможно неразъёмное подключение мезонина к основной плате, когда он припаивается к ней.

<sup>3</sup> Функциональные платы устанавливаются перпендикулярно главной плате.

<sup>4</sup> Функциональные модули представляют собой функциональные платы с лицевыми панелями и устанавливаются перпендикулярно кросс-плате.

На рис. 1 показаны два варианта конструкции одноплатной СУ: рис. 1а (вид спереди), рис. 1б (вид сверху) – безмезонинный вариант; рис. 1в (вид спереди), рис. 1г (вид сверху) – вариант с двумя мезонинами. На рис. 2 представлена конструкция СУ с главной платой: рис. 2а – вид справа, рис. 2б – вид сзади. На рис. 3 показана конструкция СУ с объединительной платой: рис. 3а – вид справа, рис. 3б – вид сверху. На рис. 4–6 представлены три варианта конструкции СУ с несколькими функциональными платами: рис. 4а (вид справа), рис. 4б (вид сзади) – вариант 1; рис. 5а (вид справа), рис. 5б (вид сверху, повернутый) – вариант 2; рис. 6а (вид справа), рис. 6б (вид сверху, повернутый) – вариант 3. На этих рисунках зелёным, синим и жёлтым цветами показаны платы, входящие в состав СУ, красным цветом – разъёмы, серым цветом – крепёжные стойки.

Широко применяется вариант одноплатных СУ с одной или несколькими мезонинными платами, которые выполняют определённые функции. Например, могут быть мезонины, на которых расположены МК или ПЛИС, мезонины с микросхемами памяти или светодиодами и т.д. При этом мезонинные платы могут располагаться на верхней стороне основной платы, на нижней её стороне или на обеих её сторонах. В многоплатных СУ отдельные платы также могут иметь в своём составе мезонины.

Примером одноплатной конструкции СУ ЭП является одноплатная СУ ОМПСУ фирмы АО «НПЦ «СЭС» (рис. 7). Блок управления фирмы Danfoss (плата управления Control Board NX и набор функциональных плат) явля-

ется примером конструкции СУ ЭП с главной платой (рис. 8). Примером конструкции СУ ЭП с объединительной платой является универсальный блок управления БУПЧ фирмы АО «НПЦ «СЭС» (рис. 9).

Конструкция СУ ЭП с несколькими функциональными платами имеет следующие особенности. В первом варианте при увеличении количества плат СУ увеличивается в высоту, а её длина и ширина не изменяются, образуя «этажерку». Возможны подварианты, когда отдельные платы, входящие в «этажерку», отличаются от остальных плат по длине или ширине. Примерами такой конструкции СУ являются блок управления AR2515/AR2516<sup>5</sup> фирмы Ingeteam (рис. 10) и устройства, базирующиеся на стандарте PC/104 (рис. 11). Во втором варианте увеличение количества плат СУ приводит к увеличению её длины, а высота и ширина не изменяются. Здесь также возможны подварианты, когда ширина отдельных плат отличается от ширины остальных плат. ПЛК INGESYS IC2 фирмы Ingeteam служит примером такой конструкции СУ (рис. 12). В третьем варианте при увеличении количества плат СУ происходит её увеличение как в высоту, так и в длину. Примером такой конструкции СУ является блок управления AR2105<sup>6</sup> фирмы Ingeteam (рис. 13).

Преимуществами одноплатных СУ по сравнению с многоплатными является то, что они проще, дешевле и компактнее. Но их функциональность ниже, чем у многоплатных СУ, и применяются они чаще всего в качестве ЛСУ и в ЭП малой и средней мощности.

Преимуществами СУ на основе главной платы являются их гибкость и

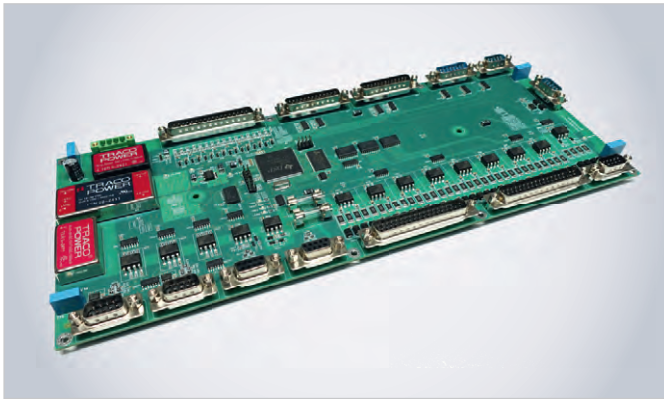


Рис. 7. Одноплатная СУ ОМПСУ фирмы АО «НПЦ «СЭС»

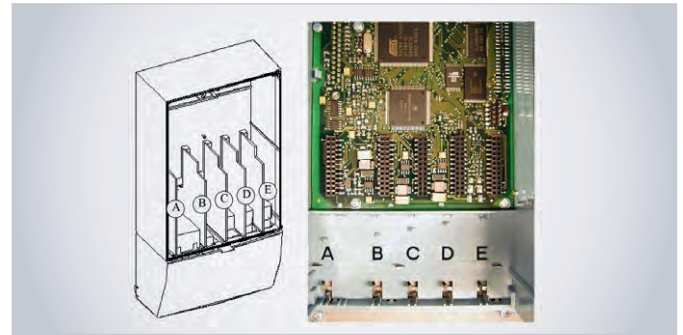


Рис. 8. Блок управления на основе платы Control Board NX фирмы Danfoss

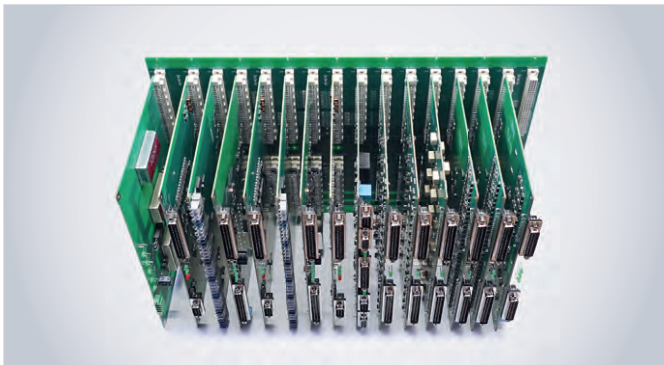


Рис. 9. Блок управления БУПЧ фирмы АО «НПЦ «СЭС» (без корпуса)



Рис. 10. Блок управления AR2515/AR2516 фирмы Ingeteam

более низкая стоимость, так как для каждого проекта (объекта управления) подбираются свои функциональные платы, и получается оптимальная (по набору плат и выполняемым функциям) для данного проекта СУ.

Основным преимуществом СУ на основе объединительной платы является их высокая ремонтпригодность, так как можно очень быстро заменить функциональный модуль, который вышел из строя.

Преимуществами СУ на основе нескольких функциональных плат являются их более высокая компактность и более низкая трудоёмкость разработки по сравнению с СУ на основе главной и объединительной плат.

При разработке конструкции (топологии) печатных плат (ПП), входящих в состав СУ ЭП, для обеспечения высо-

кой помехозащищённости и надёжности СУ необходимо соблюдать следующие основные правила:

- должны применяться только многослойные ПП (количество слоёв – не менее четырёх), которые позволяют использовать внутренние слои для организации питания платы в виде плоскостей (полигонов), что значительно увеличивает помехозащищённость СУ;
- информационные входы/выходы плат СУ (дискретные входы/выходы, аналоговые входы/выходы, цифровые интерфейсы, аналоговые интерфейсы, входы/выходы для управления IGBT-транзисторами) должны быть гальванически изолированы друг от друга и от МК (ПЛИС или СИС), и, соответственно, на ПП они должны быть раз-

делены с помощью диэлектрических зазоров;

- должно быть обеспечено раздельное цифровое питание (для цифровых микросхем и их обвязки) и аналоговое питание (для аналоговых микросхем и их обвязки) СУ, а их общие проводники (0 В, «земли») на

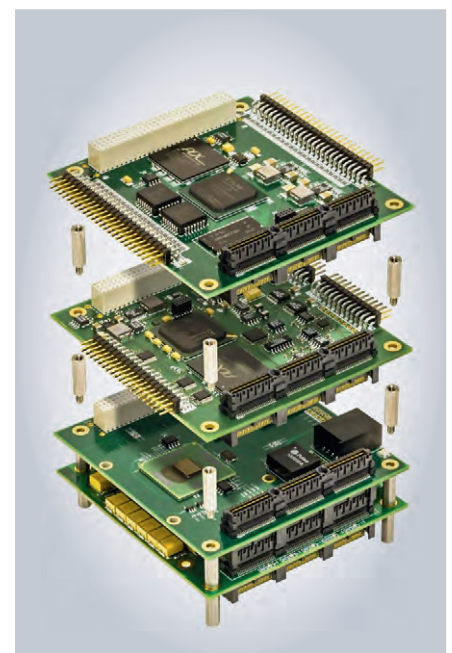


Рис. 11. СУ, выполненная по стандарту PC/104

#### Примечания:

<sup>5</sup> Блок управления AR2515/AR2516 имеет трёхэтажную конструкцию и состоит из трёх функциональных плат, расположенных одна над другой: платы ИП (нижней, на фотографии она не видна), цифровой платы (средней), имеющей два мезонина, и аналоговой платы (верхней).

<sup>6</sup> Блок управления AR2105 имеет сложную конструкцию и состоит из трёх функциональных плат: микропроцессорной платы (нижней, на фотографии она не видна), расположенной над ней основной платы, имеющей четыре мезонина (два из которых установлены на её верхней стороне, а два – на нижней стороне), и платы ИП (она расположена в стороне от основной платы, а не над ней).

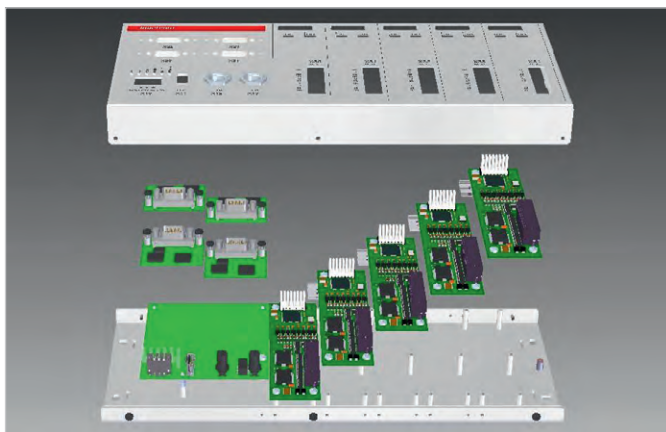


Рис. 12. ПЛК INGESYS IC2 фирмы Ingeteam



Рис. 13. Блок управления AR2105 фирмы Ingeteam

ПП нужно соединить в одной точке – около МК<sup>7</sup>;

- цифровое питание СУ должно быть разделено на две части: «чистое», которое питает МК (ПЛИС или СИС), микросхемы памяти и другие вспомогательные для МК микросхемы, и «грязное», которое питает микросхемы приёмников/передатчиков и буферные микросхемы, предназначенные для приёма/передачи и согласования уровней сигналов, поступающих на информационные входы/выходы, а их общие проводники (0 В, «земля») на ПП нужно соединить в одной точке – около источника питания;
- электронные компоненты на ПП необходимо располагать на обеих её сторонах и максимально компактно для того, чтобы длина проводников и размеры ПП были минимальными;
- длина информационных проводников должна быть как можно меньше<sup>8</sup>: чем меньше длина проводников, тем меньше вероятность наведения в них электромагнитных помех.

Пример правильной конструкции (топологии) ПП для СУ ЭП показан на рис. 14. На этом рисунке жёлтым цветом показано «чистое» цифровое питание (для цифровой части МК), зелёным цветом – аналоговое питание (для аналоговой части МК), синим цветом – «грязное» цифровое питание (для микросхем приёмников/передат-

чиков и буферных микросхем), фиолетовым цветом – питание входной части ИП, красным цветом – разъёмы, белым цветом – диэлектрические зазоры; 1 – МК, 2 – модульный ИП. Квадратами серого цвета показаны электрические соединения общих проводников (0 В, «земля») аналогового и «чистого» цифрового питания, а также «чистого» и «грязного» цифрового питания.

В области создания СУ ЭП есть интересная тенденция, или, правильнее сказать, особенность: каждая фирма-производитель ПЧ для управления ими использует СУ собственной разработки и изготовления. Например, ведущие западные фирмы-производители преобразовательной техники, такие как ABB, Danfoss, Ingeteam, Siemens, имеют собственные СУ ЭП. В нашей стране тоже каждая фирма-производитель ПЧ для управления ими старается применять собственную СУ.

Приведённые выше западные фирмы производят широкий ряд СУ, которые управляют ЭП различной мощности – от нескольких десятков кВт до нескольких МВт [18–21]:

- ABB – VCU-11, VCU-12, VCU-22, UCU-23, UCU-24;
- Danfoss – плата управления Control Board NX (главная плата) и большой набор функциональных плат, например, OPT-A1, OPT-A2, OPT-A5, OPT-B8, OPT-C2, OPT-C6, OPT-C1;
- Ingeteam – AR2105, AR2110, AR2515/AR2516, AR2531, AR2532;
- Siemens – CU230P-2, CU240B-2, CU240E-2, CU250S-2, CU310-2, CU320-2.

Плата управления Control Board NX включает в себя ЛСУ и ЦСУ, она построена на базе СИС фирмы Microchip (ЛСУ) и МК фирмы NXP (ЦСУ).

Блок управления AR2105 является ЦСУ, он реализован на основе микро-

процессора фирмы AMD, ЦСК фирмы Analog Devices и ПЛИС фирмы Altera. Блок управления AR2515/AR2516 является ЛСУ и построен на базе ПЛИС фирмы Altera. Блок управления AR2110 представляет собой ВБУ ЭП и включает в себя ЛСУ, ЦПУ и ПЛК. Блоки управления AR2531 и AR2532 являются одноплатными ЛСУ, реализованными на основе ПЛИС фирмы Altera. При этом блок AR2531 имеет мезонин, на котором располагаются оптические микросхемы, а блок AR2532 имеет безмезонинную конструкцию.

Блоки управления фирмы Siemens построены в основном на базе МК фирмы Infineon.

### Российский микроконтроллерный блок управления ПЧ для ЭП большой и сверхбольшой мощности

В настоящее время, в условиях сжатых сроков поставки промышленного электрооборудования, любому предприятию, которое занимается разработкой и изготовлением ПЧ для ЭП, хотелось бы иметь максимально функционально законченное, проверенное и надёжное СПУ в виде блока (силового модуля) и универсальную СУ ЭП, которые подойдут для большинства или даже для всех проектов. Такой подход позволяет быстро конструировать ПЧ различной мощности из готовых модульных СПУ и сосредоточиться в основном на разработке алгоритмического обеспечения и программного обеспечения (ПО).

Примером такого подхода является ПЧ мощностью 1,67 МВ·А на основе собственного высокоинтеллектуального силового модуля ТТМ-1000, разработанный инженерами концерна «Русэлпром» в 2022 году, кото-

#### Примечания:

<sup>7</sup> При использовании ПЛИС цифровые и аналоговые цепи должны объединяться на ПП около аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

<sup>8</sup> Желательно, чтобы длина информационных проводников не превышала 15 см.

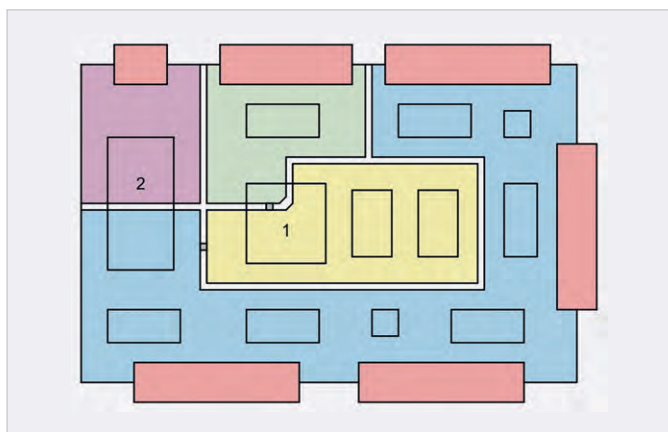


Рис. 14. Правильная конструкция (топология) ПП для СУ ЭП



Рис. 15. Блок управления БУПЧ

рый является базовым ПЧ для ЭП большой и сверхбольшой мощности этого концерна. На его основе создан ряд ПЧ мощностью от 600 кВт до 4,5 МВт, которые предназначены в основном для управления АД. Также они могут применяться для управления СД и в качестве регулируемых ИП для трёхфазных потребителей электроэнергии [16].

Основой СУ этих ПЧ является универсальный микроконтроллерный блок управления, разработанный инженерами АО «НПЦ «СЭС» (концерн «Русэлпром»), – блок управления БУПЧ (далее – БУПЧ), объединивший в своём составе две ЛСУ, ЦСУ и ПЛК. Технические условия на этот блок управления<sup>9</sup> одобрены Российским морским регистром судоходства, а сам БУПЧ имеет Свидетельство о типовом одобрении Российского морского регистра судоходства [15].

Блок управления БУПЧ имеет централизованную архитектуру с внутренним распределением функций и состоит из трёх микроконтроллерных систем управления (МКСУ), расположенных в одном корпусе: двух ЛСУ – контроллеров АВН (КАВ) и АИН (КИН) – и контроллера ввода/вывода сигналов (КВВ), который выполняет функции ЦСУ и ПЛК.

Связь между тремя контроллерами БУПЧ осуществляется с помощью высокоскоростного последовательного интерфейса SPI, при этом контроллеры КАВ и КИН являются подчинёнными, а контроллер КВВ – главным, координирующим работу КАВ и КИН. Внешний вид БУПЧ показан на рис. 15.

Контроллер КАВ осуществляет управление, контроль и защиту АВН: измерение напряжений и токов входной сети, напряжения в звене постоянного тока и температуры IGBT-модулей, обработку результатов этих

измерений и формирование сигналов управления IGBT-транзисторами с помощью специализированного алгоритма (векторное управление).

Контроллер КИН осуществляет управление, контроль и защиту АИН: измерение напряжений, токов и скорости вращения АД, напряжения в звене постоянного тока и температуры IGBT-модулей, обработку результатов этих измерений и формирование сигналов управления IGBT-транзисторами с помощью специализированного алгоритма (векторное управление).

Контроллер КВВ управляет контроллерами КАВ и КИН, а также координирует их работу, осуществляет ввод/вывод дискретных и аналоговых сигналов, реализует цифровые и аналоговые интерфейсы, осуществляет информационное взаимодействие с пультом управления и индикации (ПУИ) и СУ ВУ, управление и контроль систем охлаждения ПЧ и ЭД.

БУПЧ имеет блочно-модульную конструкцию, состоящую из блочного каркаса (крейта), в котором расположены объединительная плата (кросс-плата) и следующие функциональные модули (рис. 16):

- модуль источников питания (ИП);
- модуль микроконтроллера (МК);
- модуль широтно-модулированных выходов (ШИМ);
- модуль датчиков напряжения и тока (ДНТ);
- модуль цифровых интерфейсов и датчиков скорости (ЦИДС);
- модуль дискретных входов (ДВх);
- модуль дискретных выходов (ДВых);
- модуль датчиков температуры (ДТ);
- модуль аналоговых интерфейсов (АИ).

Конструкция каждого модуля состоит из соответствующей платы (имеющей такое же название) и лицевой

панели. С передней стороны плат расположены разъёмы для подключения источников питания и внешних сигналов, а также светодиодные индикаторы. С задней стороны плат расположены разъёмы для подключения модулей к объединительной плате.

В состав контроллеров КАВ и КИН входят модули МК, ШИМ и ДНТ. В состав контроллера КВВ входят модули МК, ЦИДС, ДВх, ДВых, ДТ и АИ.

Модуль МК является обязательным и единственным для каждого контроллера, другие модули могут иметь разное количество, а также могут не входить в его состав. Базовое количество модулей, входящих в состав БУПЧ, равно 16, а максимально возможное количество – 17.

Блок управления БУПЧ позволяет управлять четырьмя транзисторными преобразователями (например, двумя АВН и двумя АИН), а также осуществлять ввод/вывод дискретных и аналоговых сигналов и реализовывать цифровые и аналоговые интерфейсы. Поэтому он может применяться в двухканальных ПЧ, которые управляют двумя обычными АД, а также в ПЧ для двухобмоточных АД.

Прототипами БУПЧ можно считать блоки управления AR2105 (рис. 13) и AR2515/AR2516 (рис. 10) фирмы Ingeteam, которые предназначены для управления транзисторными преобразователями. Эти блоки управления работают совместно: блок AR2105 (Control Processing Unit) является ЦСУ и управляет одним или несколькими (до четырёх) блоками AR2515/AR2516, а также координирует их работу; блок AR2515/AR2516 (Power Management Module) является ЛСУ и управляет одним или двумя трёхфазными транзисторными преобразователями, а также тормозными транзисторами.

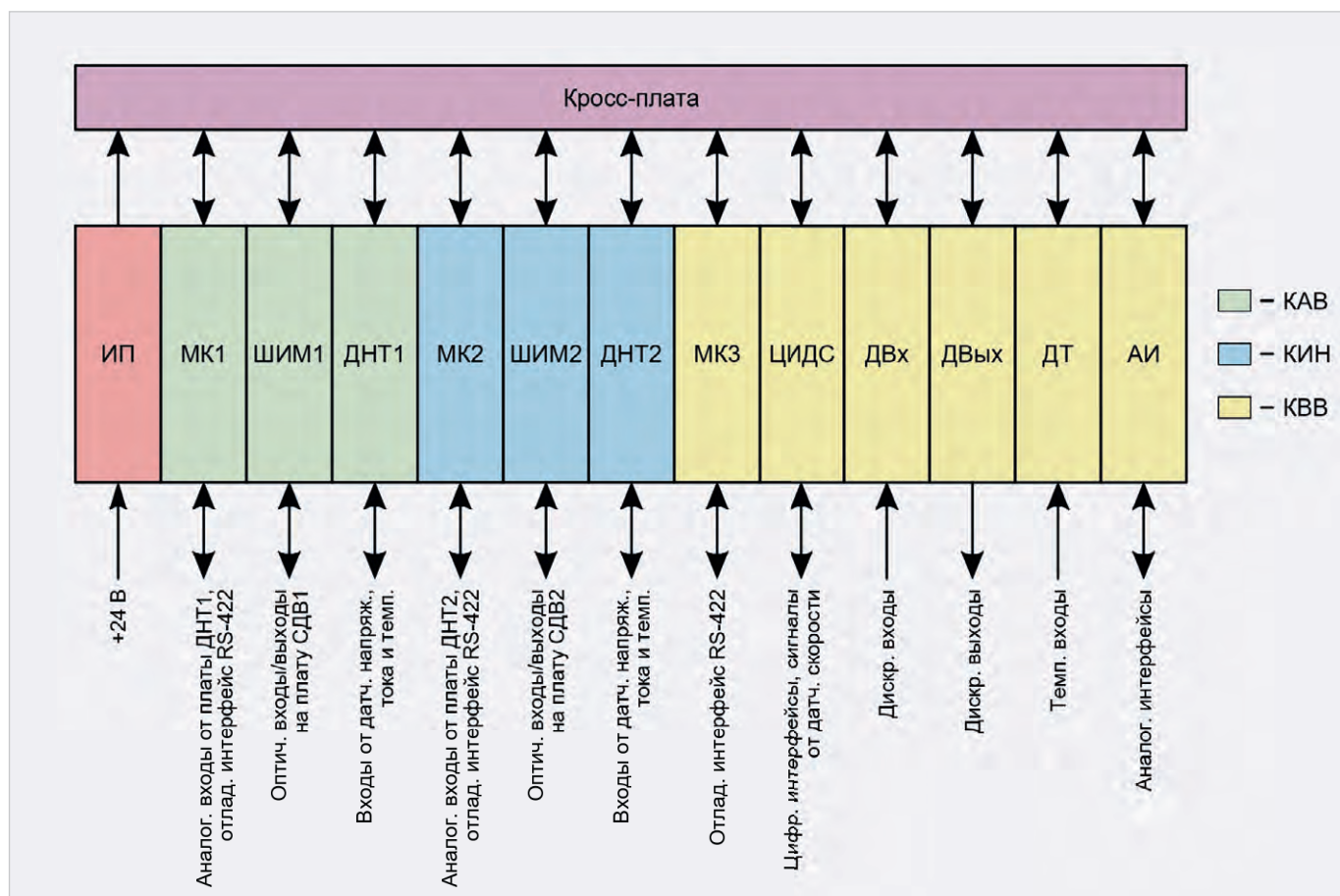


Рис. 16. Структурная схема БУПЧ

Для управления ПЧ требуется блок AR2105 (он управляет блоками AR2515/AR2516 и координирует их работу) и два блока AR2515/AR2516 (один из них управляет АВН, а второй – АИН).

По количеству подключаемых датчиков напряжения, тока и температуры, дискретных входов/выходов, цифровых и аналоговых интерфейсов, оптических входов/выходов для управления IGBT-транзисторами блок управления БУПЧ превосходит блоки управления AR2105 и AR2515/AR2516 – один БУПЧ может заменить блок AR2105 и два блока AR2515/AR2516.

БУПЧ по сравнению с большинством российских и зарубежных СУ ЭП является универсальным устройством и имеет высокую степень интеграции (он является ВБУ ЭП), что позволяет ему управлять различными ЭП и обходиться без ПЛК и специальных плат расширения. Поэтому его разработка, в которой автор принимал активное участие, оказалась очень непростой задачей, решение которой требовало высокой квалификации и большого опыта.

Блоки управления БУПЧ успешно применяются для управления ЭП

мощностью от 600 кВт до 4,5 МВт, которые эксплуатируются на следующих судах:

- суда с валогенераторной установкой;
- океанографические исследовательские суда;
- дизель-электрический ледокол;
- круизное пассажирское судно проекта PV300VD (замена СУ ПЧ ГЭД<sup>10</sup> и СУ ПЧ ПУ<sup>11</sup> фирмы Ingeteam на БУПЧ).

На стадии реализации находятся проекты аварийно-спасательных судов и дизель-электрических ледоколов, в которых БУПЧ управляют ЭП мощностью от 1,1 МВт до 4,5 МВт.

## Заключение

Современные СУ ЭП имеют в основном распределённо-централизованную структуру и состоят из ЛСУ, ЦСУ и ПЛК. При этом ЛСУ и ЦСУ являются обязательными частями СУ ЭП, а ПЛК – необязательной частью; он используется для увеличения количества входов/выходов и интерфейсов. При повышении степени интеграции СУ ЭП – объединении ЛСУ, ЦСУ и ПЛК в одном корпусе – получится ВБУ ЭП, который будет выполнять все функции СУ ЭП. Он имеет централизо-

ванную структуру с внутренним распределением функций, состоящую из нескольких частей – СУ (контроллеров), каждая из которых выполняет определённую функцию. Можно с уверенностью сказать, что в будущем сохранятся и будут развиваться СУ ЭП с обеими этими структурами, хотя более распространёнными останутся СУ ЭП с распределённо-централизованной структурой.

Управление ЭП является многоуровневой и иерархической задачей, которую осуществляет комплекс управления ЭП. В его состав входят как минимум четыре уровня управления: драйверы IGBT-транзисторов (нижний уровень), ЛСУ, ЦСУ и СУ ВУ (верхний уровень). А в сложных технологических процессах количество уровней управления может быть ещё больше, и СУ ВУ сама может являться подсистемой для СУ ещё более высокого уровня.

## Примечания:

<sup>9</sup> ФБРТ.426469.001ТУ. Блок управления БУПЧ. Технические условия: введены впервые, 75 с.

<sup>10</sup> ГЭД – гребной электродвигатель.

<sup>11</sup> ПУ – подруливающее устройство.

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. ЦСУ могут быть реализованы на базе МК с RISC-архитектурой, имеющих среднюю производительность. В настоящее время ПЛИС и СИС активно развиваются, поэтому с достаточной степенью уверенности можно предположить, что в будущем их применение в СУ ЭП будет увеличиваться.

Существует пять основных вариантов структуры СУ ЭП, которые отличаются реализацией ЛСУ и ЦСУ. В них ЛСУ могут быть реализованы на базе МК или ПЛИС (СИС), а ЦСУ – на базе МК или ПЛК. Эти варианты построения СУ ЭП имеют несколько подвариантов, которые отличаются количеством плат, на которых они расположены.

По конструкции СУ ЭП бывают одноплатными и многоплатными. В свою очередь, многоплатные СУ ЭП можно разделить на три основных вида: с главной (материнской или системной) платой, с объединительной платой (кросс-платой) и с несколькими функциональными платами.

При разработке конструкции (топологии) печатных плат (ПП), входящих в состав СУ ЭП, необходимо соблюдать определённые правила, которые позволяют обеспечить их высокую помехозащищённость и надёжность.

Каждый из вариантов структуры и конструкции СУ ЭП имеет свои особенности, преимущества и недостатки. Для каждого проекта желательно создать оптимальные структуру и конструкцию СУ ЭП, а критериями оптимальности могут быть следующие её характеристики и показатели: массогабаритные характеристики, себестоимость, удельная функциональность и функциональная себестоимость. Можно с уверенностью сказать, что в будущем, в процессе развития СУ ЭП, такой показатель, как удельная функциональность, будет повышаться, а функциональная себестоимость, наоборот, будет снижаться.

В 2022 году концерном «Русэлпром» разработан ПЧ мощностью 1,67 МВ·А, на базе которого создан ряд ПЧ для ЭП мощностью от 600 кВт до 4,5 МВт.

Основой СУ этих ПЧ является универсальный микроконтроллерный блок управления, разработанный инженерами АО «НПП «СЭС» (концерн «Русэлпром»), – блок управления БУПЧ, объединивший в своём составе две ЛСУ, ЦСУ и ПЛК, который позволяет управлять четырьмя транзисторными преобразователями (например, двумя АВН и двумя АИН).

Одним из главных достоинств БУПЧ является его универсальность, которая позволяет успешно применять его для замены СУ ЭП западного производства, поддержка которых в последнее время полностью отсутствует на территории Российской Федерации. Например, инженерами концерна «Русэлпром» были успешно заменены СУ ПЧ ГЭД и СУ ПЧ ПУ фирмы Ingeteam на блоки управления БУПЧ на круизном пассажирском судне проекта PV300VD. При этом в ПЧ ГЭД один БУПЧ заменил два блока управления фирмы Ingeteam – AR2105 и AR2516, а в ПЧ ПУ один БУПЧ заменил три блока управления фирмы Ingeteam – AR2105 и два AR2532.

## 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, оборудованием. 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.
18. ABB Industrial Drives. BCU-02/12/22 control units: Hardware manual. 34 p. URL: <http://www.abb.com>.
19. INGEDRIVE. Control Components: User manual. 59 p. URL: <http://www.ingeteam.com>.
20. SINAMICS. S120 AC Drive: Manual. 500 p. URL: <http://www.siemens.com>.
21. Vacon NX AC Drives. Basic I/O boards, Expander I/O boards, Adapter boards: User manual. 84 p. URL: <http://www.danfoss.com>.



# Измеритель уровня воды с линейчатым индикатором

Сергей Бирюков

В системе водоснабжения дачного дома накопительным элементом служит полиэтиленовая бочка объёмом 160 литров, установленная на чердаке [1]. Весьма полезным дополнением к системе является описываемый в этой статье измеритель уровня воды в бочке.

Особенностью измерителя, его главным отличием от описанных ранее [2–4] является использование многоцветного светодиодного блока В20ВРGYR, позволяющего индцировать 20 уровней [5]. В блоке установлены светодиоды четырёх цветов, по пять каждого цвета – красного, жёлтого, зелёного и синего. Светодиоды красного цвета обычно применяют для отображения аварийной ситуации или близкой к ней, например, значительного превышения номинального напряжения. В данном измерителе красный цвет означает снижение уровня воды до критического значения. Допустимый уровень воды отображается жёлтым цветом,

нормальный – зелёным, полная бочка – синим.

Датчиком измерителя является конденсатор, образованный двумя обкладками из полос фольги, укрепленными на наружной поверхности бочки вертикально с противоположных сторон. Ёмкость изготовленного датчика практически линейно зависит от уровня воды в бочке – от 7 пФ для пустой бочки до 270 пФ для почти полной.

Схема предлагаемого индикатора приведена на рис. 1. На компараторе DA1.1 собран генератор коротких импульсов отрицательной (относительно плюсовой шины питания) полярности. Частота повторения импульсов 10 кГц, длительность – 8 мкс. Импуль-

сы с выхода DA1.1 через диод VD2 разряжают ёмкость датчика BC1, которая в паузе между импульсами генератора заряжается током через резисторы R7 и R8.

Во время действия импульса через диод VD3 на прямой вход компаратора DA1.2 поступает напряжение, меньшее, чем на инверсный вход этого компаратора, что объясняется более низким падением напряжения на диоде VD3 типа КД510А, чем на диоде VD2 КД503Б. В результате на выходе компаратора напряжение близко к нулю.

После окончания импульса оба диода закрываются, и начинается зарядка ёмкости датчика уровня BC1, при этом на прямой вход компаратора DA1.2 приходит напряжение с делителя R9R10, на инверсный – меньшее напряжение с заряжающейся ёмкости датчика, и на его выходе напряжение близко к напряжению питания.

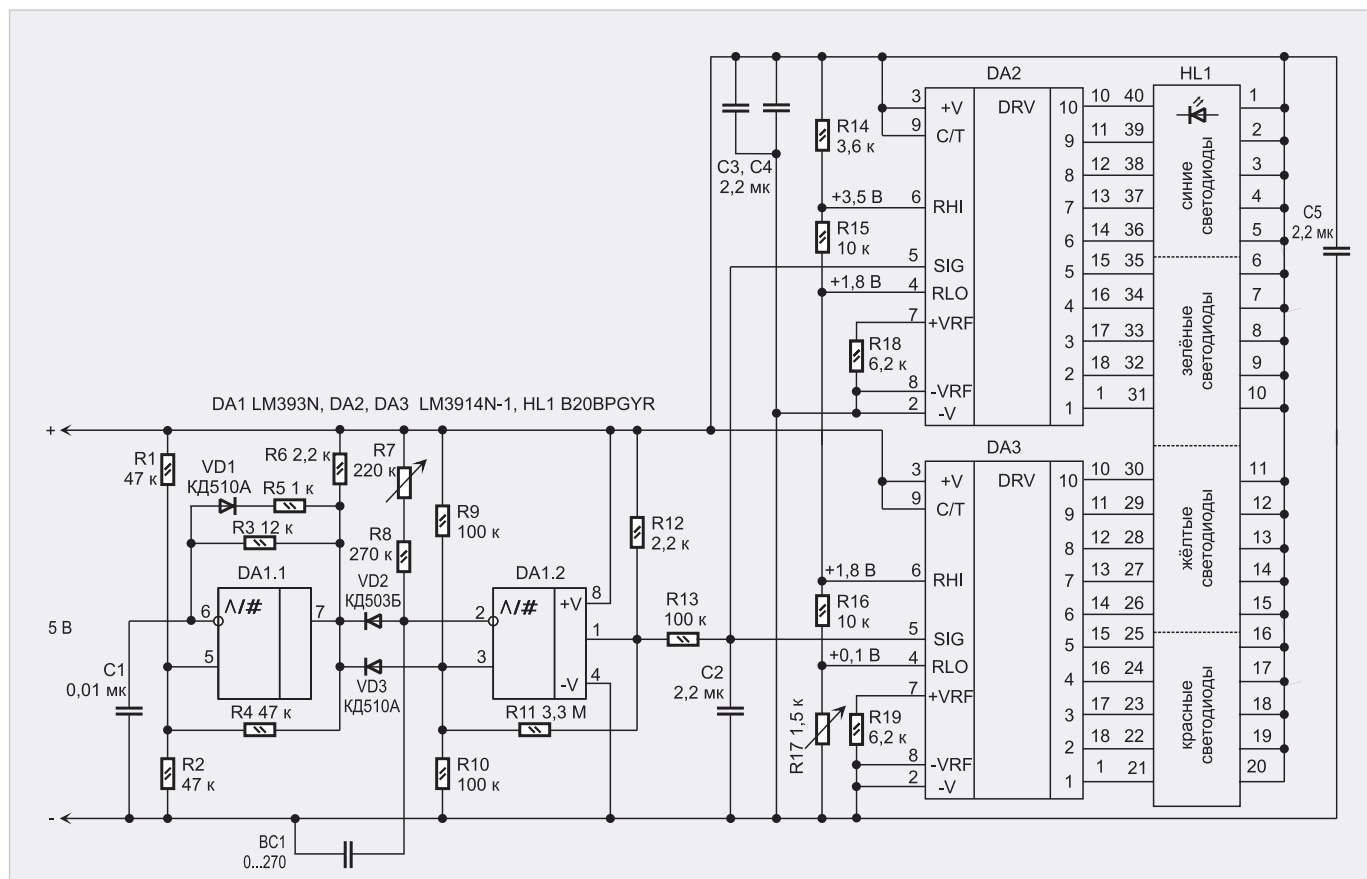


Рис. 1. Принципиальная схема измерителя

При ёмкости датчика  $C_{вс1} = 270$  пФ, соответствующей заполненной бочке, постоянная времени зарядки при среднем положении движка R7 составляет:

$$\begin{aligned} \tau &= \left(\frac{R7}{2} + R8\right) \times C_{вс1} = \\ &= 370 \times 10^3 \times 270 \times 10^{-12} \approx \\ &\approx 10^{-4} \text{ с} = 100 \text{ мкс}, \end{aligned}$$

что соответствует периоду генератора импульсов на компараторе DA1.1.

На рис. 2 приведены временные диаграммы работы измерителя. Начало отсчёта времени совпадает с началом импульса отрицательной полярности на выходе DA1.1.

За счёт положительной обратной связи через резистор R11 компаратор DA1.2 работает в режиме инвертирующего триггера Шмитта с порогом включения  $U_{пор}$ , равным половине напряжения питания. Пока напряжение на ёмкости датчика ниже этого уровня, на его выходе напряжение близко к напряжению питания (жёлтая линия). Когда напряжение на входе пересекает указанный уровень, триггер Шмитта переключается, напряжение на его выходе становится близким к нулю.

Время, требуемое для зарядки ёмкости датчика до срабатывания триггера Шмитта, прямо пропорционально этой ёмкости и, соответственно, измеряемому уровню воды.

Таким образом, на выходе DA1.2 формируются импульсы положительной полярности, длительность которых прямо пропорциональна уровню воды. При ёмкости датчика  $вс1$  270 пФ и пороговом напряжении триггера Шмитта  $U_{пор}$ , равном половине напряжения питания  $U_{пит}$ , коэффициент заполнения импульсов  $K_{и}$  составит

$$K_{и} = \ln \frac{U_{пит}}{U_{пит} - U_{пор}} = \ln 2 \approx 0,7.$$

Цепочка R13C2 с постоянной времени 220 мс усредняет импульсы, и на конденсаторе C2 формируется постоянное напряжение, прямо пропорциональное уровню воды. При ёмкости датчика 270 пФ оно составит примерно 0,7 от напряжения питания, т.е.  $5 \text{ В} \times 0,7 = 3,5 \text{ В}$ . У этого напряжения есть небольшая «подставка», связанная с ёмкостями соединительных проводов и с собственной ёмкостью датчика при отсутствии воды.

Для управления светодиодным блоком HL1 используются две микросхемы – драйверы светодиодов LM3914N-1

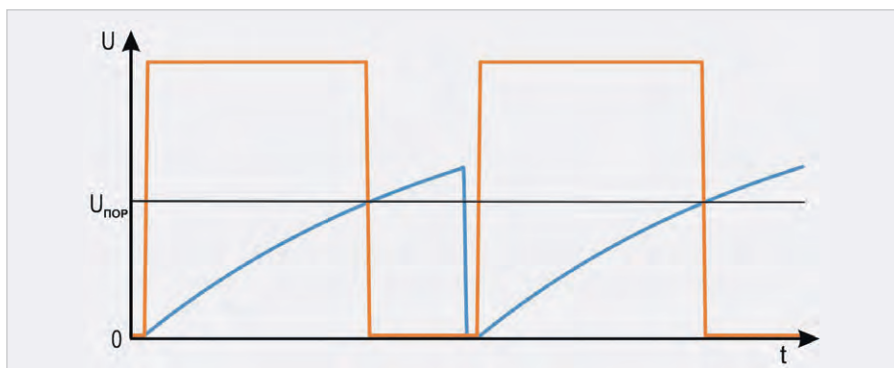


Рис. 2. Временные диаграммы работы измерителя

[6]. Входной ток драйверов по измерительному входу SIG не превышает 100 нА, поэтому никакого буферного усилителя после сглаживающей цепочки не требуется.

Драйверы работают практически независимо один от другого, общим для них является только делитель напряжения R14–R17. Делитель обеспечивает на входах RHI и RLO напряжения, указанные на схеме. Для включения светодиодов в режиме «столбика» входы управления режимом С/Т подключены к плюсу питания.

Пока напряжение на измерительном входе SIG микросхемы DA3 находится в пределах, указанных на её входах, на светодиодном блоке HL1 светится столбик из соответствующего числа светодиодов, но не более десяти. Если напряжение на входах SIG превысит уровень RHI микросхемы DA3, равный уровню RLO DA2, в работу включается микросхема DA2, начнут светиться светодиоды верхней половины блока HL1, все светодиоды нижней половины останутся выключёнными.

Как показано выше, порог индикации верхнего уровня воды должен составлять 0,7 напряжения питания, примерно такое напряжение задаётся делителем на входе RHI микросхемы DA2. «Подставка» компенсируется подстройкой резистора R17, задающего напряжение на входе RLO (нижнем выводе внутреннего делителя). При расчёте делителя R14–R17 учтено, что сопротивление внутренних делителей LM3914N-1 (между выводами RHI и RLO) составляет 10 кОм.

Встроенные в микросхемы DA2 и DA3 источники опорного напряжения не используются, поскольку пороги должны быть пропорциональны напряжению питания, а не стабилизированными.

Токи через светодиоды задаются резисторами R18 и R19, они определяются по формуле  $I_{сд} = 12,5/R$  (мА, В, кОм) и при указанных на схеме сопротивлениях 6,2 кОм составляют около 2 мА.

В измерителе использованы постоянные резисторы МТ, МЛТ и их импортные аналоги, R7 – многооборотный резистор из Алиэкспресс [7] и R17–СП3-19а. Рисунок проводников печатной платы позволяет установить в качестве R7 и R17 подстроечные резисторы любого из указанных типов. Конденсатор C1–КМ-6, C2–C5 – для поверхностного монтажа типоразмера 0603. Микросхема LM393N может быть заменена на K1401CA3 или KP1040CA1.

Диоды VD2 и VD3 должны иметь различающееся не менее чем на 20 мВ падение напряжения при токах порядка 10 мкА...1 мА. Проверить это можно при помощи цифрового мультиметра, имеющего режим контроля диодов. При работе в этом режиме на дисплее мультиметра индицируется падение напряжения на диоде при некотором небольшом токе, вполне подходящем для такого измерения. Также можно измерить падение напряжения на диодах при помощи прибора Mega328 или любого другого аналогичного.

Вполне возможно, что из нескольких однотипных диодов можно подобрать такую пару, но, если использовать диоды указанных на схеме типов, подбор не требуется. Используемые автором взятые случайным образом диоды имели разность падений напряжения около 80 мВ.

Если не устанавливать диод VD3, «подставка» существенно увеличивается, поскольку длительность импульсов положительной полярности на выходе компаратора DA1.2 суммируется с длительностью импульсов на выходе DA1.1.

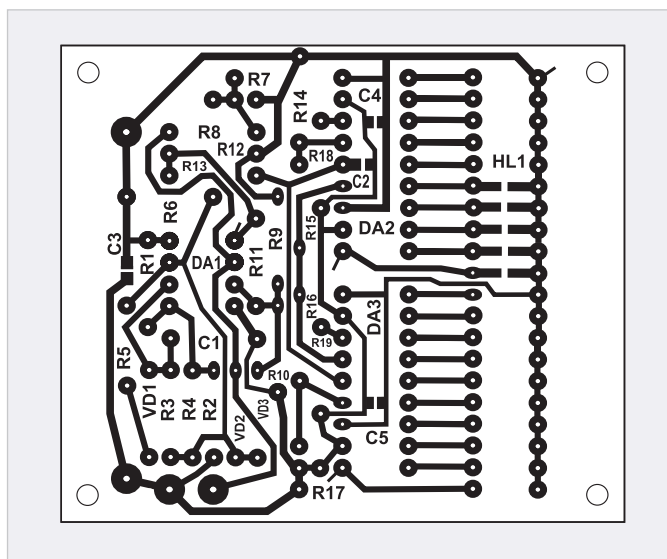


Рис. 3. Печатная плата измерителя

Все детали измерителя установлены на печатной плате размером 65×55 мм из односторонне фольгированного стеклотекстолита толщиной 1,5 мм, чертёж платы приведён на рис. 3, расстановка деталей на рис. 4, фото на рис. 5. Собственно рисунок печатных проводников занимает площадь 55×55 мм, что позволяет повернуть его на 90° для более удобной установки в корпусе.

Для подключения источника питания и датчика в плату впаяны штыревые контакты диаметром 1 мм. На стороне печатных проводников вытравлены позиционные обозначения большинства элементов, что облегчает сборку и настройку измерителя.

Микросхемы установлены в соответствующие панельки, а светодиодный индикатор – в два отрезка гнездовых линеек [8], впаянных в печатную плату. Для подключения источника питания, в качестве которого используется стандартное зарядное устройство смартфона, использован разъём Type-C [9].

Измеритель собран в пластмассовом корпусе с габаритными размерами 100×60×25 мм. Общий вид измерителя приведён на рис. 6.

Для изготовления датчика использованы полосы шириной 120 мм из фольги для кулинарной выпечки и длиной, соответствующей высоте бочки. Для подключения использованы узкие полоски медной фольги, которые завернуты в концы полос фольги датчиков, к этим полоскам припаяны проводники к измерителю. Полосы закреплены на поверхности бочки при помощи липкой упаковоч-

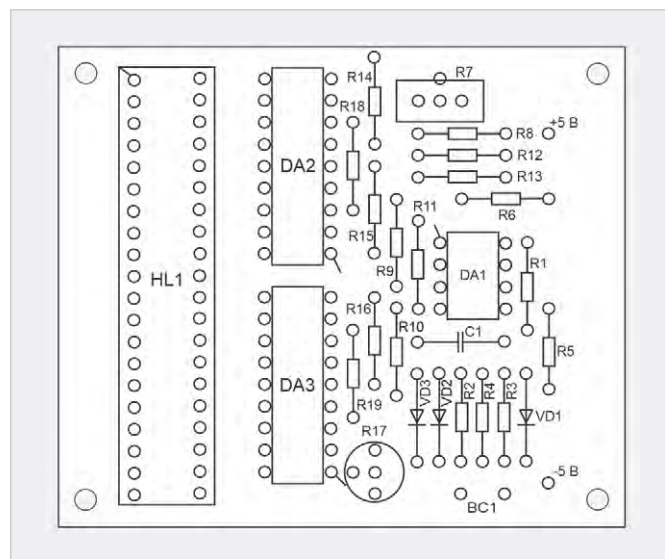


Рис. 4. Расстановка деталей на плате

ной плёнки. Если расстояние между бочкой и платой преобразователя больше двух метров, для уменьшения влияния ёмкостной связи между проводниками можно увеличить ёмкость датчика за счёт использования полос фольги вдвое большей ширины, при этом необходимо будет уменьшить сопротивление резисторов R7 и R8 в два раза.

Настройка измерителя несложна. Удобно использовать вместо датчика конденсатор с ёмкостью, соответствующей почти полной бочке. Необходимо подключить его ко входу измерителя и, изменяя сопротивление резистора R7 от максимального значения в сторону уменьшения, добиться погасания светодиода, соответствующего максимальному уровню. Далее, регулируя его в противоположную сторону, снова зажечь этот светодиод. Затем при подключении ёмкости, соответствующей пустой бочке, вращением движка резистора R17 добиться зажигания светодиода, соответствующего минимальному уровню.

В связи с тем, что регулировки взаимосвязаны, рекомендуется повторить вышеописанные операции. Если ёмкость датчика при полной бочке значительно отличается от 270 пФ, необходимо обратно пропорционально ей изменить суммарное сопротивление резисторов R7 и R8.

Осциллограммы работы изготовленного измерителя, приведённые на рис. 7, повторяют кривые на рис. 2, небольшое отличие заключается в том, что разрядка ёмкости датчика происходит не до нуля, а до падения

напряжения на диоде VD2, составляющего 0,6–0,7 В.

Для питания измерителя не обязательно использовать источник 5 В, поскольку компараторы микросхемы LM393N и драйвер LM3914N-1 не критичны к напряжению питания, а при изменении напряжения питания и сигнал, и пороги драйвера изменяются пропорционально. Можно, например, использовать стабилизированный адаптер на 9 или 12 В.

Если индикатор впаять в плату со стороны печатных проводников (так сделано в [3]), при минимальных уровнях воды будут включаться синие светодиоды, при максимальных – красные.

При первом включении измерителя обнаружилось, что зелёные светодиоды индикатора светятся значительно ярче, чем светодиоды других цветов, это заметно на фото рис. 6. Для снижения яркости параллельно им были подключены резисторы КИМ-0,05 сопротивлением 1,3 кОм. Для возможной установки резисторов поверхностного монтажа на чертеже проводников печатной платы (рис. 3) добавлены соответствующие контактные площадки.

Если желательно осуществлять индикацию уровня не в виде столбика, а в виде одного светящегося светодиода, необходимо отсоединить вход С/Т (вывод 9) микросхем DA2 и DA3 от плюса питания. Далее, вывод 9 микросхемы DA2 подключить к её же выводу 11, а вывод 9 DA3 к выводу 1 DA2. Также необходимо между выводом 11 DA3 и плюсом питания установить резистор 20 кОм.

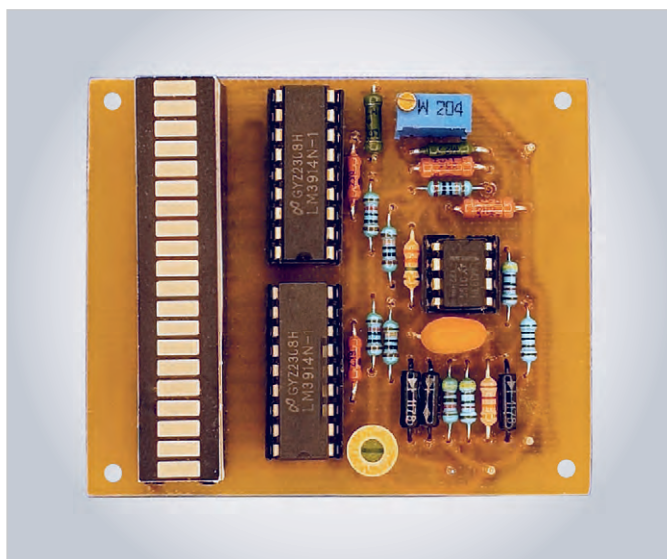


Рис. 5. Внешний вид платы

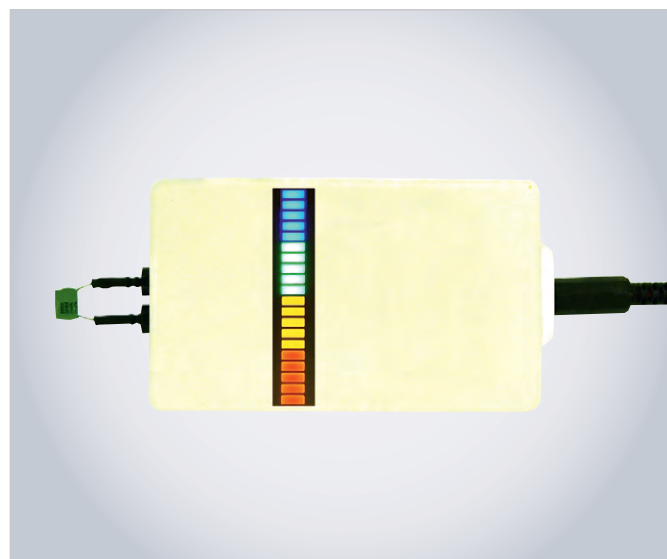


Рис. 6. Общий вид измерителя

Если необходима индикация уровня воды в металлической ёмкости, можно использовать датчик из металлопластиковой трубы, применяемой в системах водоснабжения [4], при этом необходимо уточнить сопротивление резисторов R7 и R8.

На основе данного измерителя можно изготовить автомат, выключающий насос при наполнении бочки и включающий его, когда уровень воды опустится ниже определённой отметки. Возможный вариант схемы такой доработки измерителя приведён на рис. 8, для неё желательно использовать напряжение питания измерителя 12 В. Возможность сохранения для питания напряжения 5 В будет рассмотрена далее.

Логическим элементом, определяющим необходимость включения или выключения насоса, является своеобразный триггер на мажоритарном клапане DD1. Этот триггер работает следующим образом. Если на двух нижних (по схеме) входах мажоритарного клапана высокий логический уровень, на выходе также лог. 1, если на этих входах низкий уровень, на выходе также лог. 0. Если на этих входах разные уровни, триггер хранит своё предыдущее состояние.

При включении любого светодиода индикатора HL1 на соответствующем выходе микросхемы DA2 или DA3 напряжение на 1,7–2,5 В ниже напряжения питания, что определяется падением напряжения на светодиодах разных цветов. Для выключения светодиода соответствующий ему ключ микросхемы DA2 или DA3 закрывается, и его выходной ток становится

близким к току утечки закрытого транзистора. Можно считать, что цепи между выходами микросхем DA2 и DA3 и светодиодами в этом случае переходят в состояние обрыва и напряжение на них не определено. Если измерить вольтметром напряжение между выходом микросхемы DA2 или DA3 и общим проводом, оно будет близко к 3,5 В, оно будет равно нулю, если вольтметр подключить параллельно выключенному светодиоду. Ни то, ни другое состояние выходов микросхем DA2 и DA3 при управлении светодиодами не соответствует логическим уровням КМОП.

Для приведения уровней в этих цепях к нормальным для микросхем КМОП установлены резисторы R20–R23. Резисторы R22 и R23 включены в разрыв цепей от выходов DA2 и DA3 к светодиодам индикатора HL1,

а R20 и R21 шунтируют эти светодиоды. В результате для выключенных светодиодов напряжение на них равно нулю и на входах микросхемы DD1 высокие логические уровни.

Выходные каскады микросхем LM3914N-1, управляющие светодиодами, построены по схеме генераторов тока. Они нагружены на светодиоды, и напряжение на выходах микросхем при включении светодиодов, как указано выше, на 1,7–2,5 В ниже напряжения питания. Резисторы R22 и R23, включённые в разрыв цепей от выходов DA2 и DA3 к светодиодам, переводят выходные транзисторы микросхем DA2 и DA3 в режим насыщения, и сигналы на этих выходах становятся близкими к нулю, что обеспечивает нормальную работу микросхемы DD1.

При индикации в режиме столбика и при пустой бочке все светоди-

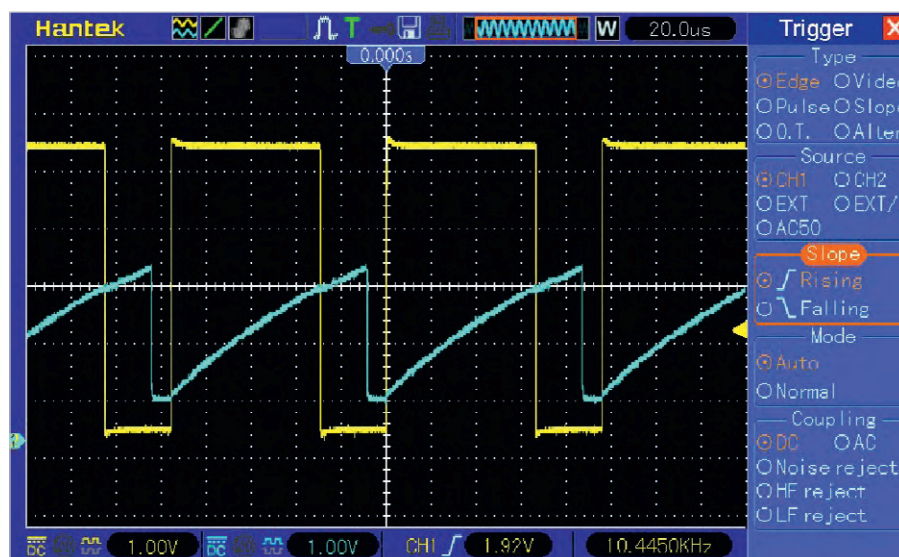


Рис. 7. Осциллограммы работы измерителя

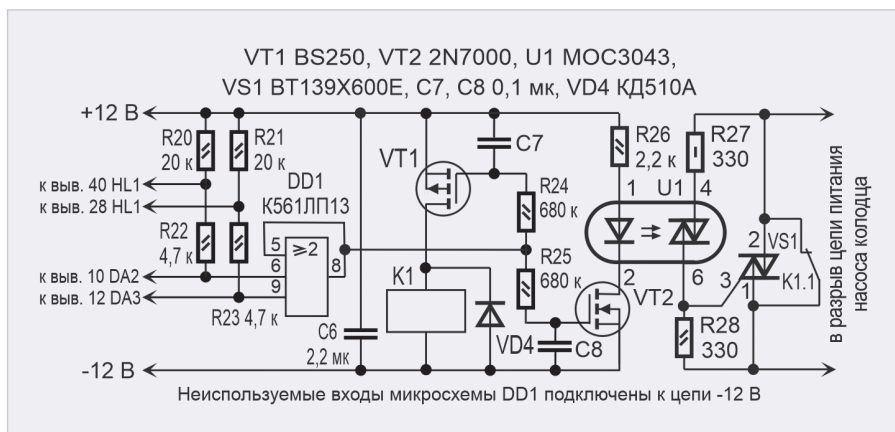


Рис. 8. Схема автомата для включения насоса

оды индикатора HL1, кроме самого нижнего, выключены, и на выходах микросхем DA2 и DA3, подключённых ко входам DD1, напряжение 12 В, уровень на выходе DD1 – лог. 1. Транзистор VT1 выключен, реле K1 выключено, его контакты K1.1 замкнуты. Включён транзистор VT2, через излучающий светодиод оптрона U1 течёт ток, но симисторы оптрона и VS1 не включаются, поскольку они замкнуты контактами K1.1 реле. Насос, накачивающий воду в бочку, включён.

По мере наполнения бочки светодиоды поочерёдно включаются, но на выходе DD1 сохраняется лог. 1, насос работает. Когда включится самый верхний светодиод (подключённый к выводу 40 HL1), на обоих входах микросхемы DD1 появятся уровни лог. 0, на выходе DD1 также лог. 0.

Напряжение лог. 0 с выхода DD1 примерно через 20 мс (за счёт задержки на цепочке R24C7) включает транзистор VT1 и реле K1, оно размыкает свои контакты. Поскольку через светодиод оптрона U1 течёт ток, а в момент, предшествующий размыканию контактов реле, напряжение между выводами 4 и 6 оптрона близко к нулю, симистор оптрона U1 включится и включит симистор VS1. Ток работающего насоса будет течь через симистор VS1.

Напряжение лог. 0 с выхода DD1 через резистор R25 начнёт медленно разряжать конденсатор C8, и примерно через 120 мс транзистор VT2 выключится, выключатся оптрон U1 и симистор VS1. Насос выключится.

По мере расхода воды светодиоды поочерёдно гаснут, но на выходе DD1 сохраняется лог. 0, насос выключен. Когда выключится светодиод, подключённый к выводу 28 HL1, на обоих входах микросхемы DD1 появятся уровни лог. 1, на выходе DD1 также лог. 1.

Это напряжение через резистор R25 примерно за 12 мс зарядит конденсатор C8 до порога открывания транзистора VT2, что включит его и оптрон U1, он включит симистор VS1, замкнётся цепь питания насоса. Напряжение лог. 1 на выходе триггера DD1 также вызовет медленную разрядку конденсатора C7 через резистор R24. Примерно через 90 мс ток через обмотку реле K1 прекратится, контакты K1.1 замкнутся и зашунтируют симистор VS1. Далее питание насос будет получать через контакты реле K1.

В результате размыкание и замыкание контактов реле происходит при включённом симисторе и при напряжении на них (в разомкнутом состоянии), не превышающем нескольких вольт, что позволяет рассчитывать на длительный срок службы реле. Более подробно работа узла коммутации мощной нагрузки описана в статье [10].

В конструкции можно применить реле SM1H-12VDC-SL-C на рабочее напряжение 12 В с двумя группами контактов на переключение, сопротивление обмотки 270 Ом, ток срабатывания 30 мА. Используемые контакты групп следует соединить между собой параллельно. В справочных данных на это реле указано, что его контакты в разомкнутом состоянии могут выдерживать напряжение 240 В переменного тока. При резистивной нагрузке оно может коммутировать ток 16 А при напряжении переменного тока 125 В, а при резистивно-индуктивной ( $\cos \phi = 0,4$ ) – 5 А при 125 В переменного тока. Таким образом, в соответствии с паспортными данными, сколько-нибудь мощную нагрузку с питанием от сети 230 В коммутировать им нельзя. В описываемом измерителе замыкание и размыкание контактов реле происходит при напря-

жении на них (в разомкнутом состоянии), не превышающем нескольких вольт, что исключает искрение и не даёт контактам разрушаться.

Уровень воды, при котором будет включаться насос, определяется номером выхода микросхемы DD3 (или DD2), к которому подключаются резисторы R21 и R23, и не обязательно это вывод, указанный на схеме. Нельзя только для этой цели использовать выходы 1 (вывод 1) DA2 и вывод 9 (вывод 11) DA3, поскольку они внутри микросхем используются в специальных цепях для каскадирования микросхем в режиме точки.

О возможности использования напряжения питания 5 В. Для обеспечения требуемых соотношений задержек включения и выключения транзисторов необходимо, чтобы они надёжно включались при напряжении на затворе в три-пять раз меньше напряжения питания, т.е. при 1,0–1,6 В. Можно использовать транзисторы Si2300DS (n-канал) и Si2301BDS (p-канал). Следует учесть, что они выпускаются только в корпусах SOT-23 для поверхностного монтажа.

Для напряжения питания 5 В сопротивление резисторов R22 и R23 необходимо уменьшить до 1 кОм, а реле K1 должно иметь обмотку, рассчитанную на 5 В, например, SM1H-05VDC-SL-C.

Шланг с обратным воздушным клапаном [1] для исключения последствий аварийного перелива установить обязательно!

## Литература

1. Бирюков С. Водоснабжение на даче // САМ. 2015. № 6. С. 12–14.
2. Бирюков С. Измеритель уровня воды // Радио. 2020. № 4. С. 60, 61.
3. Бирюков С. Индикатор уровня воды // Радио. 2024. № 2. С. 39–41.
4. Кравцов В. Ёмкостный уровнемер электропроводящих жидкостей с линейной шкалой // Радио. 2023. № 9. С. 47–50.
5. Многоцветный светодиодный дисплей. URL: <https://ali.click/qi2i418>.
6. Микросхема LM3914N-1. URL: <https://ali.click/b24i41y>.
7. Подстроечные резисторы. URL: <https://ali.click/3y2i41m>.
8. Однорядная гнездовая розетка. URL: <https://ali.click/zc3i41r>.
9. Разъём Type-C. URL: <https://ali.click/zq3i41u>.
10. Бирюков С. Ремонт холодильника // Радио. 2023. № 5. С. 37–40.



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

### В России создают первый в мире кубсат для съёмки солнечной короны

Российские учёные приступили к разработке малоразмерной космической обсерватории, которая должна впервые в истории получить изображения солнечной короны с кубсата. Проект реализуют Институт космических исследований РАН совместно с технологической компанией Геоскан.



Создание спутника запланировано на 2026 год, а запуск – на 2027-й. Аппарат будет построен на платформе кубсата формата 16U и предназначен для мониторинга солнечных вспышек и выбросов корональной массы.

Руководитель проекта, профессор РАН и заведующий лабораторией солнечной астрономии ИКИ РАН Сергей Богачев отметил, что задача находится «на грани реализуемости». По его словам, в мире уже существуют успешные примеры измерения солнечного излучения с малых спутников, однако получить полноценное изображение солнечной короны с кубсата пока никому не удавалось.

Сейчас российские специалисты уже проводят измерения рентгеновского излучения Солнца с помощью наноспутника Импульс-1, однако новый проект предполагает значительно более сложный уровень наблюдений.

Наблюдение солнечной короны в дальнем ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах критически важно для изучения солнечной активности и прогнозирования космической погоды. С поверхности Земли такие наблюдения невозможны, поскольку соответствующее излучение практически полностью поглощается атмосферой.

Разработка телескопа для подобных наблюдений связана с серьёзными техническими ограничениями. Жёсткое ультрафиолетовое и рентгеновское излучение невозможно сфокусировать обычными линзами

или зеркалами, поэтому инженерам приходится использовать многослойные металлические покрытия и специальные тонкоплёночные фильтры.

Дополнительную сложность создаёт миниатюрный размер аппарата – вся научная аппаратура и системы ориентации должны быть размещены в корпусе размером примерно 25×25×50 см. При этом спутник должен обеспечивать исключительно точное наведение на Солнце без микровибраций, способных испортить изображение.

Научным руководителем проекта назначен Сергей Кузин, а главным конструктором стал аспирант ИКИ РАН Андрей Матюхин.

Проект получил поддержку Министерства науки и высшего образования России в рамках федеральной программы «Кадры для космоса». Помимо создания спутника, инициатива включает образовательный блок: ИКИ РАН планирует подготовить 30 специалистов в области космических технологий.

Обучение будет проходить совместно с Санкт-Петербургским государственным электротехническим университетом «ЛЭТИ». Практическая часть программы будет организована на базе ИКИ РАН, а теоретическую подготовку возьмёт на себя университет. Часть участников планируют набрать через открытый конкурс после запуска официального сайта проекта.

### Наушники с глазами: исследователи превратили Sony WF-1000XM3 в аналог AI-очков

Исследователи из Вашингтонского университета встроили камеры в беспроводные наушники Sony WF-1000XM3, создав экспериментальное устройство с функциями компьютерного зрения и искусственного интеллекта. Проект под названием VueBuds показывает, каким может стать следующее поколение носимой электроники, – и фактически демонстрирует концепцию, над которой, по данным СМИ, уже работает Apple.

Модифицированные наушники способны анализировать окружающее пространство и отвечать на вопросы пользователя с помощью большой языковой модели. По задумке разработчиков, устройство работает примерно так же, как AI-очки, включая популярные Ray-Ban Meta AI: камеры фиксируют окружающую среду, а ИИ интерпретирует увиденное и предоставляет подсказки или информацию в реальном времени.

Интерес к подобным устройствам ра-

стёт на фоне слухов о разработке AirPods с камерами. По информации журналиста Bloomberg Марка Гурмана, такие наушники находятся на поздней стадии разработки и ориентированы не на съёмку фото или видео, а именно на задачи искусственного интеллекта – навигацию, контекстные уведомления и анализ окружающей среды.

Одной из главных проблем подобных систем остаётся энергопотребление и конфиденциальность. Чтобы снизить нагрузку на аккумулятор и уменьшить риски для приватности, создатели VueBuds использовали камеры низкого разрешения, работающие только в чёрно-белом режиме. Такой подход делает систему менее требовательной к ресурсам и ограничивает захват детализированных изображений.

По словам исследователей, скорость отклика устройства сопоставима с существующими AI-очками Meta. Однако технология по-прежнему сталкивается с рядом ограничений. Большая часть обработки выполняется в облаке, поэтому работа системы зависит от качества интернет-соединения. Кроме того, низкое разрешение и отсутствие цветной картинкой могут серьёзно ограничивать возможности компьютерного зрения в реальных сценариях использования.

Несмотря на это, VueBuds демонстрирует растущий интерес индустрии к переносу функций искусственного интеллекта из смартфонов непосредственно в носимые устройства. Если раньше основным форм-фактором считались умные очки, то теперь производители всё активнее рассматривают беспроводные наушники как потенциальную платформу для постоянного AI-сопровождения пользователя.



Пока такие проекты остаются экспериментальными, однако участие крупных игроков вроде Apple и Meta показывает, что рынок «зрячих» носимых устройств может стать одним из ключевых направлений развития потребительского ИИ в ближайшие годы.

# Бионический дизайн и SLM-технология в корпусных конструкциях электроники будущего

Андрей Кашкаров

Роботизированная техника с помощью ИИ и 3D-технологий помогает разрабатывать корпусные изделия для РЭА качественнее, быстрее и эстетичнее. Иногда важен каждый грамм веса без потери надёжности конструкции, как в аэрокосмических разработках или специальной РЭА. Заметна тенденция в создании инновационных корпусов для РЭА: от бытовых переносных систем до монтажных шкафов с модульным размещением электронного оборудования, эффективной системой расположения модулей и вентиляции – для серверных и специальных установок. Статья будет полезна разработчикам РЭА, а также инженерам-конструкторам и технологам в области проектирования модульных, пластиковых и металлопрофильных конструкций корпусов для РЭА, монтажных, в том числе встраиваемых, шкафов, руководителям предприятий и отраслевым аналитикам.

## Определение, польза и перспективы бионического дизайна в электронике

В рамках традиционного подхода наиболее часто используемыми терминами для обозначения бионического тренда являются «бионика», «биомиметика» и «биомимикрия». В английском

языке чаще всего используются слова и словосочетания Bionics, Biomimetics, Biomimesis, Biomimicry, Bionic Design, Bionically/Biologically/Bio-Inspired Design/Engineering [1]. Разные авторы вкладывают неодинаковые оттенки смысла в понятия, а принятых безусловно всеми определений пока не существует. Но по смыслу определе-

ния бионики объединяет идея заимствования принципов организации, свойств, функций, структур и материалов из живой природы с целью улучшения существующих и создания не менее совершенных технических, в том числе электронных, систем.

В названии и назначении технологии конструирования корпусов для РЭА бионический дизайн называют также генеративным (он же параметрический). Это действующий и развивающийся инструмент, позволяющий относительно быстро сделать из привычной формы с классическими ровными гранями креативную, привлекательную и нетрадиционную. Конструирование в этой области является не только интересным, но и перспективным.

Бионический дизайн в электронике связан с использованием принципа натуральности в формировании структуры и функционала устройств РЭА, подсказанного человеку живой природой. Такой подход уже оправдал себя: он расширил возможности создания более лёгких, прочных, эффективных и эстетически привлекательных электронных устройств, используя компьютерное моделирование, иначе – топологическую оптимизацию. 3D-печать помогает в воплощении сложных природных форм, таких, например, как соты, кости или паутина, что позволяет экономить материал и улучшать эргономические и функциональные (эффективная вентиляция, антивандальная стойкость, взрывоустойчивость и др.) характеристики электронных устройств в робототехнике, аэрокосмической отрасли и бытовых приборах.

Главная польза бионического дизайна – снижение веса изделия при сохранении (или увеличении) прочности конструкции. Инновационные решения уже используют в сферах, где важно сэкономить каждый грамм: космические аппараты, авиационное и БПЛА, компьютерное оборудование, гаджеты, специальная техника со зна-



Рис. 1. Вид на типовой листовой корпус РЭА серверного шкафа с активной системой вентиляции стандарта 19"

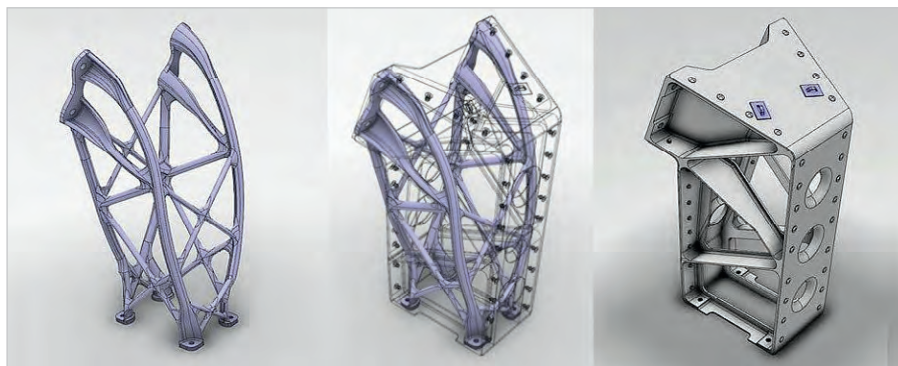


Рис. 2. Стадии конструирования инновационного корпуса для крепления плат и моделей РЭА

чительным тепловыделением, машиностроение и др.

Другая смежная задача – экономия дорогих материалов, сложных сплавов с применением редких и драгоценных металлов. Бионический подход в проектировании РЭА позволяет тратить на корпусные конструкции и элементы на 30–50% меньше материала, что положительно влияет на себестоимость изделий и прибыль от их реализации.

Престижные жилые кварталы, воплощающие в себе креативные дизайнерские решения в архитектуре; необычные модельные решения в ландшафте и одежде; пологие (обтекаемые) формы современных электромобилей, пришедшие на смену угловатости, преимущество облегчённых материалов перед традиционными чугунными батареями XX века – всё это следствие технической эволюции. Конечно, давно настало время совершенствовать внешний вид шкафов и корпусов для электронных устройств. К слову, в странах с развитыми технологиями этому уделяют большое внимание на протяжении последних 20 лет.

Необычные формы новой корпусной техники – актуальный тренд современной электроники в России. Разработчики инновационного оборудования принимают в расчёт задачи и стандарты для обеспечения эффективного охлаждения РЭА (внутри шкафа), высокой точности изготовления, надёжной защиты от электромагнитных помех для удобства монтажа и обслуживания. Современные шкафы для РЭА соответствуют принятым в России ТУ и ГОСТ 12.2.007.0–75 с экранированием ЭМИ и должны соответствовать требованиям к микроклимату и температурному режиму с рабочей температурой до +45°C при относительной влажности до 80%.

На рис. 1 показан вид сбоку на шкаф из конструкционной гнутой листовой стали DC01 по EN 10130, предназначенный для РЭА большой мощности, применяемый в телекоммуникационных системах серверного оборудования. Корпус соответствует стандартам 19-дюймовых конструктивов (ANSI/EIA-310-D, IEC 60297-3-100), это означает, что ширина шкафа рассчитана точно под размер 482,6 мм. При высоте конструкции 6U (266,7 мм) предусмотрены 4 монтажных уровня с возможностью установки оборудования общим весом до 50 кг. Эффективная система охлаждения с 9 вентиляторами обеспечивает оптимальный температурный режим даже при максимальной нагрузке.

На рис. 2 показан пример разработки с помощью генеративного дизайна инновационного шкафа для РЭА – три стадии дизайнерской разработки и изготовления изделия. Внутренняя структура в этой конструкции предусматривает зонированное охлаждение и съёмные панели для обслуживания. Система охлаждения включает 9 вентиляторов с суммарным расходом воздуха до 800 м<sup>3</sup>/ч: все резьбовые отверстия М6, шаг по стандарту 1U (44,45 мм). В области бытовой электроники и гаджетах разработка корпусов и внутренних компонентов (модулей) с улучшенной эргономикой, рассеиванием тепла имеет креативное начало: получило популярность разделение потоков охлаждающего воздуха внутри корпуса с РЭА, подобно «венам» растений. На рис. 3 представлен элемент конструкции инновационного шкафа для тех же нужд РЭА, но более лёгкого и функционального, с направленными потоками вентиляции. На этом примере вариативно показано, в каком направлении может развиваться дизайнерская мысль разработчиков корпусной техники РЭА.

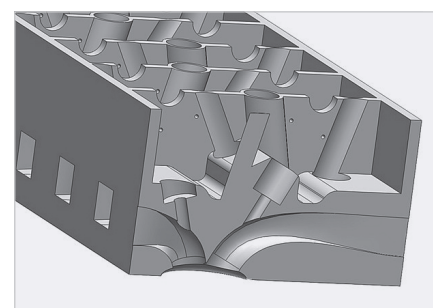


Рис. 3. Элемент конструкции инновационного шкафа для РЭА, но более лёгкого и функционального, с направленными потоками вентиляции

Типичные шкафы для РЭА считаются «сухими», их изготавливают с обязательным антистатическим исполнением, с покрытием краской стандартизированного колера RAL7035 (или аналогичной – если не предусмотрено иное) [3].

К инновационным технологиям для производства корпусов РЭА относятся:

- Metal Jet – метод струйной 3D-печати металлическими и керамическими материалами с применением связующего вещества;
- B1 Sand и SLS Wax – лазерная печать для создания песчаных форм и стержней для литья металлов, а также выплавляемых моделей из порошкообразных материалов (песка, воска, конструкционных пластиков);
- SLM Gradient – лазерная градиентная печать двумя и более металлическими материалами (титан-тантал, медь-никель и т.д.) с плавным переходом состава и свойств. Позволяет создавать новые сплавы, соединения разнородных материалов и производить детали с зонально различными характеристиками.

По той же аналогии для РЭА можно изготавливать корпуса из керамики на основе карбида кремния, изделия из нержавеющей стали, титанового сплава, инконеля, быстрорежущей стали, выплавляемые модели из синтетического воска (по технологии SLS Wax), электрические изоляторы из оксида алюминия (DLP), изделия из прозрачной высокопрочной фотополимерной смолы, композитных материалов с последующей полировкой (SLA) и др. [7].

### Перспектива корпусов РЭА со встроенным охлаждением

Развивающийся тренд производства корпусов РЭА со встроенным

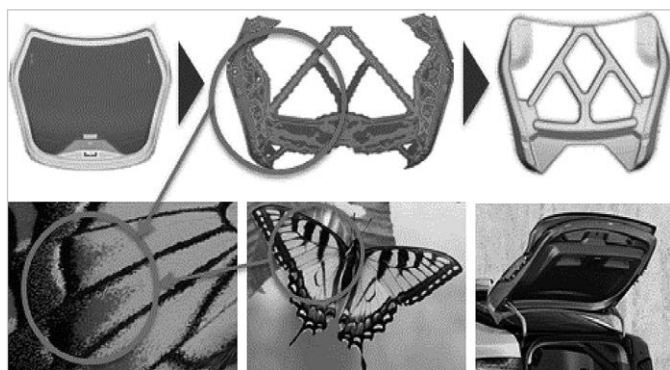


Рис. 4. Разработка Центра компьютерного инжиниринга СПбПУ – результаты топологической и топографической оптимизации крышки багажника автомобиля, сделанной по сходству с крыльями бабочки

охлаждением и обогревом реализуется с помощью вставок в стенки корпуса охлаждающих каналов. Охлаждающая жидкость поступает в них под нагнетаемым насосом давлением. Когда РЭА в монтажном шкафу требуется систематическое охлаждение, этот способ оказывается эффективнее принудительной вентиляции с помощью нескольких кулеров. Для таких случаев сокращения времени охлаждения в корпусах РЭА спроектированы оптимизированные каналы, и вставки напечатаны из порошка марки 18Ni300.

В результате оптимизации температура внутри корпусов снижается до 50°C, цикл охлаждения сокращён со 120 с до 45 с, решена проблема деформации. В итоге эффективность работы РЭА до отказа повышается в 2,5 раза.

### Условия, принципы и способы реализации

Элементы, произведённые с помощью генеративного дизайна, отличаются от «штампованных» и типичных техногенных изделий. Креативные формы элементов и конструкций можно визуально идентифицировать по характерным для объектов природы чертам. Поэтому в определении концепции присутствует приставка «био». Другой термин, «генеративный дизайн», используется в связи с тем, что геометрия конструкций автоматически рассчитывается (генерируется) в специальном ПО.

Каждый разработчик корпусов для РЭА несомненно творец, работающий с идеями, вдохновляемый природой. Наиболее успешен тот дизайнер и разработчик, кто чувствует вдохновение, изучая (кроме «матчасти») естествен-

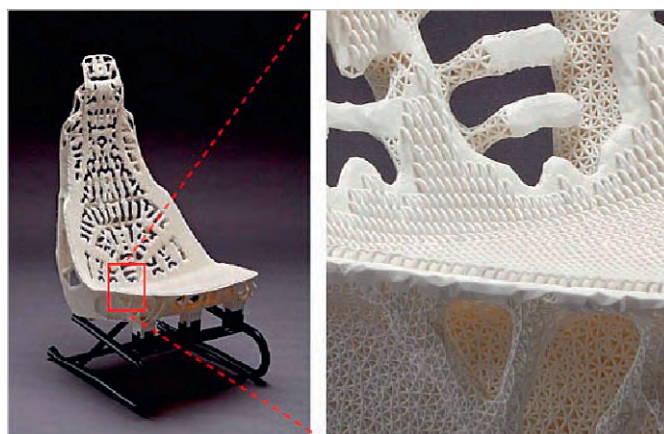


Рис. 5. Кресло инновационной формы в кабинете креативного разработчика электронной техники



Рис. 6. Слева представлен вид изготовленного на производстве крепления для шкафа с электронным оборудованием, справа результат применения бионического генеративного дизайна – вид крепления после оптимизации компьютерными алгоритмами

ные структуры в природных условиях для создания оптимальных форм корпусов электронных конструкций.

Один из примеров, как наблюдения за природой используют в рамках бионики разработчики конструкций из твёрдых материалов, представлен на рис. 4. Это разработка «Центра компьютерного инжиниринга» СПбПУ – результаты топологической и топографической оптимизации крышки багажника автомобиля, сделанной по сходству с крыльями бабочки [1].

К примеру, внимательное изучение необычных форм листьев, костей, раковин, пчелиных сот, форм муравьёв, даже форм облаков и многое другое даёт импульс к креативным решениям и разработкам. Даже «место посадки», удобство для работы имеет значение для конструирования с применением креативных идей.

На рис. 5 показано кресло инновационной формы в кабинете креативного

разработчика электронной техники. Разработки в области бионического дизайна связаны с технологией 3D-печати, с качественным исполнительным оборудованием. А это, в свою очередь, связано с результирующей экономической выгодой.

На рис. 6 (слева) представлен вид штампованного на производстве крепления для шкафа с электронным оборудованием. Начальный вес штампованного крепления – 330 г. Справа на том же рисунке – вид крепления после оптимизации компьютерными алгоритмами как результат применения бионического (генеративного) дизайна. Конечный вес изделия с тем же функционалом составил 165 граммов, что подтверждается на практике экономией примерно 41% материала. Таким образом, при сохранении изначальной жёсткости вес элемента шкафа или кронштейна уменьшается значительно, до 50%.



Рис. 7. Пример лёгких и прочных каркасов, имитирующих скелеты животных, для подвижных роботов

Есть несомненная и перспективная польза для разработчиков РЭА в применении генеративного дизайна для разработки целых корпусов. Так, в области компьютерной оптимизации использование CAE/CAD-программ для математического моделирования и генерации необычных форм, которые не может пока придумать человек.

Топологическая оптимизация связана с алгоритмами ИИ, которые удаляют лишний материал из конструкции, сохраняя её прочность и снижая вес. Технология, позволяющая создавать сложные слоистые структуры с полостями и сетчатыми текстурами, не достижимые традиционными методами, – это известное разработчикам РЭА аддитивное производство (3D-печать).

### Примеры практического применения

Создание лёгких и прочных каркасов, имитирующих скелеты животных, для более подвижных роботов активно востребовано в разработках для робототехники. На рис. 7 приведён соответствующий пример аддитивной конструкции для робототехники: представлен корпус робота-исследователя «Геоскан», разработанного в ФГБОУ Институте дизайна РГУ им. А.Н. Косыгина, одном из ведущих образовательных учреждений в области дизайна в России [5].

Пример сотрудничества специалистов, подготовленных на кафедрах промышленного дизайна, и разра-

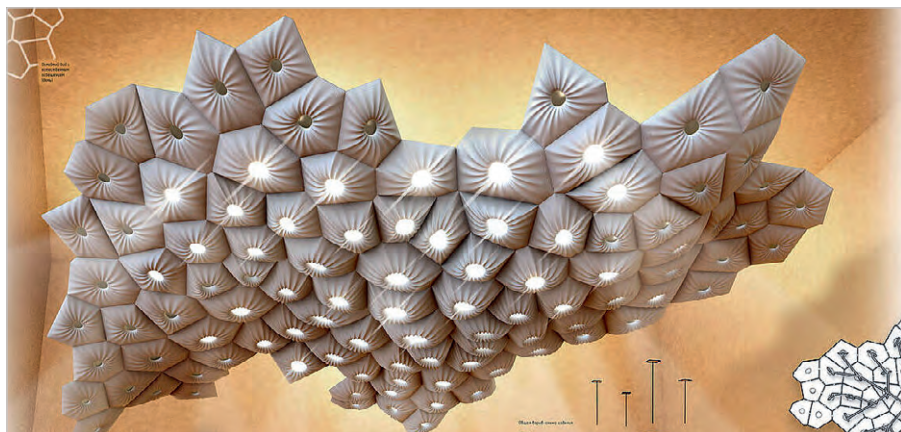


Рис. 8. Разработка интерьерного осветительного прибора для жилых и производственных помещений разной площади

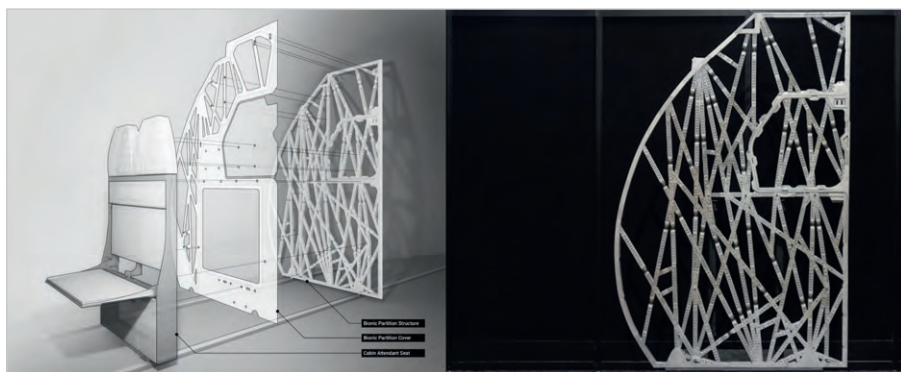


Рис. 9. Модель перегородки самолёта (слева) и готовая металлическая деталь (справа)

ботчиков РЭА весьма перспективен. На рис. 8 представлена разработка интерьерного осветительного прибора для жилых и производственных помещений разной площади. Компетенции в теоретических основах электротехники позволяют разрабатывать такие проекты и реализовывать их на практике. По той же аналогии специалистами разрабатываются корпуса для водных транспортных средств и трансформируемые авто- и электро-мобили, насыщенные электронными системами.

Производитель программного обеспечения для проектирования Autodesk реализует уникальный проект по снижению веса элементов металлоконструкций. Перегородка между пассажирским салоном и отсеком бортопроводников – обычная на первый взгляд стенка внутри самолета, к которой крепятся откидные сидения. Ими пользуются члены экипажа во время полёта. Но этот элемент конструкции должен быть очень прочным, что делает его вес при производстве традиционными способами большим. С помощью моделирования удалось сделать часть корпуса перего-

родки полый, усилив геометрию конструкции сетью металлических креплений специально подобранной формы с учётом обязательных требований к прочности конструкции. Конструкция изготовлена по частям с помощью технологии селективного лазерного плавления порошков.

Технологами и разработчиками учитываются особенности макроскопической плотности эффективного материала в элементах объёма решётчатой структуры изделия. При проектировании корпусов РЭА по новейшей технологии и с необычной структурой применяют принципы бионического дизайна и топони-мической оптимизации. Элементы корпуса, где ожидается относительно высокая нагрузка, расположены на участках максимальной плотности, и наоборот. В итоге вес изделия достиг всего 7 кг вместо 25 кг по сравнению с серийной моделью. Теплоёмкость изделия также снизилась с 35,4 Дж/К до 14,5 Дж/К. За счёт технологии бионического дизайна и оптимизации удаётся достичь лучшего распределения нагрузки в несущей конструкции и снижения веса ВЭУ на 48%.

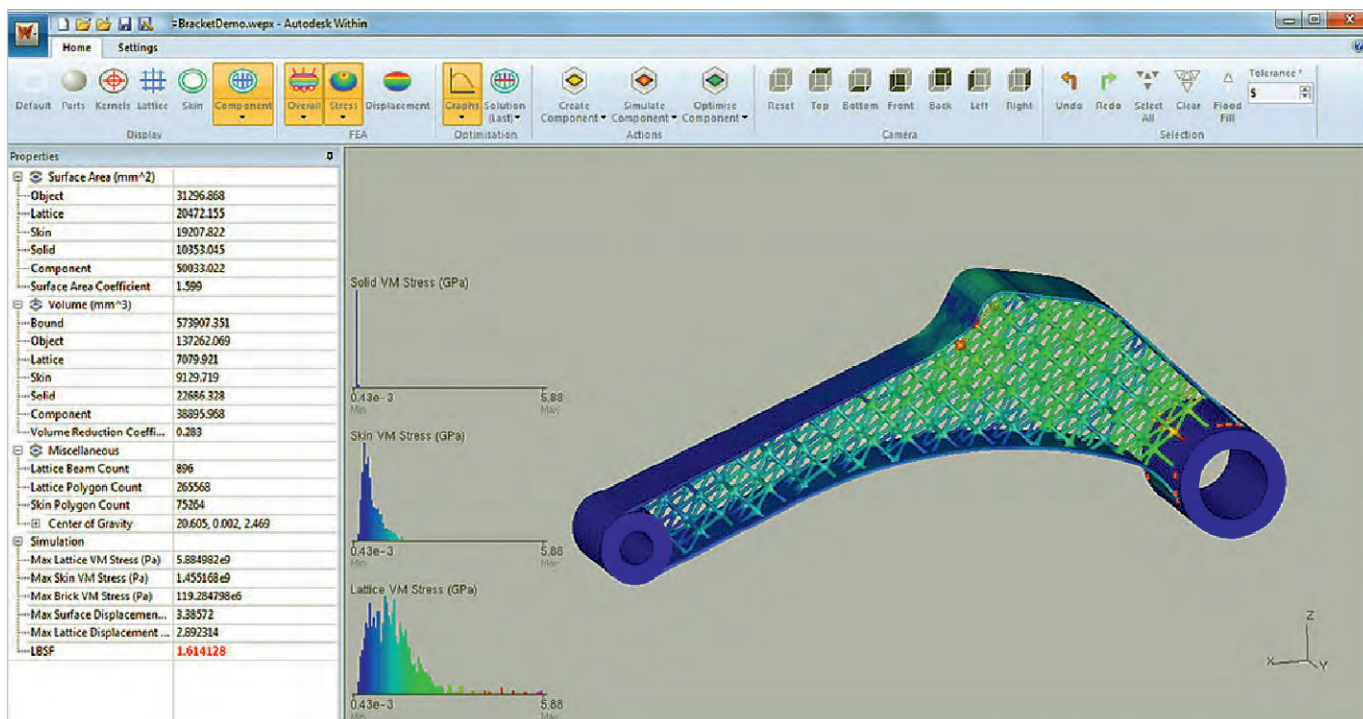


Рис. 10. Иллюстрация окна проектирования в программе Shape Generator



Рис. 11. Н.Г. Басов (слева) и А.М. Прохоров – разработчики КГКС

Пример расчёта с помощью ИИ облегчённой металлической перегородки для самолета показан на рис. 9. Эта заготовка из области самолетостроения приведена как пример. Применение технологии бионического дизайна позволило сделать конструктивный элемент на 45% легче аналогов при сохранении той же прочности.

### Некоторые инструменты для проектировщиков

Наиболее известные инструменты для проектирования – программы Shape Generator в составе Autodesk

Inventora и Grasshoper (плагин для ПО «Rhinceros»). Инженеры и дизайнеры начинают осваивать ПО с 2D-моделей, последовательно совершенствуя мастерство. Доводят опыт до уверенного пользователя в 3D Max. Однако в этой прикладной программе с её псевдобионикой много художественных возможностей, но как удобный конструктив для разработчика она небезупречна. Аналоги или подобие моделей, косвенно напоминающих плоды генеративного дизайна, можно получить даже в программах 3D Illustrator и аналогичных.

В профессиональном ПО введён инструментальный для замены и моделирования внешних факторов, вследствие чего будет изменяться форма изделия – так дизайн сростается с программированием. Возникла новая профессия или специализации среди конструкторов корпусов РЭА.

На начальном этапе разработки корпусных элементов, впрочем, можно обойтись без обязательного программирования. Сначала моделируется деталь в соответствии с ТЗ, потом в окне программы Shape Generator указываются крепёжные отверстия и прочие элементы, которые не будут изменяться, задаются величины и направления нагрузок и воздействий, а после запускается процесс оптимизации, в результате чего программа оптимизирует разработку, фильтруя второстепенные и ненужные элементы и части конструкции, не обязательные в формировании прочностного каркаса. Программа Autodesk Inventor PRO имеет встроенный модуль генеративного дизайна Shape Generator (рис. 10). Видео, демонстрирующее эту технологию, представлено в [4, 6].

Создание конструкций на основе генеративного проектирования в большинстве случаев возможно с помощью аддитивных технологий (3D-печать). Традиционные методы производства не в состоянии реализовать проекты со сложной структурой нестандартных элементов, кото-



Рис. 12. 3D-принтер по металлу HBD-400

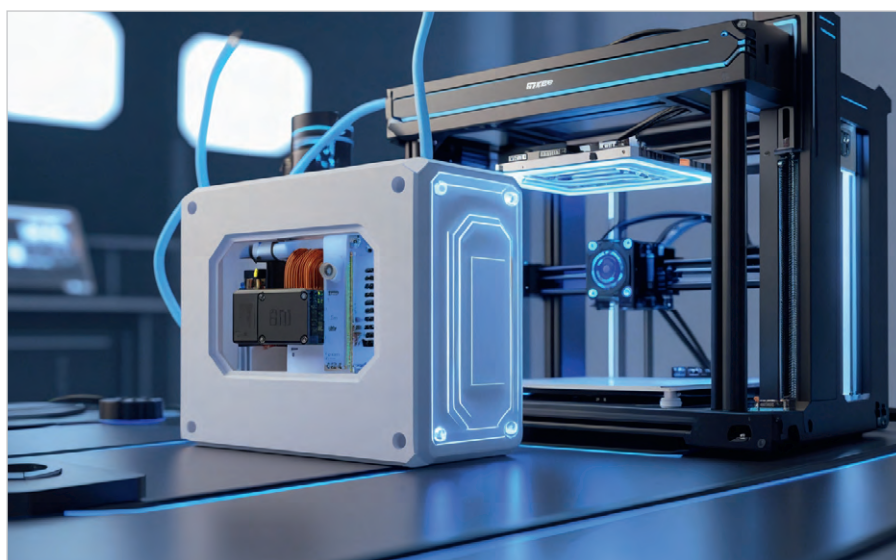


Рис. 13. 3D-принтер для пластиковых корпусов РЭА

рую предлагает бионический дизайн. А с помощью технологии 3D-печати можно изготовить элементы с любой толщиной, искривлениями, полостями, сетчатой и ячеистой структурами. Послойное построение придаёт бионическим объектам большую прочность и устойчивость к нагрузкам.

Наиболее популярными технологиями 3D-печати, применяемыми для изготовления объектов с бионическим дизайном, являются селективное лазерное плавление металлических порошков (SLM) и селективное лазерное спекание полиамидных порошков (SLS). В современных шкафах для обслуживания РЭА, в том числе релейных, также уместно задействовать процесс оптимизации формы с сохранением требуемых характеристик [1].

Об этом писали в начале XXI века как о концептуальных моделях будущего, а теперь уже несколько лет как дело дошло до предметной реализации. Первые новые корпуса для электроники и робототехники были созданы и продемонстрированы в России в 2018 году. В некоторых других странах это случилось раньше. Теперь новые корпуса и блоки создаются с помощью обозначенной природной технологии с помощью технологии 3D-печати SLM (Selective Laser Melting, или метода селективного лазерного плавления).

### Особенности технологии SLM для корпусов РЭА

Металлический порошок полностью расплавляется, превращаясь в однородную металлическую массу.

В процессе 3D-печати гранулированный стальной порошок распределяется тонким слоем (от 20 до 100 мкм) на движущейся сверху вниз платформе (она опускается вниз по вертикали), при этом печать изделия производится с использованием переносного квантового генератора когерентного света (КГКС) с двойным лазерным лучом, расплавляющим порошок слой за слоем.

В нашей стране у истоков способа обработки лазером стоял «отец» квантовой электроники и лазерных технологий Н.Г. Басов (1922–2001). 14 декабря 2025 года коллеги и специалисты отметили 103 года со дня рождения учёного. Басов вместе с А.М. Прохоровым описал принцип усиления и генерации электромагнитного излучения квантовыми системами, что позволило в 1954 году создать первый квантовый генератор (мазер) на пучке молекул аммиака, затем трёхуровневую схему с инверсией, нашедшую широкое применение в мазерах и лазерах. На рис. 11 Н.Г. Басов (слева) и А.М. Прохоров.

Эти работы (а также исследования американского исследователя Ч. Таунса) в середине XX века легли в основу нового направления в физике – квантовой электроники. А теперь они вновь востребованы современниками. Изобретателем лазера в 1960 году признан американский физик Теодор Мейман, создавший свой прибор на основе идеи, высказанной ещё в 1917 году Альбертом Эйнштейном.

Процедура обработки лазером происходит в закрытой камере с вентиляцией для удаления инертных газов. Процесс полностью компьютеризирован, управляется оператором из другого защищённого помещения с прозрачным стеклом для наблюдения.

По окончании 3D-печати модель остывает, очищается от лишнего порошка и передаётся на детальную постобработку, основной задачей которой является удаление структур поддержки наслоения.

Как и любая развивающаяся область, технология генеративного дизайна тесно связана с материаловедением и пока несовершенна.

Так, материалы для корпусов РЭА отличаются по назначению и даже размеру изделий. Особая характеристика – плотность и химический состав материала. Дюралевая сталь или тонкий металлопрофиль, из кото-



Рис. 14. Пластиковый корпус для РЭА, созданный с помощью генеративного дизайна

рого типично изготавливаются шкафы для РЭА и крепления модульного оборудования на DIN-рейки для конфигурации изделий с помощью сертифицированного 3D-принтера, к примеру V950ЧТ, отлично подходят для современных дизайнерских решений. Другой перспективный материал – сплав алюминия, магния и скандия, коррозионноустойчивый материал Scalmalloy, который по прочности не уступает титану. Он разработан специально для аддитивного производства и сочетает в себе высокую прочность и пластичность, что делает его идеальным для проектирования корпусов РЭА, использования в космических разработках и ВПК.

3D-принтер по металлу HBD-400 с камерой построения 350×400×400 мм и лазерной системой из 8 лазеров мощностью 500 Вт каждый обеспечивает задачи высокоэффективного серийного производства сложных изделий различного назначения (рис. 12). Благодаря технологии Guangchi II устройство печатает в 12,8 раз быстрее аналогичных систем с двумя лазерами. Пока это идеальное решение для массового производства расходных материалов и чистовой обработки металлоконструкций, созданных из «порошка» с помощью 3D-принтера.

3D-принтер по металлу модели HBD 400 представляет собой герметичную конструкцию с автоматизированным контролем содержания кислорода и рециркуляционной системой очистки. Устройство имеет лазерную систему – до 8 генераторов регулируемой мощностью до 1000 Вт. При этом толщина слоя (стенки) корпуса (готового изделия) составит до 120 мкм. При ширине сканирующей дорожки до 200 мкм типичная точность обеспечена на уровне 0,05–0,2 мм. В качестве



Рис. 15. Моделирование элементов конструкций шкафов с помощью ПО, «оптимизирующего» напряжённо-деформированное состояние решётчатых структур

расходных материалов используют титановые сплавы, алюминиевые сплавы, суперсплавы, нержавеющая сталь, инструментальная сталь.

Если рассматривать материалы с большей удельной плотностью, к примеру, титановые заготовки марки BT22, требуется другое производственное оборудование.

Производство корпусов для РЭА из ABS CF пластика и ABS + PETG пластика FDM-способом давно отлажено, в стране работают цеха с относительно большой производительностью. На рис. 13 представлен принтер для «печати» корпусов FDM-способом из лёгких композитных материалов. На рис. 14 показан корпус для РЭА, изготовленный FDM-способом. Сегодня встаёт вопрос о производстве корпусов для моделей РЭА с внутренним водяным охлаждением. В этом направлении работа ещё предстоит.

### Программное и сопутствующее обеспечение для бионического проектирования

Autodesk Within – специально адаптированный для 3D-печати программный комплекс для проектирования объектов с оптимизированным для облегчения веса дизайном, создания решётчатых структур, расчёта прочности. Ещё один инструмент для дизайнера корпусов РЭА – Altair OptiStruct – компьютерная технология программного комплекса Altair HyperWorks топологической оптимизации проектов и разработки сложных ячеистых и решётчатых структур для 3D-печати. OptiStruct позволяет проводить анализ напряжённо-деформированного состояния решётчатых структур, анализ на растяжение-сжатие, сдвиг, изгиб, круче-

ние, оценивать усталостные характеристики. Разработчик корпусов РЭА может определить наилучшее распределение материала и самые эффективные зоны для построения решётчатых и ячеистых структур, в том числе для уменьшения общего веса конструкции без потери её устойчивости к внешним воздействиям, а также конфигурировать мельчайшие детали корпуса: задвижки, защёлки, места оптимальной вентиляции и зоны охлаждения. Такое ПО в результате анализа разных возможностей подсказывает, где в конструкции нужен плотный материал, где ячеистый, а где можно обойтись без дополнительного усиления элементов корпуса.

На рис. 15 показано моделирование элементов конструкций шкафов с помощью ПО, оптимизирующего напряжённо-деформированные состояния решётчатых структур. На рис. 16 показана защёлка для шкафа РЭА как пример использования ПО в авторской разработке элементов релейных шкафов.

### Проблемные вопросы

При дизайнерской разработке модели учитывают усталостную прочность материала и другие факторы. Из условных минусов развития технологии можно выделить проблему остаточного напряжения металла, большого количества поверхностных и объёмных дефектов. Время изготовления конструкции под ключ с полной шлифовкой и покраской, стоимость материалов также следует учитывать в производственном процессе.

Пока в России массовое развитие технологии 3D-печати корпусов для РЭА из металла тормозится большой ценой производственного процесса. К примеру, заготовка из металла условной кубической формы размерами 150 см<sup>3</sup>

обходится почти в 450 тыс. рублей. При применении композитного пластика – в 5 раз дешевле. Однако с каждым годом усовершенствования технологии растёт профессионализм дизайнеров и конструкторов, открываются новые возможности для использования разных материалов, совершенствуются 3D-принтеры и в итоге падает себестоимость готовых изделий.

Особенное значение в развитии новой генеративной технологии имеет искусственный интеллект и связанные с ним решения. Нюансы развития бионического дизайна в том, что в 2026 г. активно применяются облачные технологии; каждый разработчик принимает решения не столько в офисе, сколько в «облаке», при этом соблюдается режим усиленной безопасности в едином корпоративном сетевом пространстве.

Так наступает новая эра для дизайнеров корпусов РЭА и появляется новая специализация, смежная с разработкой РЭА.

## Особенности новой профессии

По опросам специалистов разных отраслей ещё 5–6 лет назад было понятно их беспокойство о потере работы и доходов из-за внедрения компьютерных технологий и, в частности, качественной 3D-печати для твёрдых и устойчивых, а также антивандальных и взрывобезопасных конструкций. Один из оригинальных (кроме шаблонных и негодующих) ответов звучал так. Изменим классификацию инженеров, монтажников, сталеваров, токарей, сварщиков, переводя их на творческие профессии. Инженеры будут плести корзинки из лозы, сталевары – вязать варежки, а на токарных станках будут вытачивать матрёшки. Жестянки и маляры тоже потеряют в востребованности. Шутки шутками, а сегодня уже не спорят, что роботизированная техника с помощью 3D-технологии зачастую создаёт изделия качественнее и быстрее, хотя и применяется это пока в узкой области, где важен каждый грамм веса, в основном в аэрокосмических разработках РЭА.

Сегодня в России более 10 вузов готовят специалистов нового профиля, способных разрабатывать корпуса для РЭА с учётом дизайнерских компетенций с опорой на бионику. Новые специалисты работают в области ком-

пьютерного моделирования для создания корпусов, панелей, ручек управления, стационарных (неподвижных) конструкций – шкафов и электрощитов, шкафов для серверных и сопутствующего оборудования. Особенность новой и развивающейся профессии в том, что инструментарий для проектирования пока более понятен программистам, чем художникам. Но ни те, ни другие практически не используют 3D-принтер для «печати металлом» по технологии SLM. Поэтому с развитием перспективной технологии образовалась новая смежная специальность, раскрывающая всю мощь генеративного дизайна. В области создания нешаблонных моделей корпусов с разными гранями и «переходами» на 3D-установках печатают детали, которые физически невозможно сделать другим способом.

## Выводы

Перспективы использования бионического дизайна в России будут наиболее заметны в ближайшие годы. Оптимизация кронштейнов, шасси, корпусов для снижения веса и экономии топлива уже применяется при создании БПЛА и в аэрокосмической отрасли. В дальнейшем полученный опыт внедрения генеративного проектирования распространяется на другие конструктивные элементы, снижая их общий вес.

Поэтому разговор о преимуществах использования отечественными разработчиками РЭА бионического дизайна своевременный, а сами возможности уместно рассматривать с нескольких сторон.

Значительное снижение веса при сохранении или увеличении прочности даёт эффективность и лёгкость конечному изделию. При работе с дорогостоящими и драгоценными металлами достигается экономия материалов и средств на их закупку. Создание самовосстанавливающихся или супергидрофобных поверхностей по аналогии с природными открывает новые возможности для инновационных материалов и их композиций. Реализация уникальных форм и функций, ранее недоступных, раскрывает новые конкурентные возможности для каждого производителя. Уменьшение отходов и потребления ресурсов – ещё одна польза применения рассмотренных SLM-технологий – перспективное решение для создания



Рис. 16. Защёлка для шкафа РЭА как пример использования ПО в авторской разработке элементов релейных шкафов

сложных корпусов РЭА с каналами конформного охлаждения. По сравнению с традиционными методами изготовления форм аддитивная технология обеспечивает значительные преимущества.

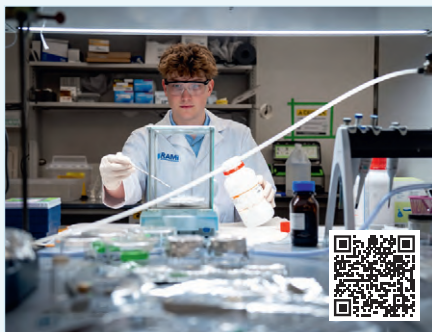
## Литература

1. Бионика – 60 лет. Итоги и перспективы. Сборник статей Первой Международной научно-практической конференции, 17–19 декабря 2021 года, г. Москва / под ред. А.П. Карпенко. М.: Ассоциация технических университетов, 2022. 258 с. URL: [https://www.researchgate.net/profile/Yury-Ryabov-3/publication/384761323\\_Bioniceskij\\_dizajn/links/6706699356f2ab4a34187b10/Bioniceskij-dizajn.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Yury-Ryabov-3/publication/384761323_Bioniceskij_dizajn/links/6706699356f2ab4a34187b10/Bioniceskij-dizajn.pdf).
2. Бионический (генеративный) дизайн. URL: <https://www.drive2.ru/b/52334032298233171/>.
3. Бионический дизайн и SLM-печать в оптимизации станочной оснастки. URL: <https://blog.iqb.ru/hbd-milling-cutter-head/>.
4. Видеодемонстрация программирования элементов конструкции корпуса. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=NWwc3Q4dgc0&t=11s>.
5. Институт дизайна РГУ имени А.Н. Косыгина, примеры разработок. URL: <http://kosygin-design.ru/bionic>.
6. Autodesk Inventor-Shape Generator Tutorial. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=pwH2rc4fwP8>.
7. 3D-прорыв в Питере: итоги «Металл-Экспо» и «Машфорума». URL: <https://blog.iqb.ru/metal-expo-mashforum-2025/>.



## Учёные разработали быстрый и экологичный способ извлечения металлов из старых аккумуляторов

Исследователи из Rice University представили новую технологию переработки литий-ионных аккумуляторов, которая позволяет быстро извлекать критически важные металлы без использования агрессивных химикатов и высоких температур. Разработка может существенно снизить нагрузку на цепочки поставок сырья для аккумуляторов и уменьшить экологический ущерб от переработки батарей.



Результаты работы опубликованы в журнале Small. Учёные предложили использовать особые водные растворы на основе аминоклоридов, способные извлекать ценные металлы из аккумуляторных отходов за считанные минуты вместо часов.

Традиционная переработка литий-ионных батарей обычно требует агрессивных кислот, высоких температур и длительных химических процессов. Несмотря на растущий спрос на литий, кобальт, никель и марганец, значительная часть этих материалов до сих пор теряется при утилизации.

Команда Rice University сосредоточилась на альтернативных водных растворах, которые могут заменить токсичные органические растворители. Наиболее эффективным оказался раствор на основе гидроксид-аммония хлорида (NH<sub>4</sub>Cl).

Первый автор исследования Саймон М. Кинг отметил, что учёных удивила скорость реакции: уже в течение первой минуты удавалось извлечь большую часть металлов. При комнатной температуре система обеспечивала около 65% извлечения ключевых элементов всего за одну минуту, а при немного более длительной обработке эффективность для некоторых металлов превышала 75%.

Профессор Пуликель Аджаян подчеркнул, что важным преимуществом технологии являются мягкие условия работы – без высоких температур и энергоёмких стадий переработки. Это делает процесс потенциально более дешёвым и масштабируемым.

Исследователи также выяснили, почему раствор NH<sub>4</sub>Cl работает столь эффективно. Помимо кислотности и присутствия хлорид-ионов, ключевую роль играет активный азотный центр в составе соединения, который участвует в окислительно-восстановительных реакциях и ускоряет растворение металлов.

По словам Сохини Бхаттачарьи, результаты показывают, что для эффективного выщелачивания важны не только pH среды или полярность растворителя, но и наличие химически активных функциональных групп, способных ускорять перенос вещества и реакцию растворения.

Дополнительным преимуществом стало использование воды вместо органических растворителей. Это снижает вязкость среды, ускоряет перемещение молекул и упрощает обращение с отходами, одновременно уменьшая экологические риски.

После извлечения металлов команда успешно продемонстрировала возможность повторного синтеза новых аккумуляторных материалов из полученного сырья, фактически замкнув цикл переработки. Исследователи считают, что предложенный подход может стать основой для следующего поколения экологичных систем рециклинга аккумуляторов на фоне стремительного роста рынка электромобилей и накопителей энергии.

## «Байкал» готовит российскую альтернативу Nvidia: совместимые с CUDA ИИ-чипы выйдут к 2030 году

Российская компания Байкал Электроникс намерена вывести на рынок линейку специализированных процессоров для искусственного интеллекта в 2029–2030 годах. Ключевой особенностью новых решений станет поддержка экосистемы NVIDIA CUDA – фактически это будут первые отечественные ИИ-чипы, способные запускать программное обеспечение, созданное для ускорителей Nvidia, без необходимости переписывания кода.

О планах разработки рассказал генеральный директор компании Андрей Евдокимов. По его словам, новая линейка будет включать два продукта: энергоэффективный процессор для периферийных устройств и дискретный серверный ускоритель для дата-центров.

Младшая модель Baikal-AI-E1000 ориентирована на edge-устройства и должна стать российским аналогом Nvidia Jetson Orin NX. Чип получит энергопотребление до 30 Вт и частоту до 2 ГГц. Как утверждают в компа-

нии, GPGPU-ядро уже реализовано на FPGA и находится в рабочем состоянии.

Второй продукт – Baikal-AI-D1000 – разрабатывается как серверный ИИ-ускоритель уровня Nvidia L40S. Заявленная производительность достигает 1000 TFLOPS при вычислениях FP8 и 500 TFLOPS при FP16, а объём видеопамати составит от 48 до 64 Гб. Предварительная стоимость решения оценивается примерно в \$10 тыс.

Поддержка CUDA рассматривается разработчиками как способ снизить зависимость российского рынка от продукции Nvidia, которая сегодня фактически доминирует в сегменте ИИ-ускорителей. Совместимость с CUDA позволит отечественным разработчикам использовать уже существующие программные инструменты и накопленный опыт работы с GPU Nvidia без адаптации программного кода под новую архитектуру.

Эксперты называют такой подход прагматичным. По мнению участников рынка, ставка на совместимость поможет избежать проблемы несовместимости экосистем и повысит шансы платформы на внедрение в корпоративном и государственном секторах. При этом аналитики отмечают, что для конкуренции на открытом рынке компании потребуется либо существенно снизить стоимость решений, либо предложить уникальное программное обеспечение, тесно связанное с новой аппаратной платформой.



В «Байкал Электроникс» рассчитывают, что к концу десятилетия смогут предложить не только отдельные чипы, но и полноценный программно-аппаратный комплекс для суверенных AI-дата-центров. Потенциальными заказчиками называют промышленность, финансовый сектор, транспорт, связь и ракетно-космическую отрасль.

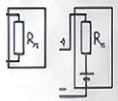
Компания была основана в 2012 году и известна сериями процессоров Baikal-T, Baikal-M и Baikal-S. До 2022 года производство российских чипов велось на мощностях тайваньской TSMC, однако после введения экспортных ограничений российские разработчики столкнулись с серьёзными трудностями в поиске контрактных производителей полупроводников.



лей гальванической  
сигнала 4...20 мА  
производства

ала и НПСИ-200-ГР2  
ис. 8).  
и группы модулей  
ий блок питания в  
орый позволяет ра-  
активными, но и с  
шкала сигнала без  
пительных блоков

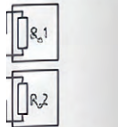
Подключение  
активных сигналов



Ток 4...20 мА

сигнала 4...20 мА  
к пассивных

Подключение  
активных сигналов



Ток 4...20 мА

покового сигнала  
активных

# ЗДЕСЬ МОГЛА БЫТЬ РЕКЛАМА КОМПАНИИ!



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



Иногда такая экономия обходится  
**дороже**, чем кажется.



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

Медиагруппа  
«СТА-ПРЕСС»

**СТА**  
СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА  
И ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ



Телефон: +7 968 567-3006



E-mail: [antipov.n@cta.ru](mailto:antipov.n@cta.ru)



Медиапортал: [cta.ru](http://cta.ru)



Специализированные конференции

# ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ 2026

Промышленная автоматизация

Цифровизация производства

Интернет вещей и большие данные

Искусственный интеллект

Информационная безопасность

Автоматизация зданий и инженерных систем

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)