

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

WWW.CTA.RU

6

2025



Электронная
версия этого
журнала

НЕЙРОМАНИЯ МИРОВОГО МАСШТАБА: лидеры гонки за чипами ИИ

В НОМЕРЕ:

НАТЯНЕМ СОВУ НА ГЛОБУС:
точная навигация без спутников

ВЕРНЫЙ РАСЧЁТ:
моделирование и проектирование
высокочастотных PCB



Специализированные конференции

ПЕРЕДОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ 2025-2026

Промышленная автоматизация

Цифровизация производства

Интернет вещей и большие данные

Искусственный интеллект

Информационная безопасность

Автоматизация зданий и инженерных систем

2025

24.09

4-я специализированная конференция

ПТА – ЧЕЛЯБИНСК

29.10

15-я специализированная конференция

ПТА – НОВОСИБИРСК

2026

11.02

21-я специализированная конференция

ПТА – ЕКАТЕРИНБУРГ

24.03

7-я специализированная конференция

ПТА – КАЗАНЬ

26–27.05

17-я специализированная конференция

ПТА – САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

22.09

5-я специализированная конференция

ПТА – УФА

27.10

16-я специализированная конференция

ПТА – НОВОСИБИРСК

www.pta-expo.ru



ЧИТАЙТЕ В КОМФОРТЕ



ПЕЧАТНАЯ ВЕРСИЯ ЖУРНАЛА «СТА»

подписка с гарантированной доставкой



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

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



Здравствуйте, уважаемые друзья!

По мере бурного развития больших языковых моделей – LLM разработчики сталкиваются с экспоненциальным ростом потребностей в вычислительных мощностях и, соответственно, ростом энергопотребления. Мировое сообщество уже бьёт тревогу: на системы ИИ уже сегодня приходится порядка 3,5% мирового энергопотребления. Тем самым они вносят весьма существенный вклад в глобальное изменение климата, а вскоре будут вносить ещё больший. О поиске решений, позволяющих новым ИИ-моделям стать более продвинутыми, но менее затратными и «прожорливыми», читайте в третьей части нашего обзора.

С помощью анализа отражённых электромагнитных волн можно исследовать материалы, выявляя дефекты, повреждения или изучая скрытую от глаз структуру. Это важно, например, для проверки состояния строительных конструкций или для изучения свойств новых композитных материалов. Наша статья описывает, как эти методы могут быть использованы в целях обработки сигналов в средствах подповерхностной радиолокации для неразрушающего контроля диэлектрических плоскостных структур.

Мы продолжаем публиковать статьи от разработчиков системы Delta Design из компании Eremex. В этом выпуске журнала читайте обзор основных возможностей анализа линий передачи и переходных отверстий в САПР SimPCB Lite, а также знакомьтесь с примером расчёта первичных и вторичных параметров дифференциальной пары высокоскоростного интерфейса USB 3.1.

Читайте в этом номере об оригинальной схемотехнике двухканального контроллера светового шнура «дюралайт», о простой системе автоматики для тепловентиляторов, о возможностях навигации без привязки к глобальным спутниковым системам, а также о многом другом.

Заходите на наш информационный портал www.cta.ru, где вас всегда ждут свежие новости со всего мира, а также последние выпуски наших журналов. Подписывайтесь на наши каналы в Телеграм, ВК, на RuTube, YouTube и на Дзене!

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

Юрий Широков, главный редактор

Журнал «Современная электроника»
Издаётся с 2004 года

Главный редактор Ю. В. Широков
Заместитель главного редактора А. В. Малыгин
Редакционная коллегия А. Е. Балакирев, В. К. Жданкин,
С. А. Сорокин, Р. Х. Хакимов
Вёрстка М. Ю. Соколов
Обложка Д. В. Юсим
Распространение Ю. А. Фенчева (shop@cta.ru)
Реклама Н. А. Антипов +7 (968) 567-30-06 (antipov.n@cta.ru)

Учредитель и издатель ООО «СТА-ПРЕСС»

Генеральный директор К. В. Седов

Адрес учредителя и издателя:

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

Почтовый адрес: 117437, г. Москва,

Профсоюзная ул., 108

Тел.: (495) 232-00-87

shop@cta.ru • www.cta.ru

Производственно-практический журнал

Выходит 9 раз в год. Тираж 10 000 экз.

Цена свободная

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

Отпечатано: ООО «МЕДИАКОЛОР».

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

Тел./факс: (499) 903-69-52

Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции.

Ответственность за содержание рекламы несут рекламодатели.

Ответственность за содержание статей несут авторы.

Материалы, переданные редакции, не рецензируются и не возвращаются.

Мнение редакции не обязательно совпадает с мнением авторов.

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

© СТА-ПРЕСС, 2025

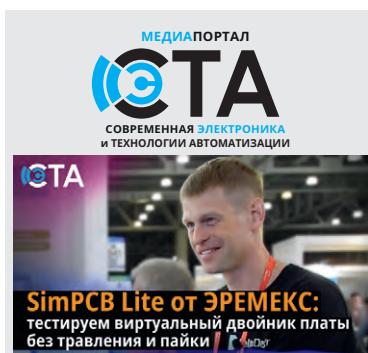
Мы в соцсетях



СОДЕРЖАНИЕ 6/2025

РЕКЛАМОДАТЕЛИ

Delta Design	4-я стр. обл.
ПТА	2-я стр. обл.
Элеконд	17
Эркон	21



Интервью с Виктором Ухиным, инженером по технической поддержке Эремекс.

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

Что умеет SimPCB Lite?

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

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

Анализ S-параметров и перекрёстных помех.

Поддержка 64+ моделей линий передач с возможностью настройки геометрии.

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

Почему это важно?

Импортозамещение Polar CI9000 с более точными расчётами.

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

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

Перспективы

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

Улучшенная поддержка и оперативные обновления.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

4 Обзор САПР SimPCB Lite для расчёта линий передачи и переходных отверстий на печатной плате

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин

10 Модель потенциального рассеяния в задаче диагностики слоистых диэлектриков

Александр Крячко

18 Расчёт волнового сопротивления на печатной плате для интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ

22 Двухканальный контроллер светового шнура типа «дюралайт»

Александр Одинец

26 Локальная автоматика для тепловентилятора

Сергей Шишкин

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

33 Современная электроника и искусственный интеллект. Часть 3. Новые процессорные модули ведущих производителей для систем искусственного интеллекта

Виктор Алексеев

48 Электронные системы геомагнитной навигации и перспективы РЭБ

Андрей Доезжаев

СТРАНИЦЫ ИСТОРИИ

55 К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Анонс статьи

Виктор Алексеев

Обзор САПР SimPCB Lite для расчёта линий передачи и переходных отверстий на печатной плате

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин

В статье рассмотрены основные возможности и маршрут анализа линий передачи и переходных отверстий в САПР SimPCB Lite. Данная программа предназначена для обеспечения целостности сигналов и снижения потерь в высокоскоростных цифровых и высокочастотных аналоговых устройствах, реализованных на печатных платах.

SimPCB Lite – система численного анализа линий передачи, виртуальная исследовательская лаборатория. В её основе лежит математический

2D-решатель, в котором реализован метод граничных элементов. С помощью данного решателя вычисляются четыре первичных параметра: ёмкость (C),

проводимость диэлектрика (G), индуктивность (L) и сопротивление (R). С и G рассчитываются через энергию электрического поля, L и R – магнитного. Все остальные параметры (волновое сопротивление, задержка, потери и т.д.) определяются на их основе.

Аналогичной зарубежной САПР с похожим методом расчёта является Si9000 (Polar). При этом SimPCB Lite в чём-то её опережает. Например, при вычисле-

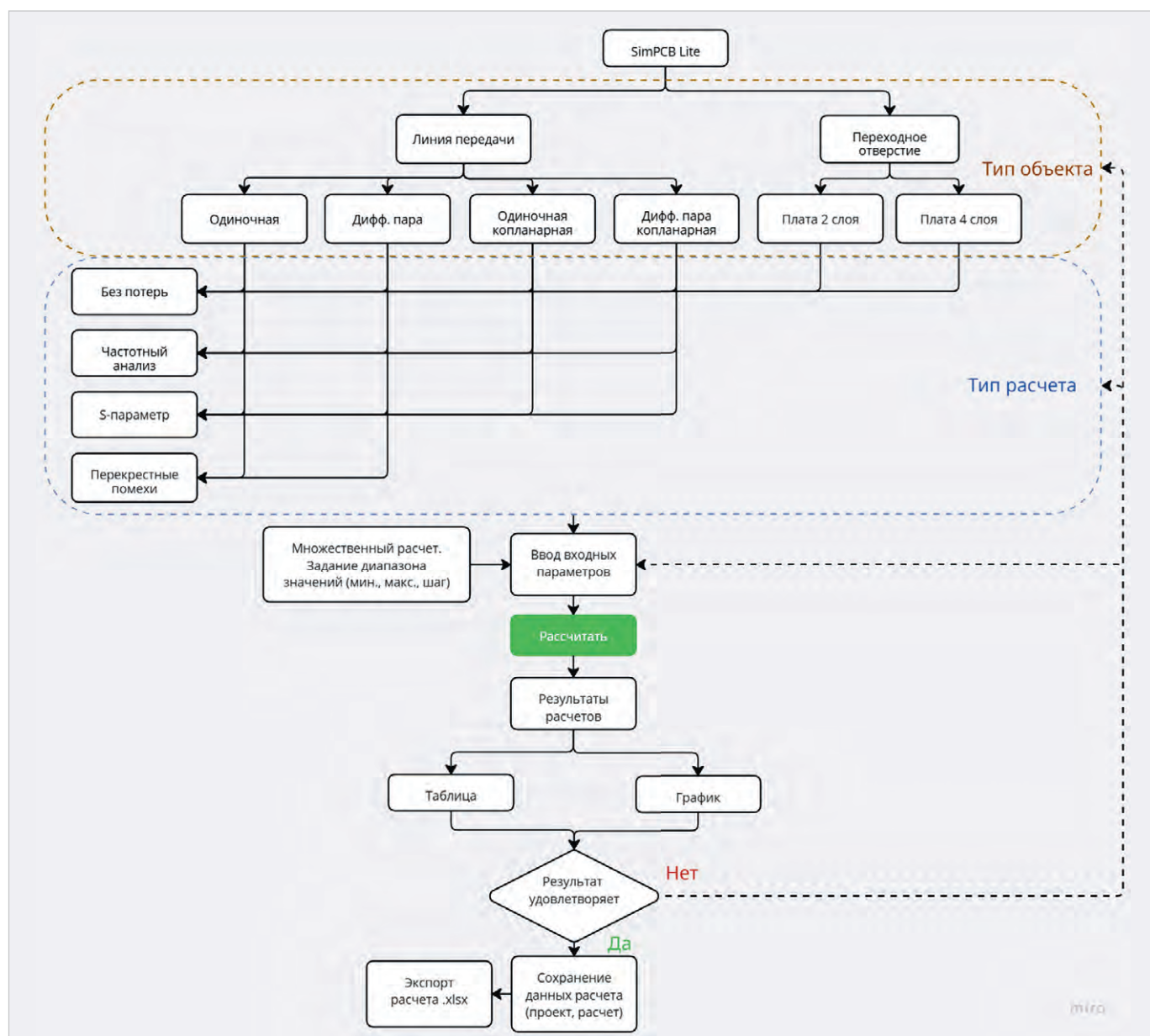


Рис. 1. Общий маршрут САПР SimPCB Lite

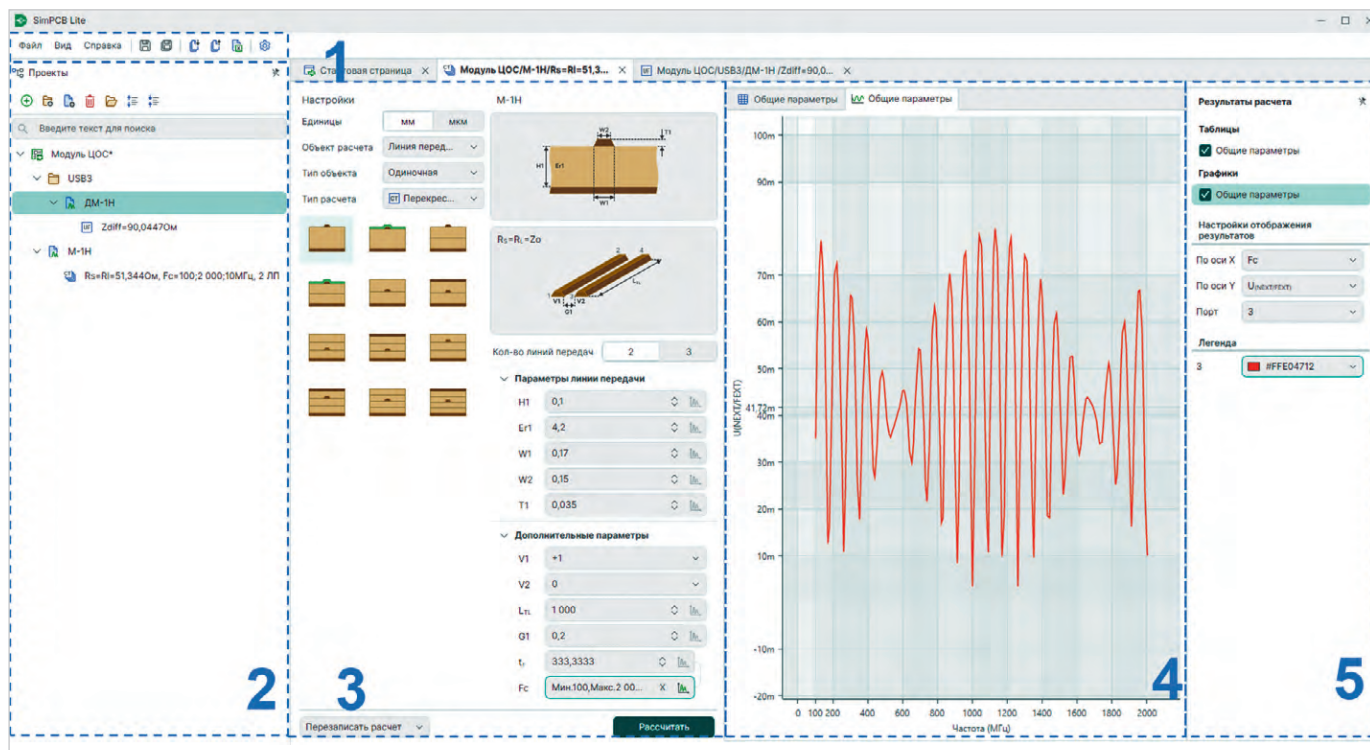


Рис. 2. Вид программы SimPCB Lite

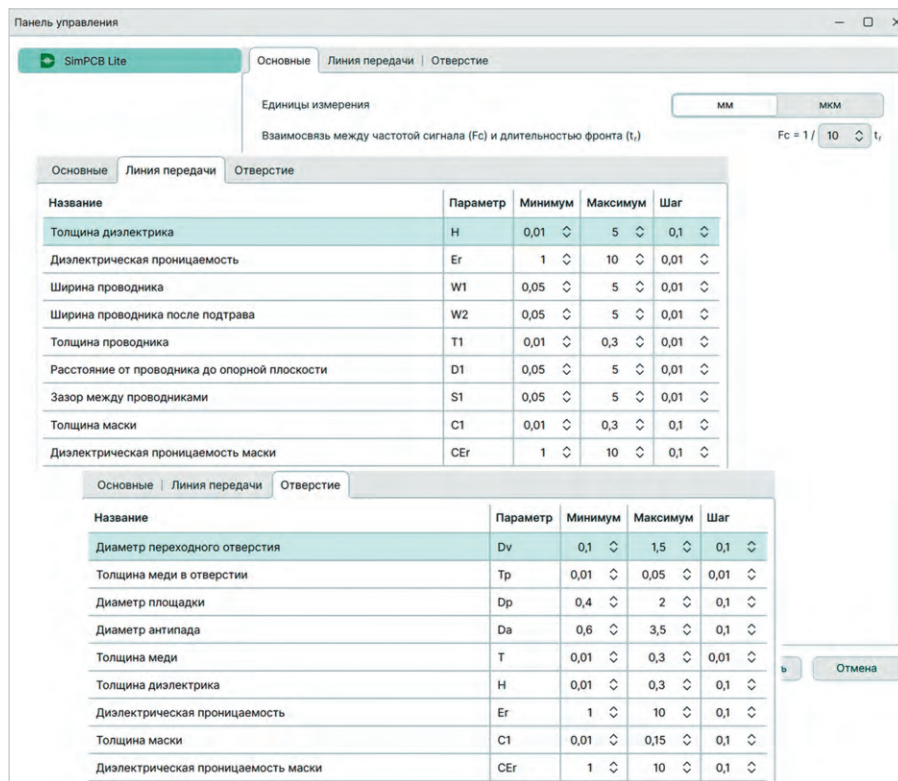


Рис. 3. Панель управления

нии параметров переходного отверстия в САПР от компании «ЭРЕМЕКС» используется его реальная модель, а в Si9000 в основе – коаксиальный кабель. Понятно, что во втором случае погрешность вычисления будет значительной [1]. Кроме этого, SimPCB Lite частично покрывает возможности ANSYS (модуль 2D Extractor) и HyperLinks (Siemens) [2].

Рекомендуемая последовательность действий для расчёта и анализа параметров линий передач (ЛП) и переходных отверстий (ПО) в САПР SimPCB Lite состоит из определённого набора шагов.

1. Выбор типа объекта, который инженер будет исследовать, вычислять его параметры.

2. Выбор типа расчёта (анализа).
3. Ввод входных параметров, геометрических и электрофизических.
4. Получение результата и его обработка.
5. Сохранение расчёта, если результат удовлетворяет заданным критериям.
6. Переход к пункту номер три, если требуемый результат не достигнут.

Схема маршрута представлена на рис. 1.

Рассмотрим более детально интерфейс программы. Он состоит из пяти основных частей (рис. 2).

1. Меню содержит разделы: «Файл», «Вид», «Справка» – для создания, открытия проектов и расчётов, сохранения изменений, отмены и повтора действий, экспорта в формат *.xlsx.

Кроме этого, из данного меню запускаются настройки проекта. В разделе «Основные» задаются единицы измерения, а также взаимосвязь между частотой сигнала (F_c) и длительностью фронта (t_f). По умолчанию используется зависимость $F_c = 1/10t_f$. В данном выражении численный множитель – редактируемый. Во вкладках «Линии передачи» и «Отверстие» устанавливается диапазон значений, в котором будет рассчитываться параметр под заданное волновое сопротивление и шаг ввода параметра в основном меню программы (рис. 3).

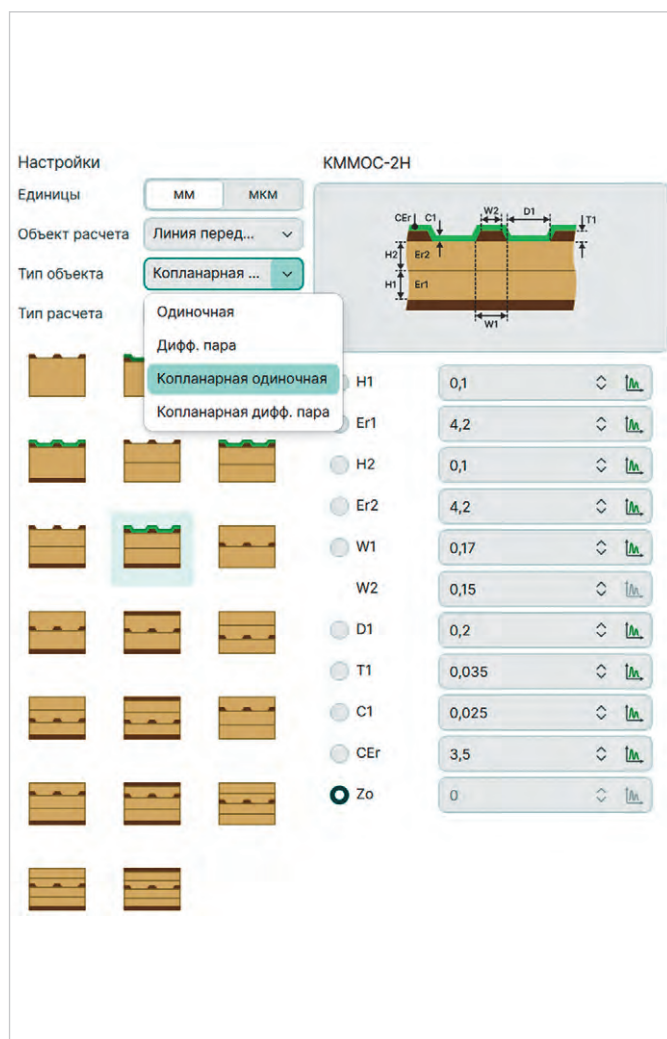


Рис. 4. Выбор модели ЛП и ввод геометрических и электрофизических параметров

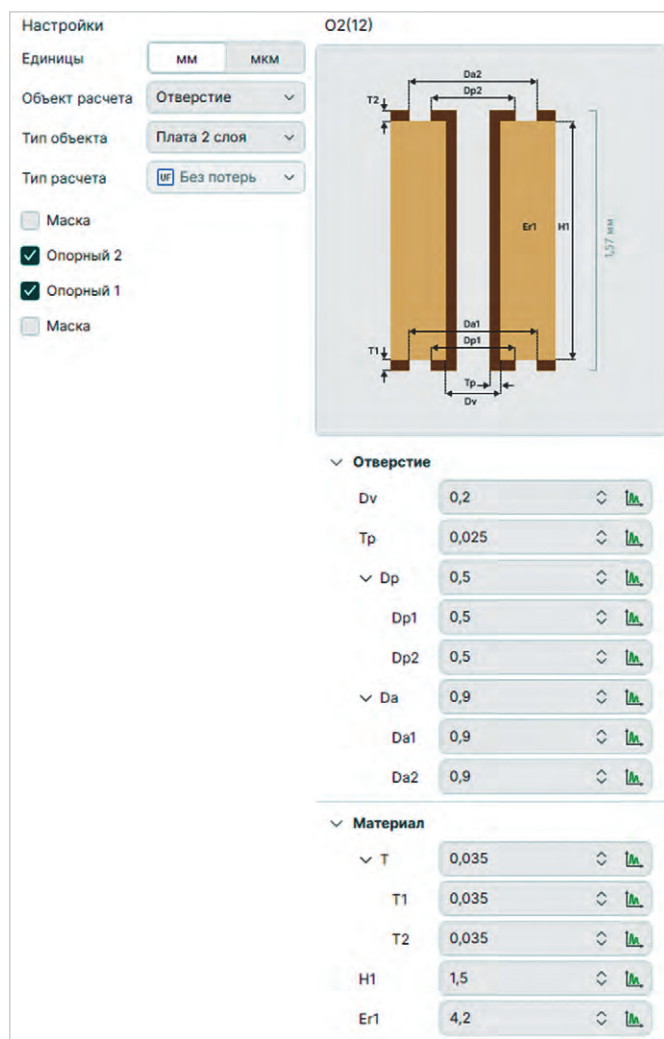


Рис. 5. Выбор модели ПО и ввод геометрических и электрофизических параметров

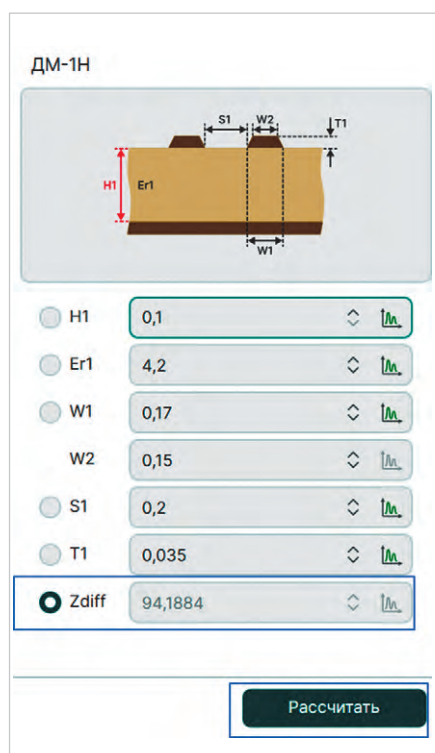


Рис. 6. Расчёт волнового сопротивления

2. Панель «Проекты». В SimPCB Lite инженер работает с проектами или проектом, в который входят модель линии передачи и расчёт. Проект может содержать любое количество моделей, а модель, в свою очередь, – произвольное количество расчётов. Здесь же доступна возможность создать группу. Группа включает в себя модели и расчёты, для которых характерен общий признак, например, вычисления под конкретный интерфейс передачи данных (USB 3.0, DDR4). Также доступны функции создания/переименования/перемещения/удаления проектов, групп и расчётов.
3. Область входных данных, которая предназначена для назначения пользователем следующего.
 - Объект расчёта. Вычисления выполняются для линий передачи (ЛП) или переходных отверстий (ПО).
 - Тип объекта. Для ЛП: одиночная, дифф. пара, копланарная одиноч-

ная, копланарная дифф. пара, ПО: 2- и 4-слойные печатные платы. В каждой группе доступны для выбора готовые модели ЛП (рис. 4) и ПО (рис. 5) [3].

- Тип расчёта. В SimPCB Lite реализовано четыре типа: без потерь, частотный анализ, S-параметры, перекрёстные помехи. Для ПО доступен только расчёт без потерь. Рекомендуется на первом шаге использовать тип расчёта без потерь. Данный тип расчёта позволит определиться с моделью ЛП и ПО под требуемое значение импеданса или погонной ёмкости, индуктивности.
- Ввод геометрических и электрофизических параметров. Набор входных данных зависит от объекта и типа расчёта (рис. 4, 5).
- 4. Область выходных данных. Результаты вычислений могут быть представлены в виде таблицы и графиков одновременно или отдельно друг от друга.

Общие параметры					
Zdiff	Trd	C	Vp	L	EEr
94,1884	5 530,5164	58,7176	1,808E+08	520,9105	2,7490

Рис. 7. Вывод результатов в табличном виде для расчёта без потерь

DM-1H

1 H1 0,091

Er1 4,2

W1 0,17

W2 0,15

S1 0,2

T1 0,035

2 Zdiff 90

3 Рассчитать

Рис. 8. Пример расчёта параметра H1

5. Настройка результатов расчёта. Указывается тип выходных данных (таблица, график, режим вычислений), а также цветное представление графиков.

Рассмотрим более детально типы расчётов, доступных в САПР SimPCB Lite.

Расчёт без учёта потерь

Расчёт предназначен для оценки волнового сопротивления, погонной ёмкости, индуктивности ЛП, а также для определения её геометрических, электрофизических параметров под конкретное значение импеданса.

Для вычисления волнового сопротивления необходимо задать толщину диэлектрика (или диэлектриков, если в модели их несколько), диэлектрическую проницаемость, ширину и толщину проводника, толщину и диэлектрическую проницаемость маски при её наличии. При этом радиокнопка должна располагаться напротив параметра **Zo** или **Zdiff** (зависит от типа объекта). После нажатия на кнопку **Рассчитать** вычисленный импеданс отобразит-

Настройки

Единицы: мм мкм

Объект расчёта: Отверстие

Тип объекта: Плата 2 слоя

Тип расчёта: Без потерь

☒ Маска

☒ Опорный 2

☒ Опорный 1

☒ Маска

O2HB(12)

Отверстие

Dv 0,2

Tr 0,025

Dp 0,5

Dp1 0,5

Dp2 0,5

Da 0,9

Da1 0,9

Da2 0,9

Материал

T 0,035

T1 0,035

T2 0,035

H1 1,5

Er1 4,2

Перезаписать расчёт

Рассчитать

Общие параметры					
Zo	Trd	C	Vp	L	EEr
37,8696	9,3159	0,2460	1,685E+08	0,3528	3,1644

Рис. 9. Пример расчёта параметров ПО

ся в поле **Zo** или **Zdiff** (рис. 6). Остальные значения (задержка, ёмкость, скорость распространения сигнала, индуктивность и эффективная диэлектрическая проницаемость) доступны в таблице (рис. 7).

При вычислении геометрического или электрофизического параметра ЛП под конкретное волновое сопротивление необходимо включить радиокнопкой параметр, задать импеданс и нажать кнопку **Рассчитать**. На рис. 8 показан пример вычисления H1 для дифференциальной микрополосковой линии с волновым сопротивлением 90 Ом.

При анализе ПО необходимо заполнить входные параметры, отредактировать структуру (исключить или добавить маску, опорный слой) и нажать кнопку **Рассчитать**. Результаты вычислений отобразятся в четвёртой области интерфейса в виде таблицы. Пример показан на рис. 9.

Кроме этого, у пользователя есть возможность проводить множественный расчёт, то есть задать входной параметр в виде диапазона с шагом. В этом случае инженеру будут доступ-

ны зависимости не только в табличной форме, но и в виде графиков (рис. 10).

Частотный анализ

Данный вид расчёта используется для более детального исследования ЛП. С его помощью вычисляются следующие параметры в зависимости от частоты:

- волновое сопротивление;
 - индуктивность;
 - активное сопротивление;
 - проводимость диэлектрика;
 - ослабление сигнала в проводнике, диэлектрике и общее ослабление;
 - фаза и скорость фазы;
 - максимальная длина проводника, если известны потери в ЛП.
- Для выполнения частотного анализа необходимо задать дополнительные параметры:
- электропроводность;
 - тангенс угла диэлектрических потерь;
 - длину ЛП;
 - частоту или фронт сигнала (рис. 11).

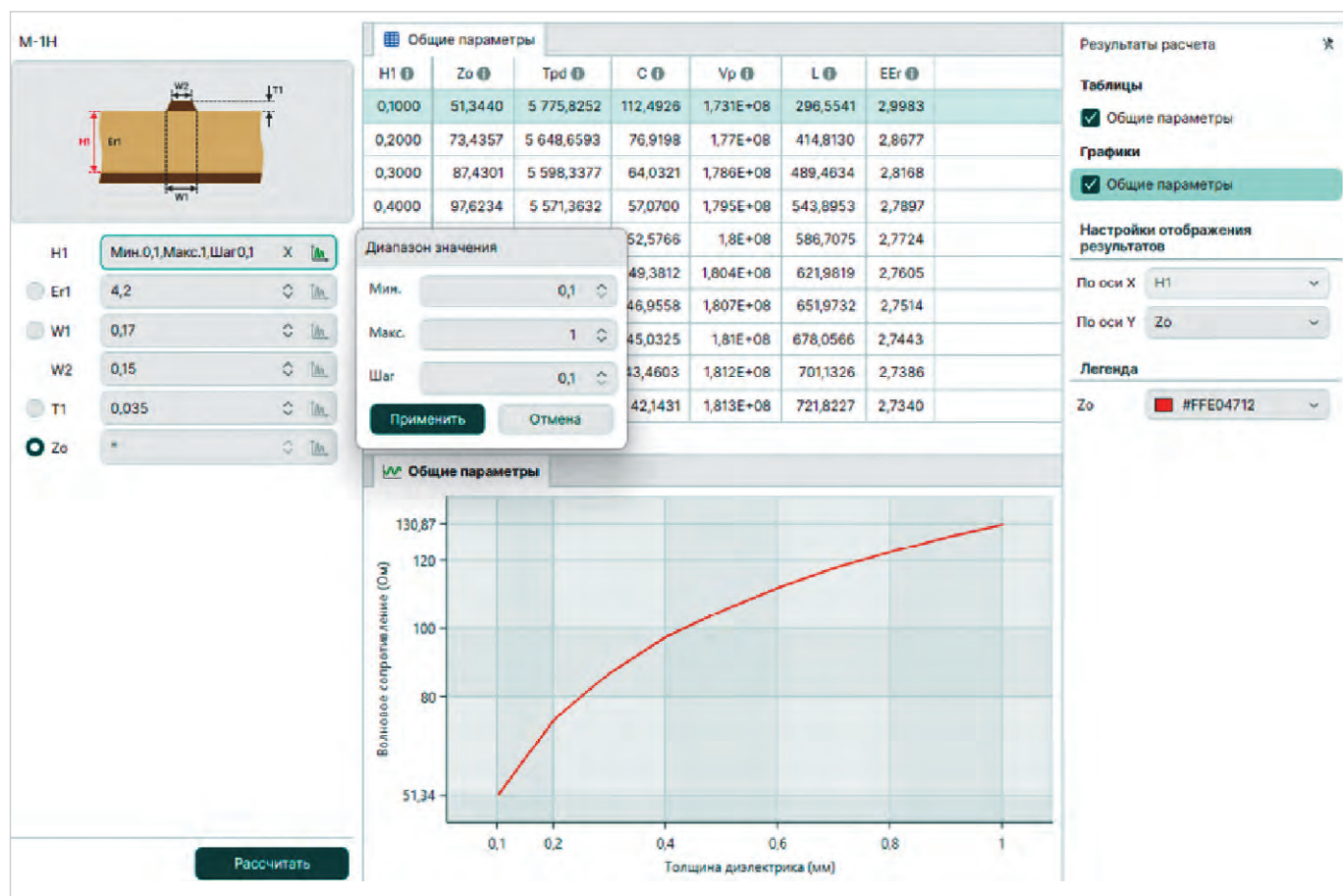


Рис. 10. Пример множественного расчёта для разной толщины диэлектрика

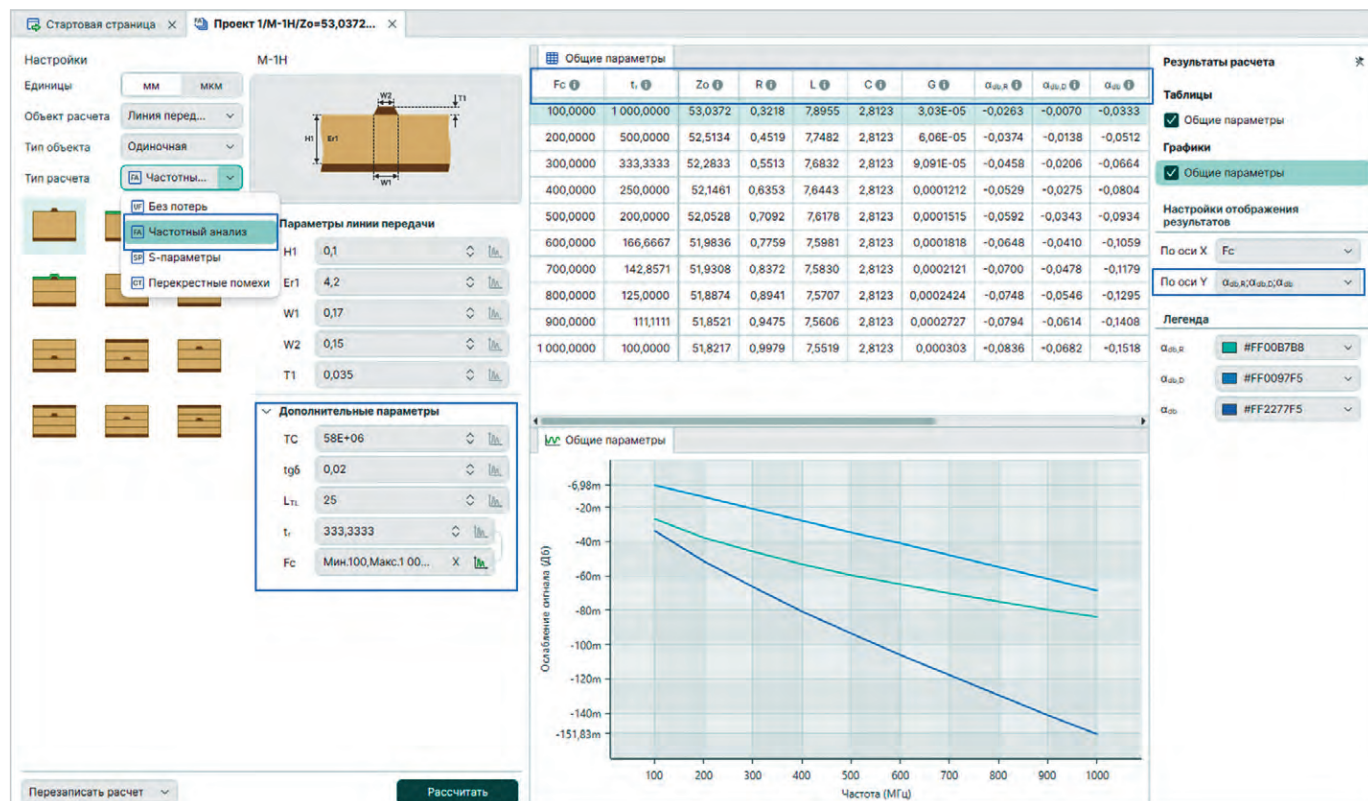


Рис. 11. Пример частотного анализа ЛП

S-параметры

S-параметры позволяют оценить энергетическую эффективность ЛП, а именно определить, на каких частотах,

например, возвратные потери будут минимальными, рассчитать потери в самой линии. Фактически S-параметры – это модель ЛП, которую

пользователь может применять для дальнейшего моделирования более сложных систем, схем, учитывая межкомпонентные связи. Специально для

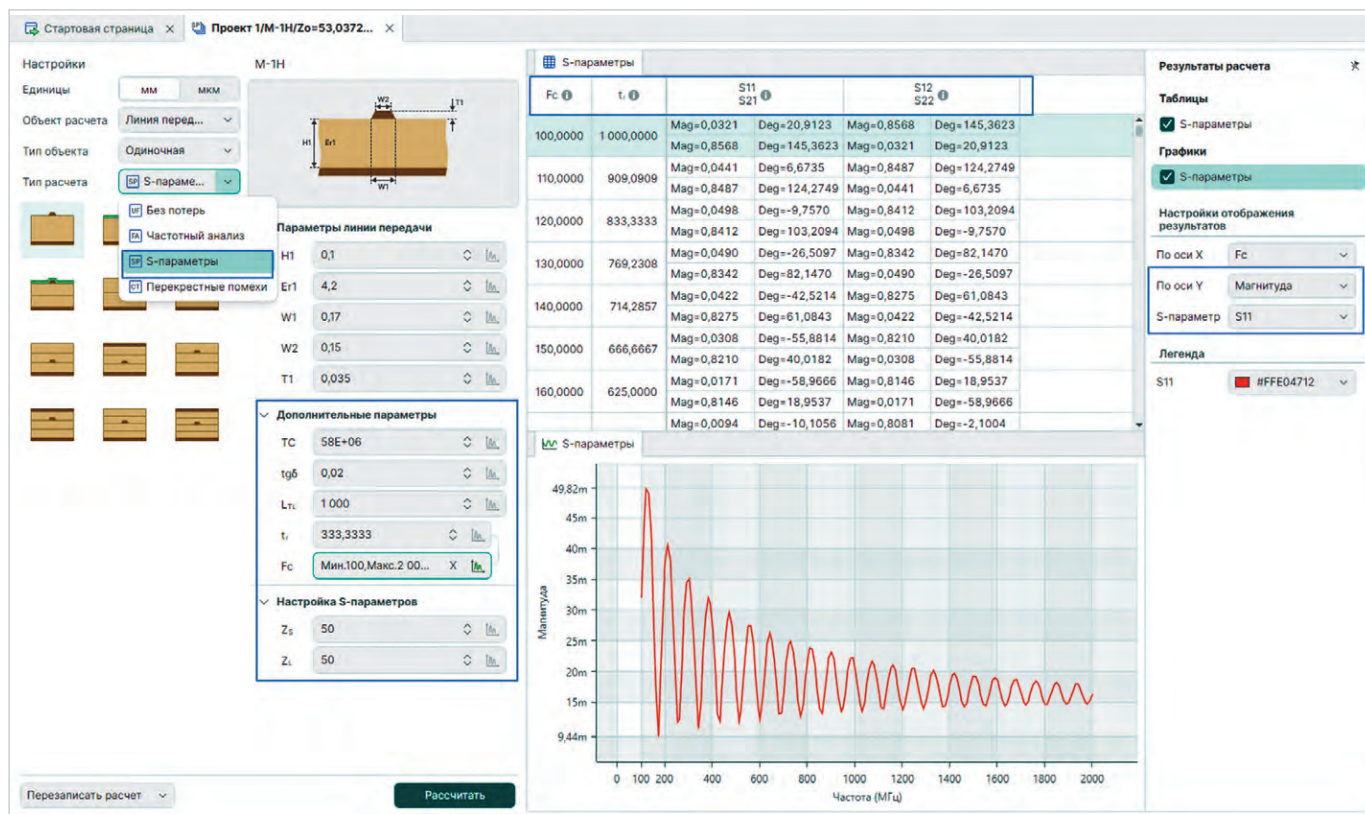


Рис. 12. Расчёт S-параметров

этого в SimPCB Lite предусмотрена возможность выводить S-коэффициенты в виде комплексного числа.

Для выполнения расчёта необходимо заполнить поля в дополнительных параметрах, а также указать импеданс источника и приёмника (Ом). Пример расчёта представлен на рис. 12.

Перекрёстные помехи

Программа SimPCB Lite позволяет вычислять перекрёстные помехи для двух или трёх одиночных линий передачи и для такого же количества дифференциальных пар в зависимости от частоты. Расчёт выполняется без учёта потерь. Это означает, что учитываются только параметры L и C. Следует отметить, что такие программы, как HyperLinks (Siemens), Si9000 (Polar), также считают перекрёстные помехи без учёта потерь. Связано это в том числе с тем, что нужно также иметь возможность рассматривать наихудший случай, когда ослабление сигнала игнорируется.

Для вычисления перекрёстных помех необходимо задать дополнительные параметры: длину проводника, напряжение на каждом проводнике, зазор между проводниками, частоту или фронт сигнала. Рассчиты-

вается напряжение и фаза на дальнем и ближнем концах ЛП (рис. 2).

Заключение

SimPCB Lite – программа, предназначенная для быстрого исследования различных моделей ЛП. Включение данной САПР в маршрут проектирования устройств на основе печатных плат позволит сократить время разработки и избежать ошибок. Преимущества SimPCB Lite от компании «ЭРЕМЕКС»:

- возможность быстро и с высокой точностью проводить расчёты без привязки к конкретной структуре печатной платы. Инженеру нет необходимости тратить время на проектирование Stackup. Достаточно просто выбрать модель ЛП и провести необходимые расчёты. В то же время инженер может собрать из моделей ЛП структуру печатной платы;
- большой выбор готовых моделей ЛП. В распоряжении специалиста более сотни линий, если учитывать возможность переворачивать сигнальный проводник. Такое количество покрывает значительную потребность современного инженера;
- точный расчёт параметров ПО и ЛП с помощью современных численных методов;

- наличие различных типов расчётов: без потерь, частотный анализ, S-параметры, перекрёстные помехи;
- возможность представлять рассчитанные данные в различных вариантах: таблица, графики;
- выгрузка результатов расчёта в файл формата *.xlsx;
- возможность использовать S-параметры в качестве моделей ЛП для дальнейшего анализа более сложных систем.

Литература

1. Ухин В.А., Кухарук В.С., Коломенский Д.С., Смирнова О.В. Оценка влияния и учёт параметров переходного отверстия на передачу высокочастотного сигнала // Современная электроника. 2023. № 9. С. 37–39.
2. Ухин В.А., Кухарук В.С., Коломенский Д.С., Смирнова О.В. Методы расчёта волнового сопротивления линий передач на печатных платах // Современная электроника. 2023. № 9. С. 40.
3. Кухарук В.С., Коломенский Д.С., Ухин В.А., Смирнова О.В. Обзор основных возможностей инструмента SimPCB для расчёта параметров линий передач в программе Delta Design // Современная электроника. 2024. № 5. С. 34–36.

Модель потенциального рассеяния в задаче диагностики слоистых диэлектриков

Александр Крячко

Для решения ряда практических задач, связанных с идентификацией дефектов и повреждений в материалах, установлением состояния конструкций, выявлением неоднородностей в оптически непроницаемых средах и визуализацией их структуры, необходимо обрабатывать информацию, полученную дистанционно, что предусматривает оценку материальных параметров объектов исследования и установление их пространственного распределения. В отличие от математической теории обратных задач рассеяния, которая направлена главным образом на доказательство теорем о существовании и единственности решения, важное прикладное значение имеет разработка вычислительных процедур, которые позволят найти параметры рассеивателей при реальных условиях проведения измерений. Целью статьи является повышение эффективности средств оценивания параметров неоднородных сред по известному распределению рассеянного электромагнитного поля путём решения обратных задач рассеяния. Рассмотрен метод решения обратной задачи рассеяния по коэффициенту отражения для многослойных структур без потерь, высокая точность которого достигается за счёт конечного количества коэффициентов решений Йоста, что позволило избежать вычислений коэффициентов безграничных тригонометрических последовательностей в элементах матрицы рассеяния. Полученные результаты позволили осуществить оценку количества слоёв диэлектрической структуры, установить диэлектрическую проницаемость и ширину каждого слоя по значениям комплексного коэффициента отражения, который известен по результатам измерений на дискретном множестве частот в ограниченном диапазоне. Это дало возможность анализировать диэлектрические материалы неразрушающим методом и идентифицировать расслоение и отклонения параметров слоёв от технологически заданных значений. Разработан метод определения распределения диэлектрической проницаемости вдоль поперечной координаты в диэлектрических плоскостройных структурах, и развитые алгоритмы идентификации поверхностей раздела по коэффициенту отражения нормально падающей плоской волны использованы как процедуры обработки сигналов в средствах подповерхностной радиолокации, что позволило избежать ложного обнаружения неоднородностей при анализе структуры сред.

Введение

Высокая эффективность современных средств неразрушающего контроля и дистанционного зондирования в основном достигается за счёт внедрения надлежащей обработки результатов измерений. При диагностике неоднородных сред используют свойства рассеяния упругих и электромагнитных волн, а обработку измеренных значений напряжённости рассеянного поля осуществляют на основе решения соответствующей обратной

задачи относительно параметров среды. В случае плоских слоистых сред для решения таких задач используют одномерную модель. В теории обратных задач разработаны методы [1–5], для которых исходными данными являются комплекснозначная зависимость коэффициента отражения от частоты или импульсная характеристика, определяемая преобразованием Фурье комплексной функции коэффициента отражения. Измерение комплексных значений пара-

метров электромагнитного поля и, в частности, коэффициента отражения [6, 7] в широком частотном диапазоне является довольно сложной задачей. В то же время точное векторное представление параметров в комплексной плоскости является одной из предпосылок корректной формулировки обратных задач. В измерительных средствах используют мостовые [8] и гетеродинные [9] схемы сравнения значений напряжённости поля в точке измерения с полем от эталонного источника гармонических колебаний. По фазовым и амплитудным различиям определяют измерительную комплексную величину. Создание средств высокочастотных широкополосных измерений является очень затратным. Они требуют прецизионной калибровки и контроля параметров в течение эксплуатации, что существенно ограничивает сферу применения таких приборов. Поэтому для устройств неразрушающего контроля, выпускаемых серийно, более пригодными являются методики высокочастотных широкополосных измерений, не требующие определения комплекснозначных параметров. Это требует развития нового направления исследований, целью которого является решение обратной задачи при частично известных исходных данных. Одним из возможных вариантов является формулировка задачи, когда за исходные данные берут абсолютные значения измеренных параметров, в отличие от их комплексных аналогов в традиционной формулировке. При этом необходимо доказать однозначность решения и сформировать процедуру его получения.

Отметим, что изображение измеренных данных аналитической функцией позволяет установить фазу этой функции по её модулю [10]. В работе [11] показано, что коэффициент прохождения волн является достаточным информативным параметром для решения обратной задачи при определённых граничных условиях, которым

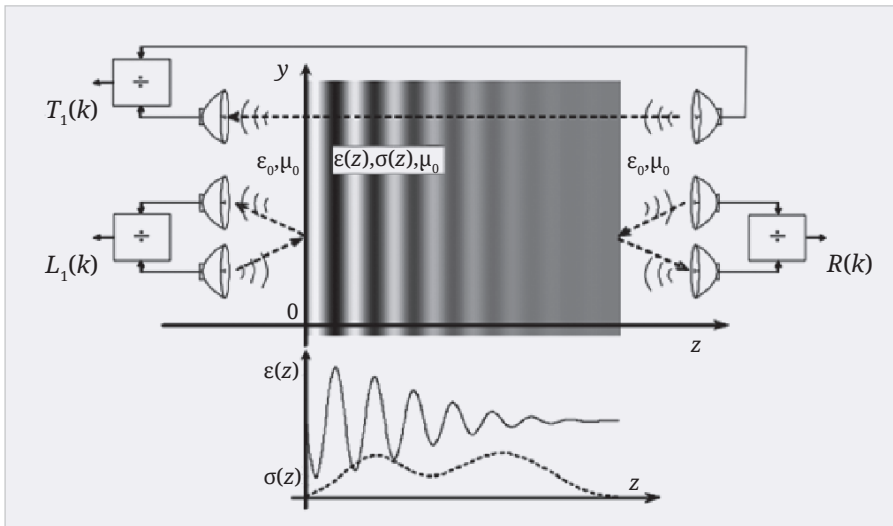


Рис. 1. К вычислению S -матрицы плоско-неоднородной среды, где ε_0 и μ_0 – диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства; ω – частота колебаний, определяющая волновой коэффициент $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ в свободном пространстве

удовлетворяет волна на границе раздела. Известен метод решения такой задачи для слоистой упругой среды, функция искомых параметров которой является кусочно-постоянной и имеет разрывы на регулярной сетке [12]. В работе [13] обоснована однозначность решения гиперболической задачи о распространении упругих волн в средах с непрерывным изменением параметров. С учётом обеспечения определённых характеристик возбуждения такой упругой среды описаны методы решения обратной задачи, когда исходными данными является зависимость амплитуды пройденной волны от времени распространения [14].

Целью статьи является анализ обратных задач рассеяния монохроматических волн для построения процедуры оценивания параметров плоского слоистого диэлектрика по известным абсолютным значениям коэффициента отражения или коэффициента прохождения.

Решение обратной задачи рассеяния по модулю коэффициента отражения плоской волны

Исходя из того, что асимптотический характер решений уравнений, которые моделируют квантово-механические [15] и электродинамические процессы [16], в некоторых случаях совпадает, можно предположить, что между коэффициентами этих волновых уравнений существует определённая зависимость. Известно, что при опре-

делённых условиях электродинамическую обратную задачу рассеяния можно привести к одномерной. Для этого к системе уравнений электромагнитного поля для плоской волны, которая распространяется над осесимметричной слоистой структурой, применяют метод разделения переменных.

Рассмотрим нормальное падение плоской электромагнитной волны на поверхность плоской осесимметричной структуры (рис. 1). Воспользуемся предположением о том, что плоскослоистая среда не имеет разрывов в функциях относительной диэлектрической проницаемости $\varepsilon(z)$ и проводимости $\sigma(z)$, а также является немагнитной с относительной магнитной проницаемостью $\mu = 1$. Функции диэлектрической проницаемости $(\varepsilon(z) - 1)$ и проводимости $\sigma(z)$ имеют также компактный носитель в правом полупространстве $z > 0$. В этом случае уравнение электромагнитного поля для электрической $E(z)$ и магнитной $H(z)$ составляющей напряжённости можно записать как:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E(z) \\ H(z) \end{bmatrix} &= \\ &= -i\omega \begin{bmatrix} 0 & \mu_0 \\ \frac{\varepsilon_0 \varepsilon(z) - i\sigma(z)}{\omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E(z) \\ H(z) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

Асимптотическое решение уравнения (1) можно записать через правосторонний $R(k_0)$ и левосторонний $L(k_0)$ коэффициенты отражения, а также коэффициенты пропускания $T_1(k_0)$ и $T_2(k_0)$:

$$E_r(z, k_0) = L(k_0) \exp(-ik_0 z) + \exp(ik_0 z) + o(1), \quad z \rightarrow -\infty; \quad (2)$$

$$E_r(z, k_0) = R(k_0) \exp(ik_0 z) + \exp(-ik_0 z) + o(1), \quad z \rightarrow \infty; \quad (3)$$

$$E_r(z, k_0) = T_1(k_0) \exp(ik_0 z) + o(1), \quad z \rightarrow \infty; \quad (4)$$

$$E_l(z, k_0) = T_2(k_0) \exp(ik_0 z) + o(1), \quad z \rightarrow -\infty. \quad (5)$$

Коэффициенты отражения и пропускания являются элементами матрицы рассеяния:

$$S = \begin{bmatrix} R & T_2 \\ T_1 & L \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Поскольку эти коэффициенты можно измерить экспериментально, и они при определённых условиях позволяют полностью охарактеризовать неизвестную плоскослоистую среду, их принято считать исходными данными для обратной задачи рассеяния.

В обратной задаче рассеяния диэлектрическая проницаемость ε_j , толщина d_j слоёв $j = 1, N$ и число N являются неизвестными величинами. В данном случае обратная задача рассеяния сформулирована как задача определения действительных параметров ε_j, d_j, N по абсолютным значениям коэффициента отражения $|L(\omega)|$ в предположении, что в материалах слоистой структуры отсутствуют потери.

Зафиксировав граничные условия на бесконечности для заданных элементов матрицы рассеяния (6), электродинамические процессы, описываемые уравнениями Максвелла, в одномерном случае можно также описать моделями потенциального рассеяния, такими как стационарное уравнение Шрёдингера (7):

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} + (k^2 - W(x, k)) \phi = 0 \quad (7)$$

и уравнение Дирака (8) с несимметричным потенциалом [124]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} - ik_0 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} iq_3 & q^+ \\ q^- & -iq_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (8)$$

В выражении (7) функция ϕ имеет смысл волновой функции, а $W(x, k)$ – энергонезависимого потенциала, причём

$$W(x, k) = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon(x)}} \frac{d}{dx} \left(\frac{d\sqrt{\varepsilon(x)}}{dx} \right) + ik_0 \frac{\sigma(x)}{\varepsilon(x)}.$$

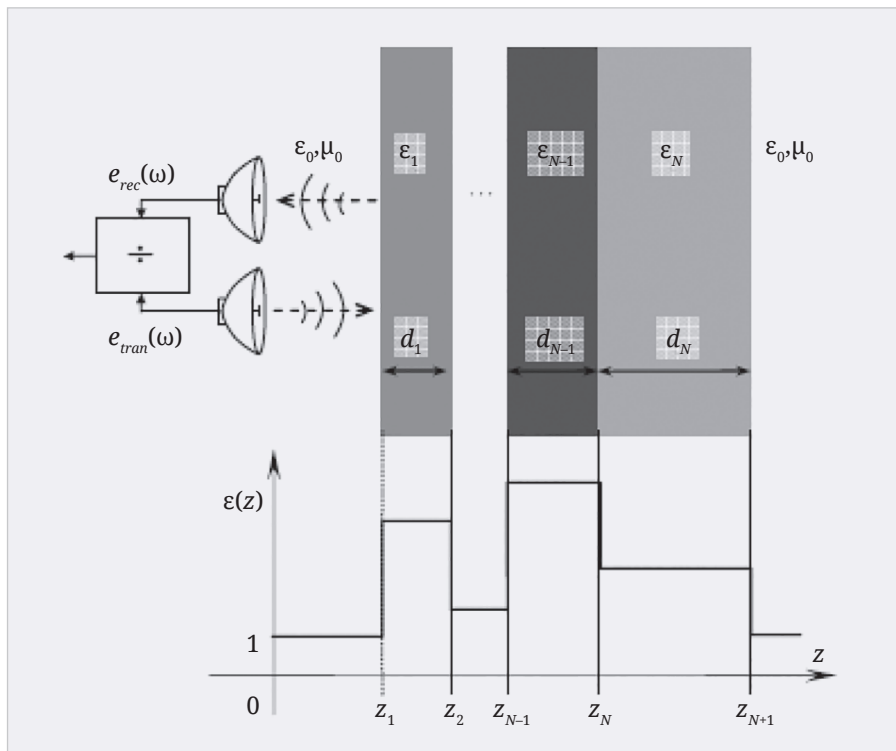


Рис. 2. Измерение коэффициента отражения от многослойной структуры

Переменные

$$V_1 = \sqrt[4]{\frac{\rho_0}{\epsilon(x)}} H(x) - \sqrt[4]{\frac{\epsilon(x)}{\rho_0^3}} E(x),$$

$$V_2 = \sqrt[4]{\frac{\rho_0}{\epsilon(x)}} H(x) + \sqrt[4]{\frac{\epsilon(x)}{\rho_0^3}} E(x)$$

позволяют осуществить переход от уравнений Максвелла к уравнениям Дирака или уравнениям Захарова-Шабата (8). Потенциалами в этих уравнениях выступают

$$q_3 = -\frac{i}{2} \frac{\sigma(x)}{\epsilon(x)} \rho_0,$$

$$q^\pm = -\frac{1}{4} \frac{d \ln \epsilon(x)}{dx} \rho_0 \mp \frac{1}{2} \frac{\sigma(x)}{\epsilon(x)} \rho_0,$$

а $\sigma(x)$ – проводимость, $\rho_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ –

характеристический импеданс свободного пространства.

Исследование одномерных обратных задач рассеяния ассоциируют с граничными условиями на бесконечности, которые позволяют описать матрицу рассеяния (6). Такие граничные условия, как правило, имеют физическую интерпретацию, поскольку отражённая волна имеет комплексную амплитуду, соответствующую коэффициенту отражения, а прошедшая сквозь среду волна имеет амплитуду коэффициента прохождения.

В частном случае среды без потерь рассеяние плоской электромагнитной волны можно смоделировать уравне-

нием Шрёдингера (7) с энергонезависимым потенциалом

$$W(x, k)|_{\sigma=0} = U(x) \equiv V(x):$$

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} + (k^2 - V(x, k)) \phi = 0. \quad (9)$$

Потенциал $V(x)$ такого уравнения можно выразить через функцию диэлектрической проницаемости:

$$V(x) = \frac{d^2}{dx^2} \ln \left[\sqrt[4]{\epsilon(x)} \right] + \left(\frac{d}{dx} \ln \left[\sqrt[4]{\epsilon(x)} \right] \right)^2. \quad (10)$$

При условии, что слагаемые энергонезависимого потенциала $W(x, k)$ стремятся к нулю на бесконечности, асимптоты решений уравнения Шрёдингера будут соответствовать асимптотике решений системы уравнений Максвелла для составляющих электромагнитного поля. Соответственно, элементы матрицы рассеяния (6) могут служить исходными данными как для обратной задачи рассеяния для уравнения Шрёдингера, так и для обратной задачи для уравнений Максвелла. Рассмотрим уравнение Шрёдингера (9), энергонезависимый потенциал которого удовлетворяет условию

$$V(x) \in L^1_2(\mathbb{R}) =$$

$$= \left\{ V(x) : \int_{-\infty}^{\infty} (1 + |x|^2) V(x) < \infty \right\}.$$

Тогда решениями Йоста такого уравнения называют функции f_1 и f_2 , кото-

рые на бесконечности удовлетворяют условиям:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} f_1(x, k) \exp(-ikx) = 1, \quad (11)$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f_2(x, k) \exp(ikx) = 1.$$

С помощью метода вариации постоянной можно показать, что в противоположных направлениях на бесконечности решения Йоста имеют асимптотику, которая определяется выражениями

$$f_1(x, k) =$$

$$\begin{cases} \exp(-ikx) + o(1), x \rightarrow \infty \\ A_1(k) \exp(ikx) + \\ + B_1(k) \exp(-ikx) + o(1), x \rightarrow -\infty \end{cases}; \quad (12)$$

$$f_2(x, k) =$$

$$\begin{cases} B_2(k) \exp(ikx) + \\ + A_2(k) \exp(-ikx) + o(1), x \rightarrow \infty \\ \exp(-ikx) + o(1), x \rightarrow -\infty \end{cases}, \quad (13)$$

где $A_1(k)$, $A_2(k)$, $B_1(k)$, $B_2(k)$ – коэффициенты решений Йоста, или элементы матрицы передачи.

Из теории обратных задач для потенциального рассеяния известно, что решения Йоста имеют особые аналитические свойства. Эти аналитические свойства играют ключевую роль в решении обратной задачи рассеяния. Приведение исходных данных обратной задачи к моделям в виде решений Йоста даёт возможность корректно решать обратные задачи рассеяния для случаев, где присутствует контрастное изменение параметров сред в окрестности поверхностей раздела.

Свойства решений Йоста для плоско-слоистых сред

Для определения основных свойств элементов матрицы рассеяния и решений Йоста рассмотрим задачу рассеяния плоской волны, нормально падающей на плоскую слоистую диэлектрическую структуру. В этом случае напряжённость поля $e(z)$ в произвольной точке z можно определить из волнового уравнения:

$$\frac{d^2 e(z)}{dz^2} + \omega^2 \mu_0 \epsilon_0 \epsilon(z) e(z) = 0. \quad (14)$$

Будем рассматривать многослойные диэлектрические структуры, в которых функция диэлектрической проницаемости $\epsilon(z)$ является кусочно-постоянной, а магнитная проницаемость

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_0(\omega) \\ b_0(\omega) \end{bmatrix} &= \prod_{j=0}^N \left(\frac{1}{2\rho_{j+1}} \begin{bmatrix} (\rho_{j+1} + \rho_j) e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} & (\rho_{j+1} - \rho_j) e^{ik_{j+1}d_{j+1}} \\ (\rho_{j+1} - \rho_j) e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} & (\rho_{j+1} + \rho_j) e^{ik_{j+1}d_{j+1}} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} a_{N+1}(\omega) \\ b_{N+1}(\omega) \end{bmatrix} = \\ &= \frac{1}{2\rho_1} \begin{bmatrix} (\rho_1 + \rho_0) e^{-ik_1d_1} & (\rho_1 - \rho_0) e^{ik_1d_1} \\ (\rho_1 - \rho_0) e^{-ik_1d_1} & (\rho_1 + \rho_0) e^{ik_1d_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0(\omega) & B_0(\omega) \\ B_0(-\omega) & A_0(-\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{N+1}(\omega) \\ b_{N+1}(\omega) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} A_0(\omega) & B_0(\omega) \\ B_0(-\omega) & A_0(-\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{N+1}(\omega) \\ b_{N+1}(\omega) \end{bmatrix} \quad (17) \end{aligned}$$

$\mu = 1$. При этом считаем, что рассеянное на такой структуре поле, множество значений которого будет составлять исходные данные для обратной задачи, измеряется в свободном пространстве (рис. 2) с волновым числом $k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$.

Для слоистой структуры с однородными электрическими параметрами материала решение уравнения (14) имеет вид:

$$e(z) = a_j(\omega) \exp(-ik_j(z - d_j)) + b_j(\omega) \exp(ik_j(z - d_j)), \quad (15)$$

где $a_j(\omega)$ и $b_j(\omega)$ – коэффициенты, определяющие соотношение между волнами, которые распространяются в противоположных направлениях; $k_j = \omega \sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$ – волновое число в j -м слое с диэлектрической проницаемостью ε_j ; $j = 0, (N-1)$ – номер слоя в структуре из N таких полос.

Удовлетворяя граничные условия на поверхности раздела между j -м и $(j+1)$ -м слоями, взаимосвязь коэффициентов $a_j(\omega)$ и $b_j(\omega)$ можно определить зависимостью:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} a_j(\omega) \\ b_j(\omega) \end{bmatrix} &= \frac{1}{2\rho_{j+1}} \begin{bmatrix} (\rho_{j+1} + \rho_j) e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} & (\rho_{j+1} - \rho_j) e^{ik_{j+1}d_{j+1}} \\ (\rho_{j+1} - \rho_j) e^{-ik_{j+1}d_{j+1}} & (\rho_{j+1} + \rho_j) e^{ik_{j+1}d_{j+1}} \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} a_{j+1}(\omega) \\ b_{j+1}(\omega) \end{bmatrix}, \quad (16) \end{aligned}$$

где $\rho_j = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon_j}}$ – характеристический импеданс; d_j – толщина j -го слоя.

Рекуррентное перемножение согласно формуле (16) даёт возможность установить такую взаимосвязь для коэффициентов в материалах $j=0$ и $j=N+1$, которые окружают многослойную структуру (17), где $A_0(\omega)$ и $B_0(\omega)$ – коэффициенты решений Йоста

всей структуры; $A_j(\omega)$ и $B_j(\omega)$ – коэффициенты решений Йоста этой структуры без учёта влияния её первых j слоёв. При этом принято $d_N = 0$.

Коэффициенты решений Йоста $A_0(\omega)$ и $B_0(\omega)$ всей структуры можно охарактеризовать соотношением между амплитудами волн, распространяющихся в противоположных направлениях при условии отсутствия падающей волны с одной из сторон.

Например, при зондировании структуры с левой стороны (рис. 2) отсутствующей будет волна в правом полупространстве, распространяющаяся в направлении на структуру $b_{N+1}(\omega) = 0$. Отсюда равенство (17) приобретает вид:

$$\begin{bmatrix} a_0(\omega) \\ b_0(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0(\omega) a_{N+1}(\omega) \\ B_0(-\omega) b_{N+1}(\omega) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

На основе формулы (18) определим коэффициент пропускания и левосторонний коэффициент отражения:

$$T(\omega) = \frac{a_{N+1}(\omega)}{a_0(\omega)} = \frac{1}{A_0(\omega)}; \quad (19)$$

$$L(\omega) = \frac{b_0(\omega)}{a_0(\omega)} = \frac{B_0(-\omega)}{A_0(\omega)}. \quad (20)$$

В противоположном случае, когда зондирование многослойной структуры осуществляется только с правой стороны, будем иметь $a_0(\omega) = 0$. Тогда соотношение (17) можно привести к виду

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A_0(\omega) & B_0(\omega) \\ B_0(-\omega) & A_0(-\omega) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_0(\omega) \\ b_0(\omega) \end{bmatrix} &= \\ &= \begin{bmatrix} A_0(-\omega) & -B_0(\omega) \\ -B_0(-\omega) & A_0(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0(\omega) \\ b_0(\omega) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} a_{N+1}(\omega) \\ b_{N+1}(\omega) \end{bmatrix}, \quad (21) \end{aligned}$$

следовательно,

$$\begin{bmatrix} -B_0(\omega) b_0(\omega) \\ A_0(\omega) b_0(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{N+1}(\omega) \\ b_{N+1}(\omega) \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Тогда коэффициент пропускания и правосторонний коэффициент отражения можно определить формулами

$$T(\omega) = \frac{b_0(\omega)}{b_{N+1}(\omega)} = \frac{1}{A_0(\omega)}; \quad (23)$$

$$R(\omega) = \frac{a_{N+1}(\omega)}{b_{N+1}(\omega)} = -\frac{B_0(\omega)}{A_0(\omega)}. \quad (24)$$

Коэффициент пропускания $T(\omega)$, который для материалов слоёв без потерь не зависит от направления падения волны: $T(\omega) = T_1(\omega) = T_2(\omega)$, и коэффициенты отражения $R(\omega)$ $L(\omega)$ являются элементами матрицы рассеяния диэлектрической структуры. Из полученных формул (19), (20), (23) и (24) видно, что все элементы матрицы рассеяния удовлетворяют условию симметрии. Следствием выполнения условий симметрии является то, что преобразование Фурье от коэффициентов отражения и пропускания являются действительными функциями.

Произведение матриц в выражении (17) свидетельствует, что коэффициенты решений Йоста $A_j(\omega)$ и $B_j(\omega)$ для $j=0, N-1$ являются конечными суммами комплексных экспонент

$$A_j(\omega) = \sum_{p=1}^{M_j} \alpha_j(p) \exp(iv_j(p)\omega); \quad (25)$$

$$B_j(\omega) = \sum_{p=1}^{M_j} \beta_j(p) \exp(iv_j(p)\omega), \quad (26)$$

где $\alpha_j(p)$ и $\beta_j(p)$ – комплексные коэффициенты конечных сумм, $v_j(p)$ – действительные коэффициенты, которые имеют физический смысл времени запаздывания при прохождении волны в многослойной структуре; параметр M_j является конечным числом и определяется количеством слоёв в структуре и их параметрами.

Во время эксперимента для измерения доступны только мгновенные значения амплитуды излучённого $e_{изл}(\omega)$ и принятого $e_{прм}(\omega)$ сигналов в точке, которая находится на определённом расстоянии d_0 от поверхности самой структуры. Следовательно, коэффициент отражения $L_m(\omega)$, вычисленный как отношение этих измеренных величин, будет иметь дополнительный набег фазы

$$L_m(\omega) = \frac{e_{изл}(\omega)}{e_{прм}(\omega)}. \quad (27)$$

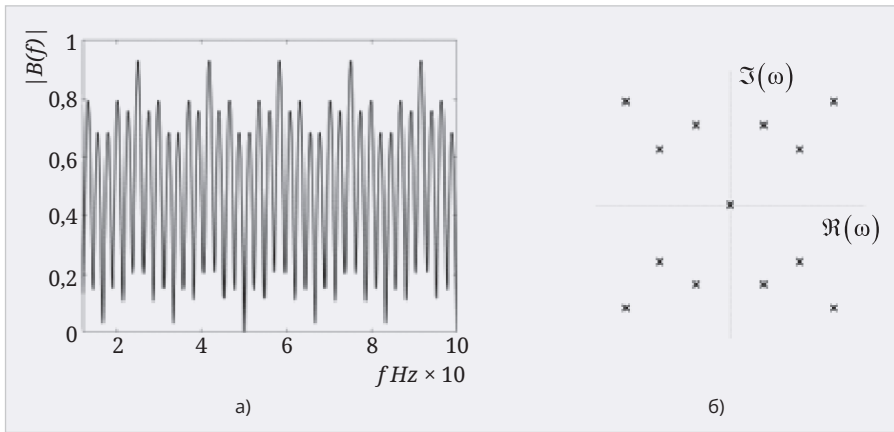


Рис. 3. Частотная зависимость абсолютного значения коэффициента, который описывается тригонометрическим полиномом с шестью периодическими сериями недействительных нулей (а), и распределение одной серии этих нулей в комплексной плоскости (б)

Этот набег фазы можно установить из выражений (15) и (17), показав различие между коэффициентами решений Йоста $A_0(\omega)$ и $B_0(\omega)$ слоистой структуры и значениями коэффициентов $A_m(\omega)$, $B_m(\omega)$, которые определены путём пересчёта результатов измерений:

$$\begin{bmatrix} A_m(\omega) & B_m(\omega) \\ B_m(-\omega) & A_m(-\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-ik_0 d_0} & 0 \\ 0 & e^{ik_0 d_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0(\omega) & B_0(\omega) \\ B_0(-\omega) & A_0(-\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_0(\omega) e^{-ik_0 d_0} & B_0(\omega) e^{-ik_0 d_0} \\ B_0(-\omega) e^{ik_0 d_0} & A_0(-\omega) e^{ik_0 d_0} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Из полученного выражения (28) видно, что коэффициенты решений Йоста $A_m(\omega)$ и $B_m(\omega)$ можно разложить в конечный ряд, в котором значения аргументов комплексных экспонент будут отличаться от значений $v_0(p)$ в формулах (25) и (26) на величину запаздывания $d_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ за счёт прохождения волной расстояния d_0 в свободном пространстве:

$$\begin{aligned} A_m(\omega) &= A_0(\omega) \exp(-ik_0 d_0) = \\ &= \sum_{p=1}^{M_0} \alpha_0(p) \exp[i\omega(v_0(p) - d_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})] = \\ &= \sum_{p=1}^{M_0} \alpha_0(p) \exp(i\omega \tau_p); \quad (29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_m(\omega) &= B_0(\omega) \exp(-ik_0 d_0) = \\ &= \sum_{p=1}^{M_0} \beta_0(p) \exp[i\omega(v_0(p) - d_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0})] = \\ &= \sum_{p=1}^{M_0} \beta_0(p) \exp(i\omega \tau_p). \quad (30) \end{aligned}$$

Отсюда можно определить, какой набег фазы присутствует в измеренных коэффициентах отражения и прохождения:

$$L_m(\omega) = \frac{B_m(-\omega)}{A_m(\omega)} = L(\omega) \exp(2ik_0 d_0); \quad (31)$$

$$T_m(\omega) = \frac{1}{A_m(\omega)} = T(\omega) \exp(ik_0 d_0). \quad (32)$$

Таким образом, можно утверждать, что импульсная характеристика любой многослойной структуры без потерь состоит из бесконечной суммы δ -функций. Кроме того, расположение этих δ -функций на оси τ определяет линейная комбинация $(lT_1 + mT_2 + \dots)$, где l и m являются произвольными целыми числами.

Для описания рассеяния электромагнитных волн проведём замену исходных данных коэффициентами $A_0(\omega)$ и $B_0(\omega)$ в решениях Йоста (12) и (13). Для заданных комплекснозначных функций $A_0(\omega)$ и $B_0(\omega)$ параметры диэлектрической слоистой среды можно вычислить согласно рекуррентной процедуре (17), осуществив предварительно оценку всех параметров $(\alpha_0, \beta_0, v_0, M_0)$ конечных тригонометрических сумм:

$$A_0(\omega) \doteq \sum_{p=1}^{M_0} \alpha_0(p) \exp(-iv_0(p)\omega); \quad (33)$$

$$B_0(\omega) \doteq \sum_{p=1}^{M_0} \beta_0(p) \exp(-iv_0(p)\omega). \quad (34)$$

Поэтому сформулированная обратная задача рассеяния сводится к определению комплекснозначных функций $A_0(\omega)$ и $B_0(\omega)$ по их абсолютным значениям. Последние непосредственно вычисляются по исходным данным задачи – модулю частотной зависимости коэффициента отражения $|L(\omega)| = |R(\omega)|$, согласно тождествам

$$|A_0(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 - |L(\omega)|^2}} \quad \text{и}$$

$$|B_0(\omega)| = \frac{|L(\omega)|}{\sqrt{1 - |L(\omega)|^2}}.$$

Из теории операторов известно, что спектральная задача (14) для оператора

$$H = -\frac{1}{\mu_0 \mu_{\epsilon_0} \epsilon(z) e(z)} \frac{d^2 e(z)}{dz^2}$$

имеет непрерывный спектр на положительной части действительной полуоси [93]. Из этого следует, что в верхней комплексной полуплоскости ω и на действительной оси функция $A_0(\omega)$ не равна нулю. Кроме этого, свойство аналитичности в верхней полуплоскости даёт возможность формулировать задачу реконструкции фазы этой функции по её модулю.

Комплексное значение коэффициента

$$A_0(\omega) = |A_0(\omega)| \exp(i\varphi_A(\omega))$$

можно восстановить по его абсолютному значению

$$|A_0(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 - |L(\omega)|^2}},$$

определяя аргумент комплексной экспоненты по формуле

$$\varphi_A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(\mathcal{G}_n \omega) + \omega v_0(M_0), \quad (35)$$

где коэффициенты c_n и $\mathcal{G}_n$ можно вычислить аналитически по коэффициентам α_0 и v_0 ряда (33).

Искомый комплексный коэффициент рассеивания $A_0(\omega)$ можно определить по формуле

$$A_0(\omega) = w_0(N+1) \tau^{-\frac{N}{2}} \prod_{n=1}^N (\tau - \exp(i\delta f_n)), \quad (36)$$

где коэффициент $w_0(N+1)$ и нули f_n функции $A_0(\omega)$ определяются из коэффициентов и корней известного модуля $|A_0(\omega)|$, записанного в виде тригонометрического полинома

$$\begin{aligned} |A_0(\omega)|^2 &= A_0(\omega) A_0(-\omega) = \\ &= W_0(2N+1) \tau^{-(N+1)} \prod_{q=1}^{2N} (\tau - \exp(i\delta g_q)). \quad (37) \end{aligned}$$

Здесь коэффициенты многочленов $w_0(N+1)$ и $W_0(2N+1)$ соотносятся как

$$w_0(N+1) = \sqrt{\frac{W_0(2N+1)}{\chi_1}},$$

где

$$\chi_1 = (-1)^N \prod_{q=1}^{2N} \exp(i\delta g_q).$$

Значения f_n , $n=1, N$ выбираем среди корней $g_q = g'_q + ig''_q$ тригонометрического полинома (36) таким образом,

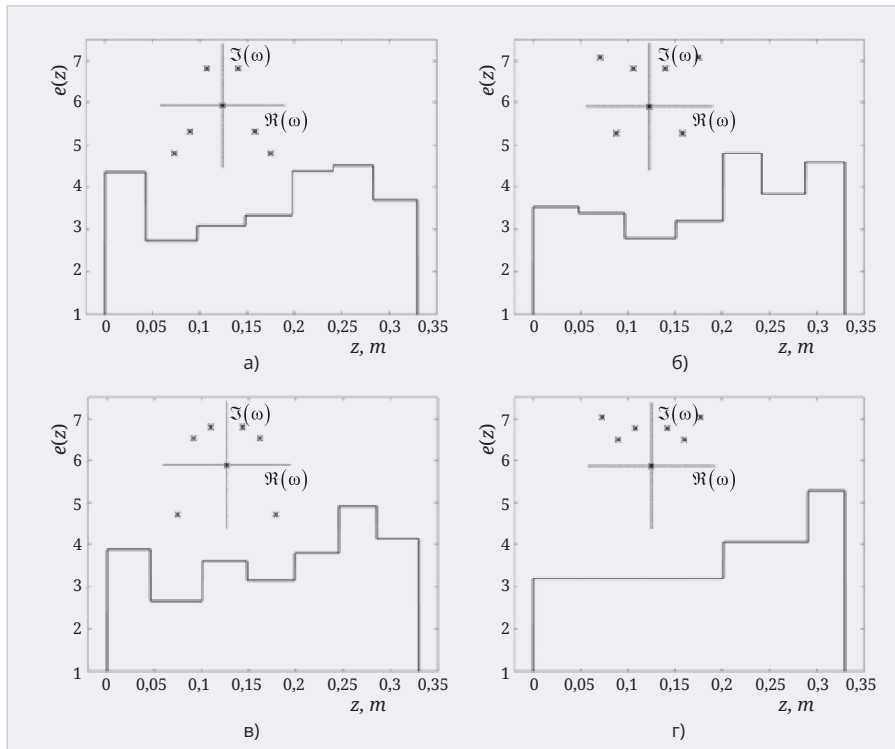


Рис. 4. Пример слоистых структур и соответствующее расположение корней функции в полосе Π , которые получены как решения обратной задачи для модуля

что $f_n = g_l$ где l принадлежит множеству индексов F , которое содержит индексы корней g_l , лежащих в нижней комплексной полуплоскости, или $F: l \in g_l' < 0$.

В отличие от коэффициента рассеяния $A_0(\omega)$, область расположения нулей коэффициента $B_0(\omega)$ в комплексной плоскости не является ограниченной. Поэтому решение задачи об установлении комплексного коэффициента $B_0(\omega)$ по его абсолютному значению

$$|B_0(\omega)| = \frac{|L(\omega)|}{\sqrt{1 - |L(\omega)|^2}}$$

не является единственным.

Рассмотрим причину неоднозначности решения такой задачи. Каждый ноль ω_0 функции $B_0(\omega)$ с ненулевой мнимой частью $\Im(\omega_0) \neq 0$ является причиной двужначности решения задачи об установлении комплекснозначной функции $B_0(\omega)$ по её модулю $|B_0(\omega)|$. Эти решения

$$B_{0,1}(\omega) = |B_0(\omega)| \exp(i\varphi_B(\omega));$$

и

$$B_{0,2}(\omega) = |B_0(\omega)| \exp(i\varphi_B(\omega) + i\varphi_\eta(\omega))$$

отличаются фазовым множителем $\exp(i\varphi_\eta(\omega))$, где

$$\varphi_B(\omega) = \frac{1}{\pi} \mathbf{P} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\log |B_0(\omega')|}{\omega - \omega'} d\omega' + \omega v_0(M_0); \quad (38)$$

$$\varphi_\eta(\omega) = \quad (39)$$

$$= \begin{cases} 2 \arctan \left(\frac{\Im(\omega_0)}{\omega - \Re(\omega_0)} \right), & \omega - \Re(\omega_0) > 0; \\ \pi \operatorname{sign}(\Im(\omega_0)), & \omega - \Re(\omega_0) = 0; \\ 2 \arctan \left(\frac{\Im(\omega_0)}{\omega - \Re(\omega_0)} \right) + \\ + 2\pi \operatorname{sign}(\Im(\omega_0)), & \omega - \Re(\omega_0) < 0. \end{cases}$$

Для того чтобы найти фазу $\varphi_\eta(\omega)$ множителя Бляшке, осуществим следующие преобразования:

$$\begin{aligned} \frac{\omega - \overline{\omega_0}}{\omega - \omega_0} &= \frac{\omega - \Re(\omega_0) + i\Im(\omega_0)}{\omega - \Re(\omega_0) - i\Im(\omega_0)} = \\ &= \frac{|\omega - \overline{\omega_0}| \exp(i\eta)}{|\omega - \omega_0| \exp(-i\eta)} = \exp(2i\eta), \end{aligned} \quad (40)$$

где η является аргументом некоторой комплекснозначной функции с действительной $\omega - \Re(\omega_0)$ и мнимой $\Im(\omega_0)$ частями.

Учитывая многозначность функции арктангенс в комплексной плоскости, из выражения (40) можно установить, что фаза множителя Бляшке имеет вид (39).

К появлению нулей как в верхней, так и в нижней комплексных полуплоскостях приводит то, что исходными данными (по условиям задачи) являются функция

$$|B_0(\omega)| = \frac{|L(\omega)|}{\sqrt{1 - |L(\omega)|^2}}$$

или её квадрат

$$\begin{aligned} |B_0(\omega)|^2 &= B_0(\omega) B_0(-\omega) = \\ &= \sum_{p=1}^K y_p \exp(i\gamma_p \omega). \end{aligned} \quad (41)$$

Кроме того, идентифицировать принадлежность корня ω_0 функции $B_0(\omega)$ к одной из полуплоскостей комплексной плоскости невозможно.

Поэтому задача о восстановлении фазы по модулю функции $|B_0(\omega)|$ будет иметь два решения: $\varphi_B(\omega)$ и $\varphi_B(\omega) + \varphi_\eta(\omega)$.

Как частный случай рассмотрим решение задачи об установлении по абсолютной величине $|B_0(\omega)|$ фазы функции

$$B_0(\omega) = S(\omega)(\omega - \omega_0 - \Delta_\omega)(\omega - \omega_0 - 2\Delta_\omega)(\omega - \omega_0 - 3\Delta_\omega) \dots,$$

которая имеет бесконечное количество действительных корней $\omega_0 \in \mathbb{R}$, периодически расположенных с шагом Δ_ω . Такую функцию можно записать в виде

$$B_0(\omega) = S(\omega) \left(\exp \left(\frac{2i\pi\omega}{\Delta_\omega} \right) - \exp \left(\frac{2i\pi\omega_0}{\Delta_\omega} \right) \right).$$

Квадрат модуля этой функции, заданный в качестве исходных данных в задаче восстановления, представим в виде:

$$\begin{aligned} |B_0(\omega)|^2 &= B_0(\omega) B_0(-\omega) = \\ &= |S(\omega)|^2 \left(\exp \left(\frac{2i\pi\omega}{\Delta_\omega} \right) - \exp \left(\frac{2i\pi\omega_0}{\Delta_\omega} \right) \right) \times \\ &\times \left(\exp \left(\frac{-2i\pi\omega}{\Delta_\omega} \right) - \exp \left(\frac{-2i\pi\omega_0}{\Delta_\omega} \right) \right) = \\ &= 4 |S(\omega)|^2 \sin^2 \left(\frac{\pi(\omega - \omega_0)}{\Delta_\omega} \right). \end{aligned} \quad (42)$$

Фазу такой функции можно вычислить с помощью интеграла Коши:

$$\begin{aligned} \varphi_B(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \mathbf{P} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\log |B_0(\omega')|}{\omega - \omega'} d\omega' + \omega v_0(M_0) = \\ &= \varphi_S(\omega) + \omega v_0(M_0) + \\ &+ \frac{1}{2\pi} \mathbf{P} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\log \left| 4 \sin^2 \left(\pi \frac{\omega - \omega'}{\Delta_\omega} \right) \right|}{\omega - \omega'} d\omega'. \end{aligned} \quad (43)$$

Последнее выражение определяет фазовое слагаемое, вносимое периодически расположенными на действительной оси корнями:

$$\begin{aligned}\varphi_{\sin}(\omega) &= \\ &= \frac{1}{2\pi} \text{P} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\log \left| 4 \sin^2 \left(\pi \frac{\omega - \omega'}{\Delta_{\omega}} \right) \right|}{\omega - \omega'} d\omega' = \\ &= \frac{1}{\pi} \text{P} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\log \left| \sin \left(\pi \frac{\omega - \omega'}{\Delta_{\omega}} \right) \right|}{\omega - \omega'} d\omega'.\end{aligned}\quad (44)$$

В работе [17] аналитически установлен результат преобразования Гильберта такого класса функций:

$$\frac{1}{\pi} \text{P} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\log \left| \sin \left(\pi \frac{\omega - \omega'}{\Delta_{\omega}} \right) \right|}{\omega - \omega'} d\omega' = -\pi \left[\frac{\omega}{\pi} \right], \quad (45)$$

где $[]$ – обозначение оператора, выделяющего целое число дробного аргумента.

Из выражений (44) и (45) следует, что фазовое слагаемое вносит лишь периодические скачки в фазу коэффициента $B_0(\omega)$:

$$\varphi_{\sin}(\omega) = -\pi \left[\frac{\omega + \omega_0}{\Delta_{\omega}} \right]. \quad (46)$$

Итак, проведённый анализ случая, когда коэффициент $B_0(\omega)$ имеет периодически расположенные корни на действительной оси, указывает на то, что эти корни не приводят к неоднозначности решения задачи установления фазы по абсолютному значению $|B_0(\omega)|$.

Количество C возможных решений задачи об установлении комплексной величины $B_0(\omega)$ по её модулю можно определить непосредственно из свойств симметрии нулей функции $|B_0(\omega)|^2$. Для чётного значения N это количество равно

$$C = 2^{\frac{N}{2}}, \text{ а для нечётного } - C = 2^{\frac{N-1}{2}}.$$

Обсуждение полученных результатов

В качестве примера на рис. 3а приведём исходные данные $|B_0(\omega)|$ для обратной задачи, которая решена численно.

Соответствующая функция $B_0(\omega)B_0(-\omega)$, продолженная аналитически на всю комплексную плоскость, имеет в полосе Π три пары (рис. 3б) недействительных симметричных относительно мнимой оси нулей, а потому порождает $2^3 = 8$ различных структур.

Ниже (рис. 4) приводим четыре структуры; остальные четыре получены из них изменением направления z на противоположное.

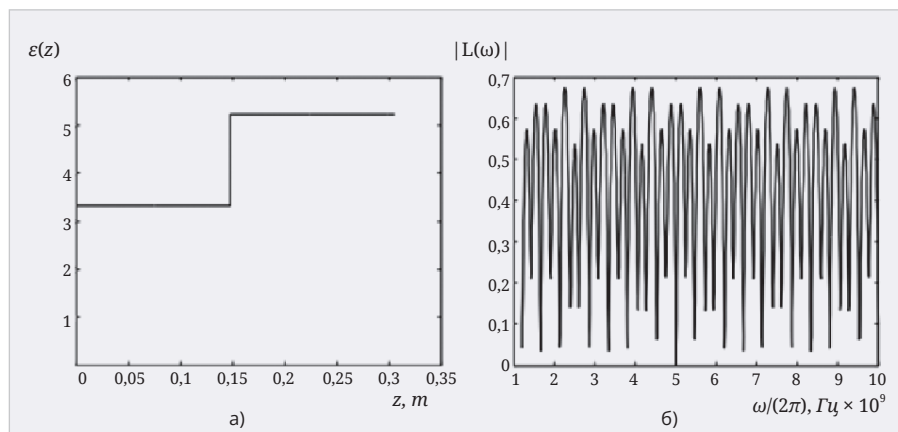


Рис. 5. Оригинальная функция диэлектрической проницаемости (а) и модуль коэффициента отражения (б), который использован как исходные данные для обратной задачи

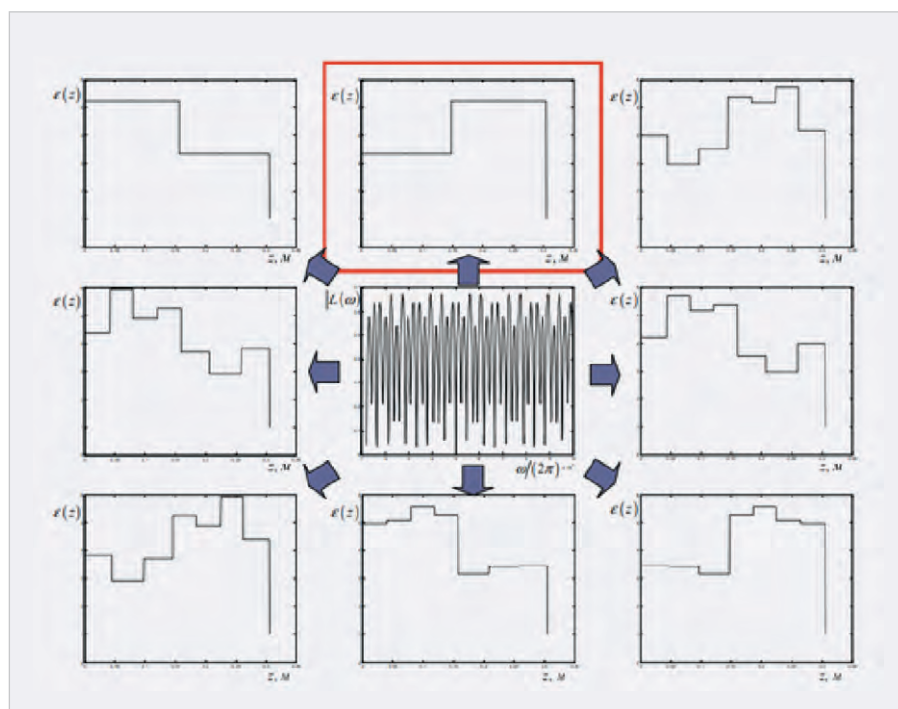


Рис. 6. Множество решений обратной задачи рассеяния, полученных по модулю коэффициента отражения в центре рисунка

По известному абсолютному значению $|L(\omega)|$ коэффициента отражения (рис. 5б) решена обратная задача рассеяния, которая включает установление комплекснозначных функций коэффициентов рассеяния $A_0(\omega)$ и $B_0(\omega)$, а также определение параметров каждого из слоёв многослойной структуры. Поскольку решение такой задачи является не единственным, для заданных исходных данных найдено множество решений (рис. 6). Среди этого множества будет тот, который соответствует оригинальному (рис. 5а). Можно проверить, что диэлектрические структуры, формирующие множество решений обратной задачи, будут иметь коэффициент отражения, идентичный тому,

который представлен на рис. 5б. Это свидетельствует о правильности утверждений, положенных в основу предложенного метода решения обратной задачи и обеспечения единственности её решения.

Заключение

Описанная процедура нахождения многозначного решения обратной задачи имеет опосредованную практическую ценность, поскольку не позволяет единым образом охарактеризовать исследуемую структуру по измеренным амплитудным характеристикам рассеяния или прохождения электромагнитной волны. Поэтому важной проблемой является регуляризация этой задачи путём

наложения дополнительных условий, позволяющих её решить однозначно. Анализ формулы (17) показывает, что диэлектрическая проницаемость ϵ_1 и толщина d_1 первого слоя являются достаточными параметрами для однозначного решения обратной задачи прохождения при заданном $|T(\omega)|$ только тогда, когда все значения оптических толщин $d_j = \sqrt{\epsilon_j \epsilon_0 \mu_0}$ являются несоизмеримыми (не принадлежат узлам любой регулярной сетки).

Литература

1. Ключев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник [2-е изд.]. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Фаддеев Л.Д. Обратная задача квантовой теории рассеяния // Успехи математических наук. 1959. Т. 14, Вып. 4(88). С. 57–119.
3. Марченко В.А. Операторы Штурма-Лиувилля и их приложения. Киев: Наукова думка, 1977. 332 с.
4. Крейн М.Г. Об определении потенциала частицы по её S-функции // ДАН СССР. 1955. Т. 105, № 3. С. 433–436.
5. Balanis G.N. Inverse scattering: determination of inhomogeneities in sound speed // J. Math. Phys. 1982. Vol. 23, No 12. P. 2562–2568.
6. Джала В.Р., Капко Л.И. Радиоволновая диагностика плоскостойких диэлектриков на основе решения обратной задачи // Физико-химическая механика материалов. 2009. Т. 45, № 3. С. 117–122.
7. Завьялов А.С., Дунаевский Г.Е. Изменение параметров материалов на сверхвысоких частотах. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1985. 215 с.
8. Анпеталин В.Н., Зубов А.С., Казанцев Ю.Н., Солосин В.С. Устройство для измерения комплексного коэффициента отражения в квазиоптическом тракте. RU 2079144 C1, G01R 27/06. Опубл. 10.05.1997.
9. Roome S.J. Analysis of quadrature detectors using complex envelope notation // IEE Proceedings F: Radar and Signal Processing. 1989. Vol. 136, Issue 2. P. 95–100.
10. Тихонов А.В., Клибанов М.В., Зуев И.В. Численное исследование бесфазной обратной задачи рассеяния в тонкоплёночной оптике // Обратные задачи. 1995. Т. 11, № 1. P. 251–270.
11. Claerbout J.F. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response // Geophysics. 1968. № 33. P. 264–269.
12. Тихонов А.Н., Тихонов А.В., Трубецков М.К. Методы оптимизации второго порядка в задачах синтеза многослойных покрытий // Ж. вычисл. матем. и матем. физики. 1993. Т. 33, № 10. С. 1518–1535.
13. Цзицзюнь Л., Юаньмин В. О единственности обратной задачи для одномерного волнового уравнения из данных передачи // SIAM Journal on Applied Mathematics, 1997. Vol. 57, No. 1. P. 195–204.
14. Rakesh P. Sacks Impedance inversion from transmission data for the wave equation // Wave Motion. 1996. Vol. 24. P. 263–274.
15. Ньютон Р. Теория рассеяния волн и частиц. М.: Мир, 1969. 600 с.
16. Stratton J.A. Electromagnetic theory. New-York, NY: McGraw-Hill Book Company, Inc. 1941. 640 p.
17. Mashreggi J. Hilbert transform of log |f| // Proceedings of the American Mathematical Society. 2002. Vol. 130, No. 3. P. 683–688.



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

ЭЛЕКОНД

РАЗРАБОТКА И ПРОИЗВОДСТВО КОНДЕНСАТОРОВ

Оксидно-электролитические алюминиевые конденсаторы K50-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	3,2 ... 485
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	1,0 ... 470 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 125

Объемно-пористые танталовые конденсаторы K52-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	3,2 ... 200
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	1,5 ... 60 000
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 175

Оксидно-полупроводниковые танталовые конденсаторы K53-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	2,5 ... 63
Номинальная емкость, $C_{ном}$, мкФ,	0,033 ... 2 200
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 175

Суперконденсаторы K58-...

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	2,5 ... 2,7
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф,	1,0 ... 4 700
Диапазон температур среды и эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 65

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

Номинальное напряжение, $U_{ном}$, В,	5,0 ... 48
Номинальная емкость, $C_{ном}$, Ф,	0,08 ... 783
Диапазон температур среды при эксплуатации, $T_{ср}$, °C	-60 ... 65

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

Реклама

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА • № 6 / 2025

WWW.CTA.RU

17

Расчёт волнового сопротивления на печатной плате для интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite

Вячеслав Кухарук, Виктор Ухин

В статье рассматривается пример расчёта первичных и вторичных параметров дифференциальной пары высокоскоростного интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite, разработанной компанией ЭРЕМЕКС.

При проектировании высокоскоростных интерфейсов на печатной плате важно рассчитывать параметры линий передачи с высокой точностью. Одним из таких интерфейсов является USB 3.1, у которого скорость передачи данных достигает 10 Гбит/с. На таких скоростях несогласованность импеданса может критически повлиять на целостность сигнала, что приведёт к некорректной работе всего устройства.

В статье подробно рассматривается процесс вычисления параметров линии передачи с контролируемым дифференциальным волновым сопротивлением для интерфейса USB 3.1 в САПР SimPCB Lite. Расчёт ослабления сигнала и перекрёстных помех применительно к USB 3.1 будет рассмотрен в следующих статьях.

USB 3.1 использует две дифференциальные пары (TX и RX), по которым передаются данные со скоростью до 10 Гбит/с. Основные требования и рекомендации на трассировку и компоновку данного интерфейса изложены ниже [1, 2, 3].

- **Импеданс дифференциальной пары.** Волновое сопротивление должно составлять 90 Ом. Допускается отклонение в пределах десяти процентов.
- **Трассировка и количество переходных отверстий.** Не допускается в трассировке наличие прямых углов. Количество переходных отверстий минимальное: на одну линию не более двух.
- **Перекрёстные помехи.** Для минимизации помех расстояние от любых сигналов до проводника дифф. пары должно составлять не менее 5W, где W – ширина проводника дифф. пары. В случае плотной трассировки и невозможности обеспечения указанного выше значения

применять моделирование. Минимизировать расстояние между сигнальным и опорным слоем. Избегать размещения трасс под источниками помех (кristаллы, DC-DC, PLL).

- **Длина проводников в паре.** Разница в длине проводников не должна превышать 0,127 мм. Обеспечить равномерную ширину и зазор по всей длине дифференциальной пары.
- **Возвратный путь сигнала.** Следует избегать разрывов в опорном слое под дифференциальной парой.

- **Размещение конденсаторов.** Конденсаторы на сигнальных линиях следует располагать как можно ближе к разъёму USB.

- **Устанавливать TVS-диоды или ESD-защиту** ближе к USB-разъёму.
- **Ферриты или индуктивности.** Данные типы компонентов не должны стоять в сигнальных линиях Super Speed (TX/RX).

Как правило, для данного интерфейса USB 3.1 на печатной плате реализуются **дифференциальные микрополосковые** или **дифференциальные полосковые линии передачи**. Возможны также варианты и с копланарными структурами.

В данной статье рассматривается **микрополосковая дифференциальная линия передачи**.

Толщина	Тип препрега	RC	Dk 1GHz	2GHz	5GHz	10GHz	15GHz
0.102	3313	56	3.88	3.74	3.73	3.70	3.66
0.076	1080	64	3.68	3.52	3.52	3.5	3.46
0.064	106	76	3.38	3.19	3.21	3.19	3.16
0.05	106	71	3.51	3.33	3.34	3.32	3.28

Рис. 1. Список рекомендуемых препрегов FR4 категории High Speed от «РЕЗОНИТ»

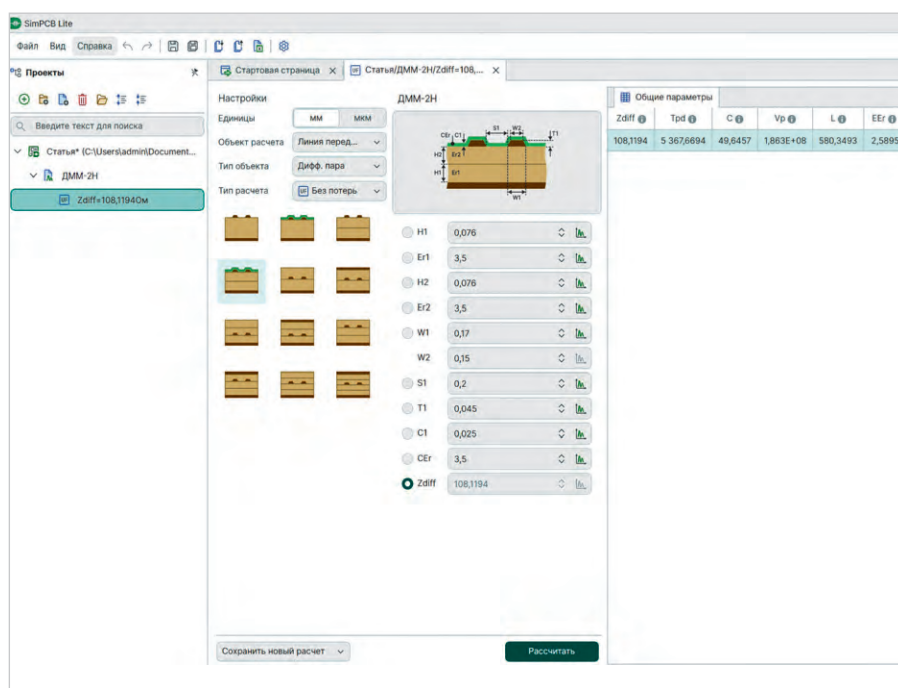


Рис. 2. Расчёт дифференциального волнового сопротивления $Z_{diff} = 108,11 \text{ Ом}$

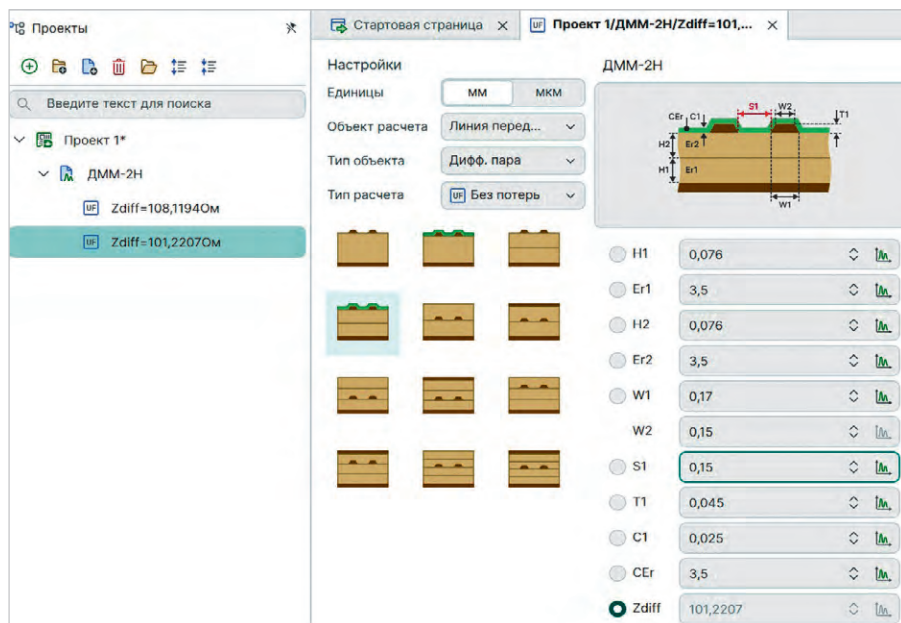


Рис. 3. Расчёт дифференциального волнового сопротивления $Z_{diff} = 101,22 \text{ Ом}$

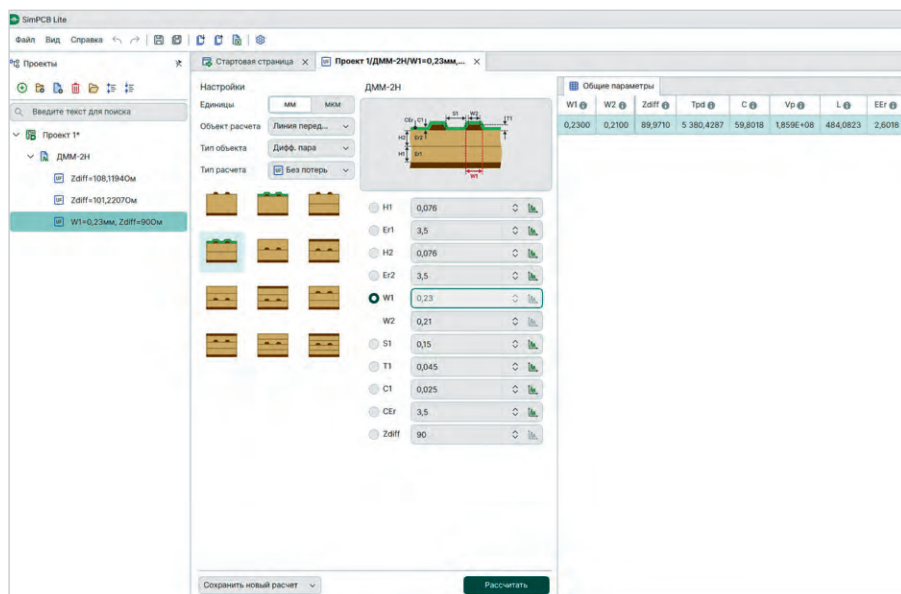


Рис. 4. Расчёт дифференциального волнового сопротивления $Z_{diff} = 89,97 \text{ Ом}$

Таблица 1. Список входных параметров, который необходимо задать в САПР SimPCB Lite

Параметр	Значение	Комментарий
Объект расчёта	Линия передачи	
Тип объекта	Дифф. пара	
Тип расчёта	Без потерь	
Модель	ДММ-2Н	Дифференциальная микрополосковая ЛП с маской
H1 и H2	0,076	Толщина диэлектрика (мм)
Er1 и Er2	3,5	Диэлектрическая проницаемость
W1	0,17	Ширина проводника (мм), значение по умолчанию
W2	0,15	Ширина проводника после подтравы (мм), значение по умолчанию. Подтрав зависит от технологических особенностей производства. Данный параметр лучше уточнять у технологических служб конкретного производства
S1	0,2	Зазор между проводниками (мм), значение по умолчанию
T1	0,045	Толщина проводника (мм). Значение складывается из базовой толщины меди и осаждения меди. Данный параметр лучше уточнять у технологических служб конкретного производства
C1	0,025	Толщина маски (мм)
CEr	3,5	Диэлектрическая проницаемость маски

Параметры линий передачи, в том числе и геометрические, во многом зависят от применяемых материалов в структуре печатной платы. Выбор материала зависит от многих факторов, а именно: типа платы, условий эксплуатации, применяемых компонентов, способа монтажа, максимальной частоты сигналов, значения волнового сопротивления, типов переходных отверстий, максимального тока в устройстве и допустимой толщины платы и т.д.

Для высокоскоростных интерфейсов следует использовать специальные материалы из категории High Speed. Как правило, они имеют низкую диэлектрическую проницаемость, малый тангенс угла диэлектрических потерь и стабильность свойств в широком диапазоне частот. Такие материалы предлагает компания ООО «РЕЗОНИТ».

Дифференциальная пара размещается на внешнем слое. Пусть между сигнальным слоем и опорным располагается препрег. Такой вариант структуры многослойной печатной платы относится к типовым. Параметры препрега взяты с сайта компании ООО «РЕЗОНИТ» и представлены на рис. 1. Данные препреги выполнены на основе материала TU-872 компании TUC [4].

В разрабатываемой конструкции применим два препрега $2 \times 0,076$ с диэлектрической проницаемостью $E_r (D_k) = 3,5$. Данная комбинация проста в изготовлении и довольно часто используется на практике. При необходимости, в зависимости от решаемой задачи и возможностей производства, количество и тип препрегов могут отличаться от представленного выше.

В САПР SimPCB Lite задаются следующие входные параметры, приведённые в табл. 1.

Также необходимо изменить режим расчёта на вариант **Сохранить новый расчёт**. В этом случае после нажатия на кнопку **Рассчитать** расчёт будет сохраняться в панели **Проекты**.

При данных, указанных в табл. 1, дифференциальное волновое сопротивление составит $Z_{diff} = 108,11 \text{ Ом}$. Кроме волнового сопротивления программа рассчитывает задержку, ёмкость, индуктивность, скорость распространения сигнала и эффек-

тивную диэлектрическую проницаемость (рис. 2).

Полученный результат не удовлетворяет требованиям данного интерфейса, так как импеданс значительно превышает 90 Ом.

Параметры материалов, геометрические и электрофизические, являются константами в нашем примере, поэтому влиять на волновое сопротивление возможно только через S1 и W1, W2. Изменим S1: пусть зазор между проводниками составляет 0,15 мм, тогда $Z_{diff} = 101,22$ Ом. Значение сопротивления стало ближе к необходимому, но всё же не удовлетворяет требованию (рис. 3).

Далее вычислим в SimPCB Lite ширину проводника дифференциальной пары под волновое сопротивление 90 Ом. Для этого следует переключить радиокнопку на параметр W1. В поле Z_{diff} нужно ввести 90 Ом и нажать кнопку **Рассчитать**. В итоге ширина проводника получится 0,23 мм.

Таким образом, при ширине проводника 0,23 мм и зазоре между проводниками 0,15 мм волновое сопротивление для данной конструкции составит $Z_{diff} = 89,97$ Ом. Если отсутствуют какие-либо дополнительные ограничения, то требования по импедансу можно считать выполненными ($90 \text{ Ом} \pm 10\%$) (рис. 4).

Для быстродействующих интерфейсов рекомендуется дополнительно проводить частотный анализ. С его помощью можно оценить зависимость волнового сопротивления от частоты и вычислить множество дополнительных величин, влияющих на качество сигнала. САПР SimPCB Lite позволяет провести такой анализ. Для его выполнения в программе следует изменить тип расчёта на **Частотный анализ** и ввести данные в **Дополнительные параметры**. Пусть они будут иметь следующие значения (рис. 5).

Параметр Fc (частота) меняется от 100 МГц до 11 ГГц с шагом 100 МГц. Результат расчёта представлен на рис. 6.

Видно, что волновое сопротивление уменьшается с увеличением частоты. Так, для 100 МГц оно составляет 92,113 Ом, а для 10 ГГц – 89,93 Ом. Такое поведение обусловлено учётом двух дополнительных первичных параметров (активное сопротивление и проводимость диэлектрика),

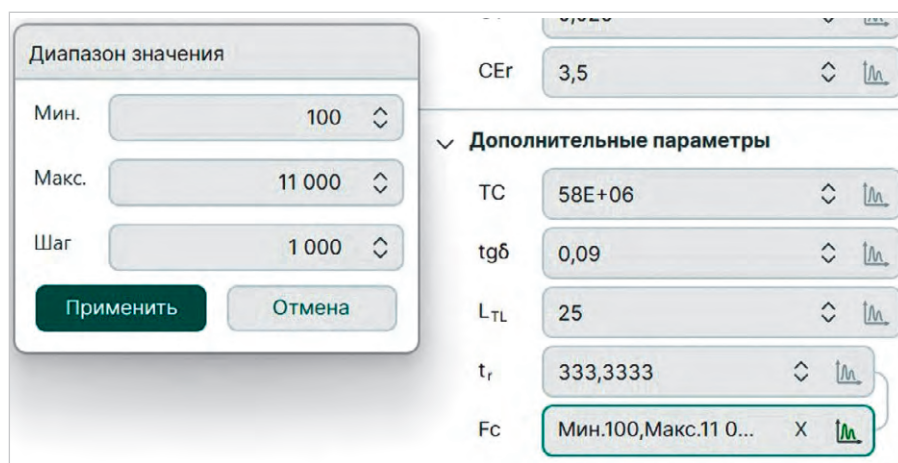


Рис. 5. Значения в дополнительных параметрах

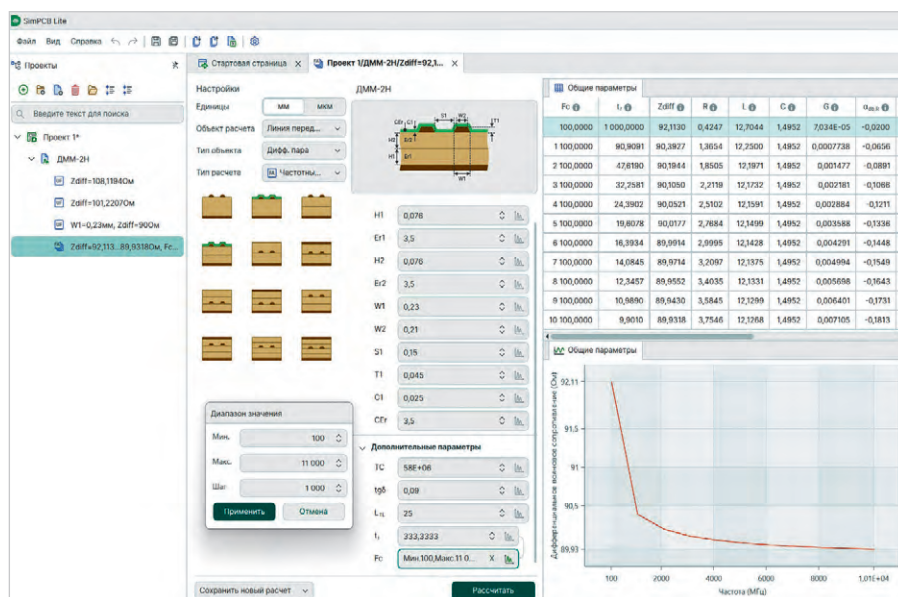


Рис. 6. Частотный анализ, результат расчёта

а также влиянием частоты на значение индуктивности. Полученный интервал дифференциального волнового сопротивления линий передачи (89,93...92,113 Ом) в широком диапазоне частот (100 МГц...10 ГГц) также полностью удовлетворяет требованиям к высокоскоростному интерфейсу USB 3.1.

При проектировании линий передачи для определения их геометрических параметров и электрофизических свойств под конкретное значение волнового сопротивления в значительном количестве случаев достаточно использовать только расчёт без учёта потерь. Для получения более детальной информации о линии необходимо выполнять частотный анализ. С его помощью специалист получит значения всех четырёх первичных параметров (ёмкость, индуктивность, активное сопротивление, проводимость

диэлектрика) и точное значение импеданса на конкретной частоте.

Литература

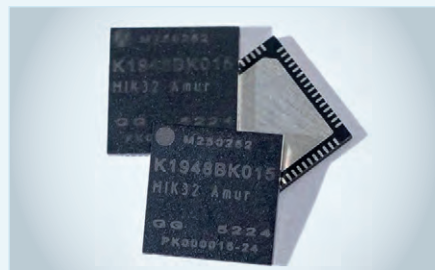
1. Universal Serial Bus 3.1 Specification, 2013.
2. High-Speed Interface Layout Guidelines. Texas Instruments. 2023.
3. AN222944. EZ-USB HX3PD Hardware Design Guidelines and Checklist. Infineon Technologies.
4. Сайт компании «РЕЗОНИТ». Материалы для производства печатных плат. URL: https://www.rezonit.ru/directory/v-pomoshch-konstruktoru/materialy-dlya-proizvodstva-pechatnykh-plat/materialy-high-speed/#TU872_SLK/ (дата обращения: 15.05.2025).
5. Сайт компании TUC. URL: <https://www.tuc.com.tw/en-us/products-detail/id/2> (дата обращения: 15.05.2025).

НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Еще десять микросхем Микрона первого уровня в реестре российской продукции



Десять интегральных микросхем первого уровня производства Микрона, крупнейшего производителя российской микроэлектроники (входит в группу компаний «Элемент», ELMT), резидента ОЭЗ «Технополис Москва», внесены в реестр российской промышленной продукции и в Единый реестр российской радиоэлектронной продукции.



В числе десяти интегральных микросхем первого уровня промышленного применения в реестре: регуляторы напряжения K5361EH1T, K5361EH1AT, K5361EH1BT, K5361EH1DT, K5361EH1ET, стабилизатор напряжения K5361EF2T, понижающие

регуляторы напряжения K5361EK2AT, K5361EK2BT, K5361EK1AT, K5361EK1BT. Все микросхемы произведены и корпусированы на Микроне и полностью соответствуют требованиям по локальному производству.

Шлюзы PFORT в аэропорту Пулково в рамках ПМЭФ-2025

В дни работы Петербургского международного экономического форума (ПМЭФ-2025) в аэропорту Пулково успешно прошло тестирование биометрического шлюза TOP-22ш со встроенным искусственным интеллектом.

Технология предлагает пассажирам удобное и быстрое прохождение процесса подтверждения личности без предъявления паспорта, используя биометрическую идентификацию по лицу.

Для этого в шлюзе установлен терминал BioSmart Quasar 7, который соответствует всем требованиям 572-ФЗ и напрямую подключен к Единой Биометрической Системе (ЕБС) по транзакционной модели.

TOP-22ш разработан компанией ПРОСОФТ (торговая марка PFORT) совместно

с Министерством промышленности и торговли РФ, курируется Министерством цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ и производится в России.



Использование именно этого уникального продукта обусловлено его способностью обеспечивать повышенный уровень контроля прохода благодаря встроенному искусственному интеллекту. Шлюз способен успешно выявлять попытки прохода двух человек, даже прижавшихся друг к другу; контролировать наличие ручной клади, детей на руках или рядом со взрослыми; обнаруживать оставленные предметы, животных вне переносок и т.п.



Промышленный ТЕХНОПАРК

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

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

Современная производственная база

Высокое качество

Индивидуальный подход к потребителю

Изделия по вашему ТЗ



Связаться с нами: **8 800 444 30 99**

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

erkonpark.ru

Двухканальный контроллер светового шнура типа «дюралайт»

Александр Одинец

В статье рассмотрен вариант контроллера, реализующий плавное противофазное управление яркостью двух гирлянд методом широтно-импульсной модуляции. В то время, когда яркость ламп в одном канале плавно убывает, в другом она возрастает.

Общие сведения

В настоящее время для эстетического светового оформления витрин магазинов, баров, дискотек, наружной рекламы и архитектурного освещения широко используются световые шнуры типа «дюралайт» («Duralight») и «флексилайт» («Flexilight») в различных конфигурациях. «Дюралайт» представляет собой гибкий шнур круглого (реже прямоугольного) сечения из окрашенного светорассеивающего пластика (ПВХ), которым залита гирлянда из миниатюрных лампочек или светодиодов. Количество гирлянд может варьироваться от одной до четырёх. Существуют различные конфигурации «дюралайта»: «фиксинг», «хамелеон», «чейзинг» и «мультичейзинг».

Соответственно перечисленным сериям меняется кратность резки и потребляемая мощность световых шнуров:

- для серии «фиксинг» кратность резки – 1 м;
- для серии «хамелеон» и «чейзинг» – 2 м;
- для серии «мультичейзинг» – 4 м.

Потребляемая мощность «дюралайта» изменяется от 16,38 Вт/м («фиксинг», «чейзинг», «хамелеон») до 21,6 Вт/м («мультичейзинг»).

Обычно один конец отрезка «дюралайта» с помощью переходной муфты соединяется с сетевым шнуром, который подключается непосредственно в сеть 220 В. На другой (свободный) конец надевается пластиковая заглушка. Отрезки «дюралайта» могут соединяться друг с другом разъемом типа «папа-папа» и скрепляются соединительной муфтой или специальной термоусаживающей плёнкой.

В отличие от базовой версии, реализующей фазоимпульсный метод управления, в улучшенной версии

контроллера использован широтно-импульсный метод (ШИМ) управления гирляндами, что позволило увеличить дискретность уровней яркости с 16 до 256 и реализовать идеально плавное управление яркостью гирлянд при меньших аппаратных затратах.

В отличие от конструкций контроллеров, доступных в Интернете, предлагаемый вариант не имеет ограничения по продолжительности времени работы. При этом нет необходимости в ходе работы нажимать какие-либо кнопки, чтобы вернуть контроллер в исходное состояние.

Принцип работы

Схема электрическая принципиальная контроллера (рис. 1) содержит: два генератора прямоугольных импульсов; ВЧ-генератор, собранный на элементах DD1.1 и DD1.2, стробирующий ШИМ-модулятор, НЧ-генератор на элементах DD1.3 и DD1.4, управляющий формирователем кодовых комбинаций нарастания/убывания яркости; счётчики DD2.1, DD2.2 – делители частоты на 256; одновибратор на элементах DD3.1, DD3.2; RS-триггер на элементах DD3.3, DD3.4; счётчик с переменным коэффициентом деления DD4, DD5, собственно формирователь кодовых комбинаций нарастания/убывания яркости DD6, DD7, DD8 и схему индикации DD9, HL1...HL16. Для управления мощными ключевыми MOSFET-транзисторами используются буферные формирователи на транзисторах VT2, VT3 и VT6, VT7, сигнал на которые с выходов RS-триггера подаётся через схемы сдвига уровня на транзисторах VT1 и VT5.

Питание буферных формирователей осуществляется от параметрического стабилизатора на элементах R8, R9, VD1, а цифровой части схемы –

от малоомощного интегрального стабилизатора DA1.

Скорость нарастания/убывания яркости гирлянд задаётся переменным резистором R3, входящим во времязадающую цепь генератора прямоугольных импульсов DD1.3, DD1.4. В устройстве используется так называемый широтно-импульсный метод (ШИМ) управления ключевыми MOSFET-транзисторами. При этом яркость свечения зависит от времени нахождения транзистора в открытом состоянии, т.е. от скважности импульсов. Напомним, что скважностью называется отношение периода следования импульсов к их длительности. Следовательно, чем больше скважность, тем больше соотношение период/длительность импульса, тем меньше яркость, и наоборот, чем меньше скважность, тем больше яркость в данном канале.

Рассмотрим работу контроллера с момента подачи питания, считая, что при этом счётчик DD6 установился в нулевое состояние. При этом на выходе всех элементов «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» также присутствуют уровни лог. 0, поскольку на объединённые управляющие входы этих элементов (выводы 2, 5, 13, 9) также приходит уровень лог. 0.

Первым же отрицательным перепадом с выхода старшего разряда счётчика DD2.2 запускается одновибратор на элементах DD3.1, DD3.2. На его выходе формируется короткий отрицательный импульс длительностью несколько десятков наносекунд, который устанавливает RS-триггер в исходное единичное состояние (на выходе DD3.3 – уровень лог. 1), и происходит одновременная запись текущей двоичной комбинации «00000000» с выходов элементов DD7.1...DD7.4 и DD8.1...DD8.4 в собственные двоичные разряды счётчиков DD4 и DD5. Этот двоичный код определяет коэффициент пересчёта данных счётчиков, а значит, и временной интервал с момента установки RS-триггера в единичное состояние до момента

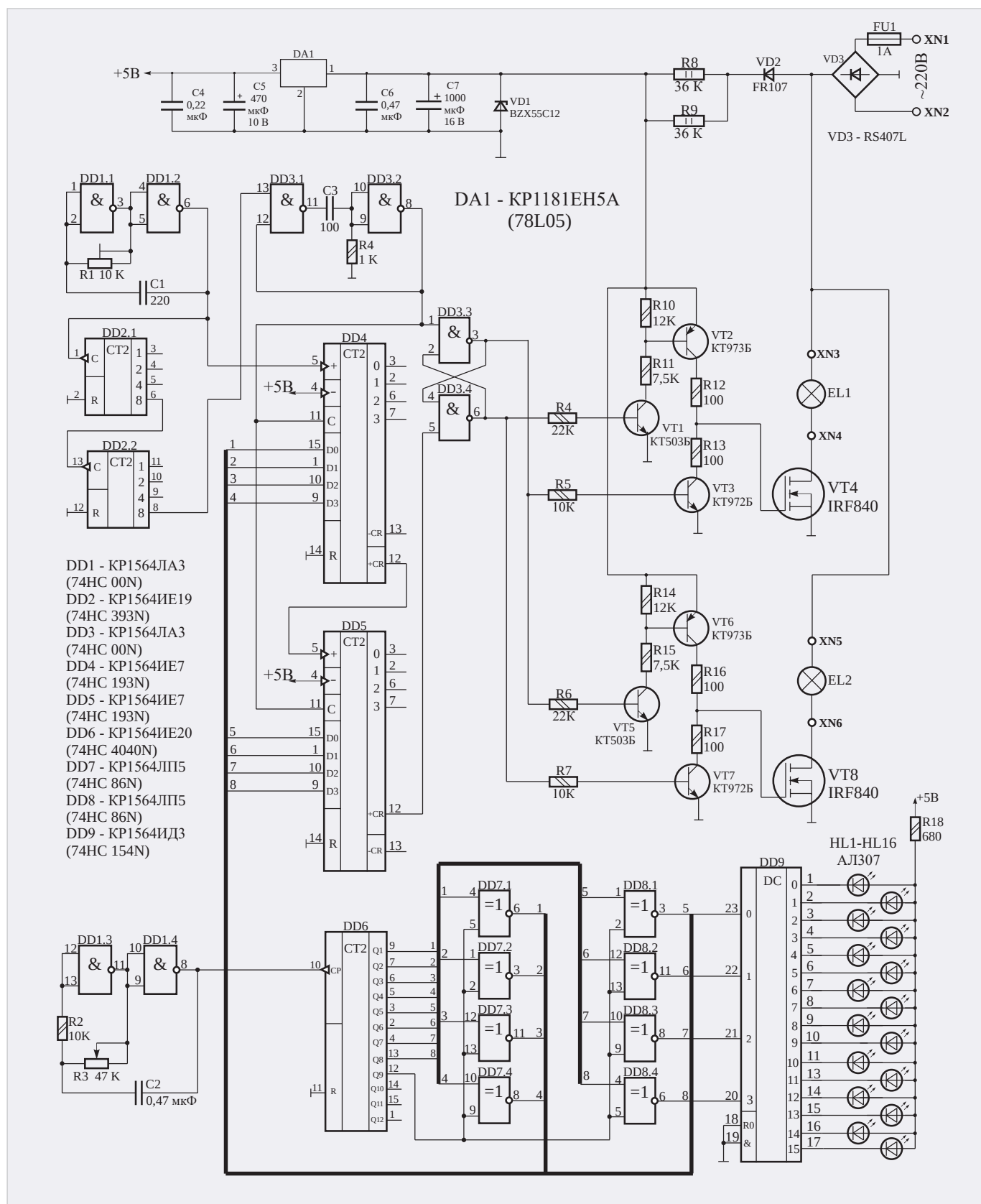


Рис. 1. Двухканальный контроллер «дюралайта» на MOSFET-транзисторах. Схема электрическая принципиальная

появления отрицательного импульса (сигнала переполнения) на выходе «+CR» (вывод 12) счётчика DD5. Этот временной интервал определяет скважность импульсов на выходах RS-триггера DD3.3-DD3.4. Уровень лог. 1 с выхода элемента DD3.3 открывает

транзисторы VT3 и VT5, а уровень лог. 0 с выхода DD3.4 закрывает VT1, VT2 и VT5, VT6. Следовательно, мощный ключевой MOSFET-транзистор VT8 оказывается открытым, а VT4 – закрытым в данный момент времени. При переключении RS-триггера в

противоположное состояние происходит обратный процесс.

При увеличении состояния счётчика DD6 происходит нарастание двоичных комбинаций на его выходах, а значит, и на выходах элементов DD7.1...DD7.4 и DD8.1...DD8.4. С увели-

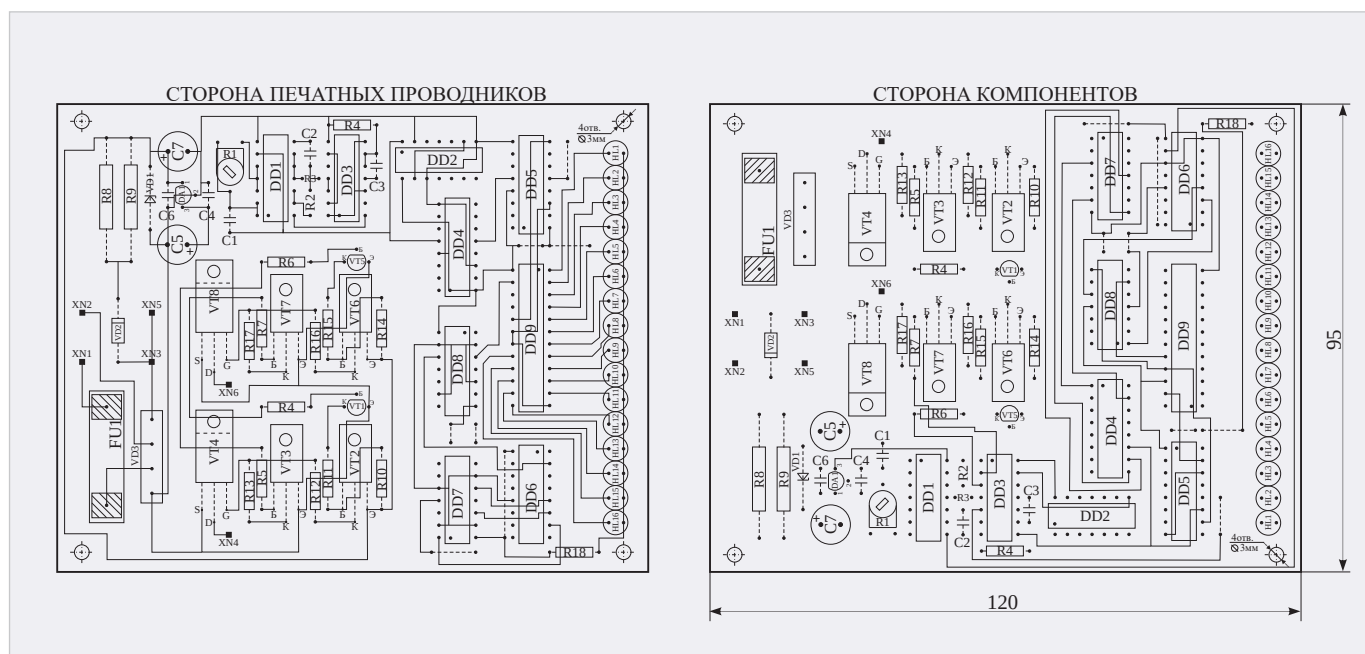


Рис. 2. Двухканальный контроллер «дюралайта» на MOSFET транзисторах. Рисунок печатной платы

чением двоичных комбинаций, записываемых во внутренние двоичные разряды счётчиков DD4, DD5, коэффициент их пересчёта уменьшается, поэтому уменьшается и временной интервал с момента стробирования счётчиков импульсом с выхода одновибратора DD3.1, DD3.2 до момента появления сигнала переполнения на выходе «+CR» (вывод 12) счётчика DD5 и переключения RS-триггера в противоположное состояние. При этом скважность импульсов на прямом выходе RS-триггера (вывод 3 элемента DD3.3) увеличивается (яркость в первом канале EL1 убывает), а на инверсном выходе RS-триггера (вывод 6 элемента DD3.4) уменьшается (яркость во втором канале EL2 возрастает).

При достижении счётчиком DD6 своего 256-го состояния на выходе Q9 (вывод 12) появляется уровень лог. 1. Все логические элементы DD7.1...DD7.4 и DD8.1...DD8.4 начинают работать в режиме инверсии выходных кодовых комбинаций счётчика DD6, поэтому на их выходах формируются последовательно убывающие двоичные комбинации. Яркость в первом канале (EL1) начинает возрастать, а во втором (EL2) – убывать. Таким образом, осуществляется ШИМ-модуляция яркости гирлянд.

Конструкция и детали

Контроллер собран на печатной плате (рис. 2) размерами 120×95 мм из двухстороннего фольгированного

стеклотекстолита толщиной 1,5 мм. В устройстве применены резисторы типа МЛТ-0,125, МЛТ-2 (R8, R9), конденсаторы постоянные типа К10-17 (C1...C4, C6) и электролитические типа К50-35 (C5, C7); подстроечный резистор R1 – типа СП3-386 в горизонтальном исполнении, переменный R2 может быть любой малогабаритный (с ручкой из изоляционного материала!); транзисторы VT1, VT5 могут быть из серий KT503, KT3102 и другие малогабаритные структуры n-p-n; транзисторы VT2, VT3, VT6, VT7 – обязательно составные средней мощности; светодиоды HL1...HL16 – любого цвета, желательно сверхъяркие, диаметром 5 мм; стабилитрон VD1 должен быть с напряжением стабилизации 10...12 В, например, Д810, Д814В, Д814Г, КС510А, КС512А или ВZХ55С10, ВZХ55С12; диод VD2 – кремниевый средней мощности с минимально допустимым обратным напряжением не менее 400 В. Диодный мост должен быть в вертикальном исполнении типа RS407L или аналогичный. Транзисторы MOSFET типа IRF840 заменимы на IRF740 и другие с минимально допустимым рабочим напряжением сток-исток не менее 400 В и минимально возможным сопротивлением канала в открытом состоянии. Максимальная мощность нагрузки при эксплуатации без радиатора не должна превышать 250 Вт. При большей мощности радиаторы необходимы.

Автором проверены также транзисторы КП7173А отечественного произ-

водства. Их параметры: максимальный ток стока $I_{с} = 4$ А, максимально допустимое напряжение сток-исток $U_{с-и} = 600$ В. Сопротивление канала в открытом состоянии не более $R < 2$ Ом. Максимальная суммарная мощность гирлянды в одном канале в случае применения транзисторов типа КП7173А без радиатора не должна превышать 100 Вт. Все ИМС серии KP1564 (74НСxx) заменимы на соответствующие аналоги серии KP1554 (74АСxx). Интегральный стабилизатор применён типа KP1181ЕН5А (78L05).

Для индикации яркости и создания эффекта «бегущего огня» в устройство введены дешифратор DD9 и светодиодная линейка HL1...HL16. При желании дешифратор и светодиоды можно исключить из конструкции без ухудшения функциональности устройства.

Настройка контроллера заключается в установке частоты задающего генератора DD1.1, DD1.2 подстроечным резистором R1 около 512 кГц и выборе желаемой скорости нарастания/убывания яркости гирлянд с помощью переменного резистора R3.

Внимание! Конструкция имеет непосредственную гальваническую связь с сетью переменного тока! Все элементы находятся под напряжением 220 В. При настройке устройства необходимо использовать отвёртку с ручкой из изоляционного материала. Ручка переменного резистора R3 также должна быть выполнена из изоляционного материала.



Рост рынка промышленной автоматизации: ключевые драйверы и прогнозы

Мировой рынок промышленной автоматизации оценен в 200 млрд долларов США в 2024 году. Ожидается, что к 2035 году он вырастет до 570,4 млрд долларов при среднегодовом темпе роста 10,3%. Важнейшими факторами роста являются внедрение технологий Индустрии 4.0, интеграция искусственного интеллекта (ИИ), нехватка рабочей силы и правительственные инициативы, направленные на поддержку интеллектуального производства.



Трансформация промышленной автоматизации

Промышленность переживает значительные изменения благодаря внедрению ИТ-решений, таких как Интернет вещей (IoT), искусственный интеллект и робототехника. Это позволяет решать проблемы, связанные с нехваткой рабочей силы, ростом затрат и необходимостью повышения операционной эффективности. Внедрение технологий Индустрии 4.0 способствует переходу от традиционных производственных процессов к интеллектуальным, подключенным системам, что особенно заметно в таких отраслях, как нефтегазовая, автомобильная и химическая промышленность.

Ключевые технологические драйверы

1. Индустрия 4.0 и искусственный интеллект. Интеграция IoT-датчиков, ИИ и машинного обучения позволяет осуществлять мониторинг в реальном времени, проводить профилактическое обслуживание и оптимизировать производственные процессы. Эти технологии увеличивают производительность на 20–30%, снижая операционные расходы на 15–25%.
2. Профилактическое обслуживание на основе ИИ. Алгоритмы машинного обучения могут предсказывать неисправности оборудования, минимизируя простои и снижая затраты на техническое обслуживание на 40%. Системы компьютерного зрения, использующие глубокое обучение, обеспечивают контроль качества с точностью выше 99,5%.
3. Государственная поддержка и стратегии Программы, такие как немецкая «Индустрия 4.0», китайская «Сделано в Китае

2025» и индийская инициатива по производству активно способствуют внедрению автоматизации. Эти программы обеспечивают налоговые льготы, субсидии и поддержку НИОКР, стимулируя переход к интеллектуальному производству.

Сегментация рынка и перспективы роста

1. Сегмент решений.

В 2025 году этот сегмент станет лидером на рынке, что связано с увеличением внедрения решений ERP, SCADA и PLM для оптимизации производственных процессов и снижения эксплуатационных расходов.



2. Полуавтоматические системы.

Ожидается, что в 2025 году полуавтоматические системы займут наибольшую долю рынка, благодаря низким затратам на внедрение и гибкости производственных процессов. Тем не менее полностью автоматические системы будут демонстрировать более высокий рост в будущем.

Перспективы инновационных технологий

- Цифровые двойники и периферийные вычисления. Эти технологии позволяют моделировать и оптимизировать процессы, улучшая эффективность и сокращая задержки в реальном времени.
- Коллаборативная робототехника и 5G. Коботы и заводы с поддержкой 5G обеспечивают низкую задержку и улучшенную гибкость производства.

Модуль фильтрации для снижения уровня электромагнитных помех на входе преобразователей с повышенным входным напряжением

При выборе импульсных источников питания основным соображением для разработчика является уровень шумов и помех, генерируемых такими устройствами.

Кроме того, уровень допустимого шумового фона определяется чувствительностью разрабатываемой функциональной части аппаратуры и существенно зависит от конструктивного исполнения источников питания.

Квазирезонансные преобразователи напряжения 2-го поколения семейства Brick, поставляемые под торговой маркой Wibbow, генерируют существенно меньше помех по сравнению с аналогами, созданными на основе метода широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Модули также содержат внутренний LC-фильтр, обеспечивающий соответствие по уровню шумов требованиям стандартов.

Для преобразователей серий WBC300, WBB300 и WBA300, предназначенных для работы от сети постоянного тока повышенного напряжения 270 В с диапазоном изменения от 180 до 375 В, предлагается использовать на входе модуль фильтрации WBM-FIAM3M21 с целью обеспечения соответствия более строгим требованиям стандартов по генерируемым кондуктивным помехам: MIL-STD-461G категории CE101 к помехам в полосе частот 30 Гц – 10 кГц, наводимым на проводах, по которым оборудование получает мощность от источника питания; категории CE102 к помехам в полосе частот 30 кГц-10 МГц для проводов, по которым оборудование получает мощность от источников питания, не являющихся частью оборудования. Кроме этого, данный модуль также снижает восприимчивость блоков питания к кондуктивным помехам входных проводов подачи питания по требованиям CS101, CS114, CS115 и CS116.

Проходной ток модуля 3А, КПД 98%, максимальное падение напряжения 5 В (тип. значение 3 В). Устройство выдерживает воздействие импульсных напряжений 400 В длительностью 100 мс. Для дополнительной защиты от перенапряжений рекомендуется применять на входе фильтра металлооксидный варистор (MOV).



Модуль фильтрации выпускается в корпусе формата Half Brick – габариты 57,9×55,9×12,7 мм, масса 94 г. Предлагаются модули для работы в диапазоне температур от –55 до +100°C (температурный класс M), от –40 до +100°C (температурный класс H). Конструкция обеспечивает стойкость к воздействию механических ударов, случайной широкополосной вибрации и другим внешним воздействующим факторам согласно требованиям стандартов MIL-STD-810 «TEST METHOD STANDARD FOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING CONSIDERATIONS AND LABORATORY TESTS» и GJB360B-2009 «Test Methods for Electronic and Electrical Components» (соответствует MIL-STD-202 «Test Methods for Electronic and Electrical Component Parts»).

Конструктивно и функционально модуль фильтрации WBM-FIAM3M21 идентичен модели M-FIAM3M21 компании Vicor (США).



Локальная автоматика для тепловентилятора

Сергей Шишкин

В данной публикации автор представляет системы локальной автоматизации для тепловентиляторов (электрических тепловых пушек). Приводит технические решения для разных применений тепловентиляторов на базе серийных модулей локальной автоматики и на микроконтроллерах семейства AVR.

Введение

В настоящее время на рынке теплового отопительного оборудования электрические тепловентиляторы (тепловые пушки или теплогенераторы, далее ТП) являются одним из самых распространённых вариантов. ТП формируют направленный тепловой поток, который за счёт встроенного вентилятора быстро распространяется по помещению. Тепловые пушки используются практически везде, где необходимо обеспечить быстрый обогрев пространства и поддерживать температуру воздуха в течение длительного периода времени.

ТП широко применяются в строительстве, в промышленности (как исполнительный элемент в автоматизированных системах управления технологического процесса АСУ ТП), в сельском хозяйстве, при обогреве складских помещений, в быту. Их применяют часто как устройства дополнительного локального теплоснабжения. Автор сам не раз прибегал к помощи ТП для обогрева теплицы при возвратных заморозках.

Основные преимущества применения электрических ТП.

- Во время работы нет вредных выбросов от сгорания топлива. Он практически не сжигает кислород. Отсутствие пламени делает агрегат пожаробезопасным.
- Простая эксплуатация – электрическое отопительное оборудование не

требует специальной установки, особых условий, например, вентиляции или монтажа дымохода. Достаточно подключить прибор к сети с соответствующим напряжением.

- Компактность – независимо от того, цилиндрическая или прямоугольная форма у корпуса ТП, она имеет небольшие габариты по сравнению с газовыми или дизельными моделями.
- Относительно тихая работа – во время эксплуатации ТП нет раздражающего шума. Уровень звука обычно не превышает порядка 40 дБ.



Рис. 1. Внешний вид тепловентилятора КЭВ-12С40Е

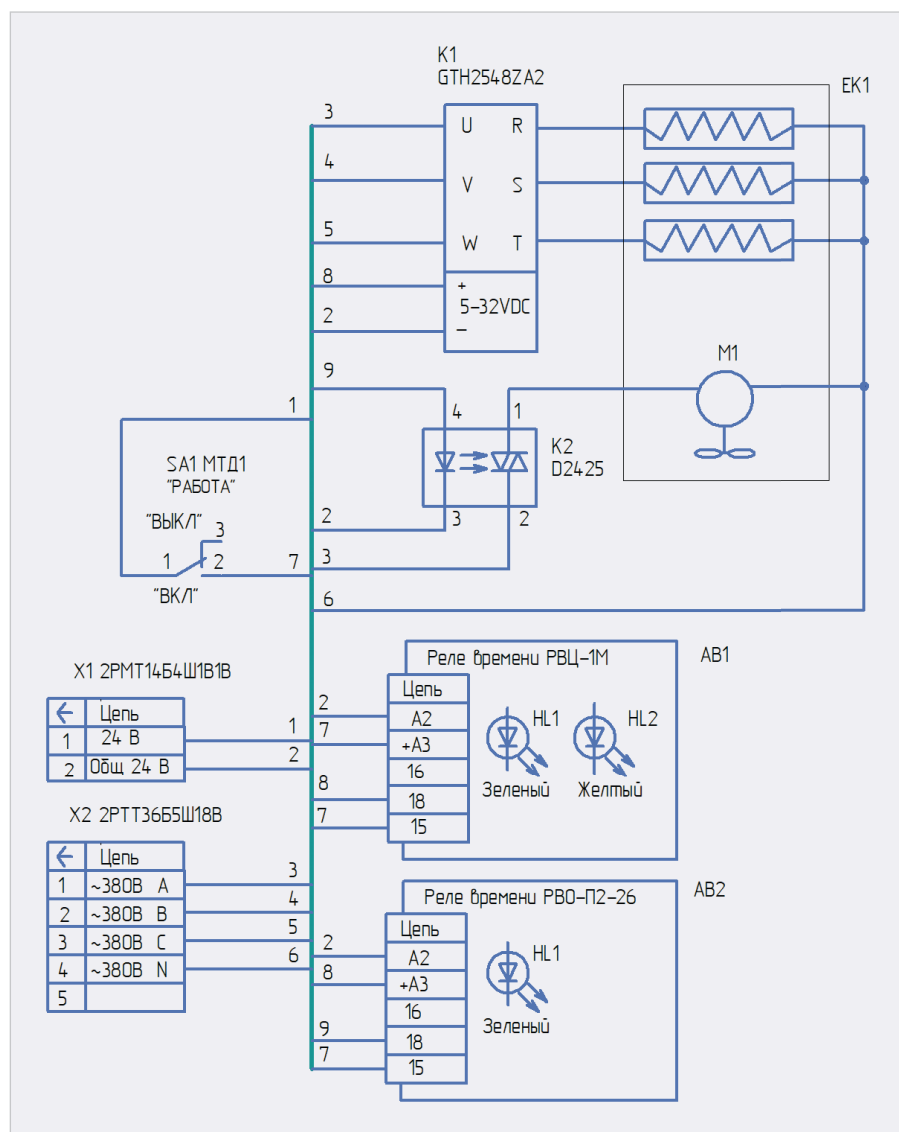


Рис. 2. Принципиальная схема устройства на базе реле времени РВЦ-1М и РВ0-П2-26 для работы ТП в циклическом режиме, с задержкой выключения вентилятора



Рис. 3. а) внешний вид реле времени РВЦ-1М, б) внешний вид реле времени РВО-П2-26

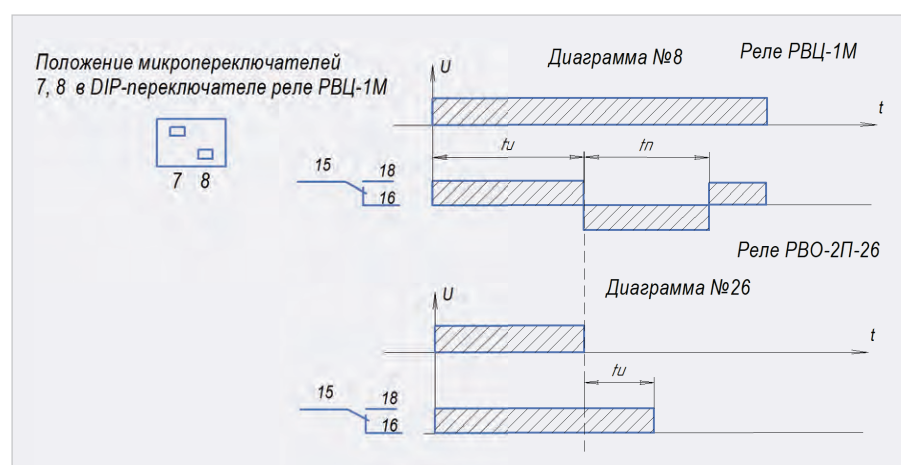


Рис. 4. Диаграммы работ устройства

Современные электрические тепловые пушки подразделяются на две категории: бытовые и промышленные.

Основным различием между ними выступает температура, до которой способен разогреться нагревательный элемент, а также скорость подачи воздуха. У моделей промышленных ТП значения этих параметров существенно выше бытовых. Мощность промышленных ТП может составлять несколько десятков кВт с питанием от трёхфазной сети напряжением 380 В. Внешний вид тепло-вентилятора типа КЭВ-12С40Е представлен на рис. 1.

В иерархии систем управления локальные системы занимают нижний уровень, однако они выполняют очень ответственные функции по управлению исполнительными

устройствами, осуществляющими непосредственное управление и регулирование производственных процессов. Применение локальной автоматики для ТП как отдельной единицы оборудования позволяет значительно расширить его функциональные возможности. Среди основных российских производителей элементов локальной автоматики можно выделить ЗАО «Меандр», г. Санкт-Петербург; ГК «Теплоприбор», г. Москва; ОВЕН, г. Москва.

Циклическое включение/выключение ТП с задержкой выключения вентилятора

Циклический режим применим там, где не нужно поддерживать точную температуру, например, в строитель-

ном вагончике или для обогрева фермы или теплицы. Достаточно «на глаз» выставить интервалы включения и выключения ТП, а впоследствии, ориентируясь на термометр внутри помещения (внутри обогреваемого объёма), увеличивать или уменьшать один из интервалов.

На рис. 2 представлена принципиальная схема устройства, которое реализует циклический режим работы ТП с задержкой выключения вентилятора.

Конструктивно мощные ТП состоят из электронагревателя (нагревательного элемента) и вентилятора. При выключении, во избежание нагрева корпуса и выхода из строя находящихся на нём элементов управления, необходимо сначала выключить электронагреватель, а потом, с некоторой задержкой, вентилятор. То есть после выключения электронагревателя производится его обдув до тех пор, пока температура на выходе тепловой пушки не снизится до безопасного значения. Понятно, что требуемая задержка выключения вентилятора зависит от технических характеристик ТП (мощность, производительность, габаритные размеры и т.д.). Устройство реализовано на базе реле времени РВЦ-1М и РВО-1М. Внешний вид реле времени РВЦ-1М, РВО-П2-26 представлен на рис. 3.

Реле времени РВЦ-1М (далее реле) предназначено для коммутации электрических цепей в циклическом режиме работы с предварительно установленными выдержками времени (паузы и импульса). Реле времени РВО-П2-26 (далее реле) предназначено для формирования задержки на включение (выключение) исполнительного реле, после снятия напряжения питания, на предварительно установленную выдержку времени. В табл. 1 представлены основные технические характеристики РВО-П2-26 и РВЦ-1М.

Более подробно работа и технические характеристики РВЦ-1М и РВО-П2-26 приведены соответственно в [1] и [2]. Номера диаграмм для РВЦ-1М и РВО-П2-26 приводятся по внутрифирменной классификации ЗАО «МЕАНДР». В устройстве для реле РВЦ-1М необходимо выбрать диаграмму № 8. Для реле РВО-П2-26 необходимо выбрать диаграмму № 26. На боковой стороне реле РВЦ-1М расположен DIP-переключатель. В данном DIP-переключателе: микропереключателями 1, 2, 3 задаётся время паузы;

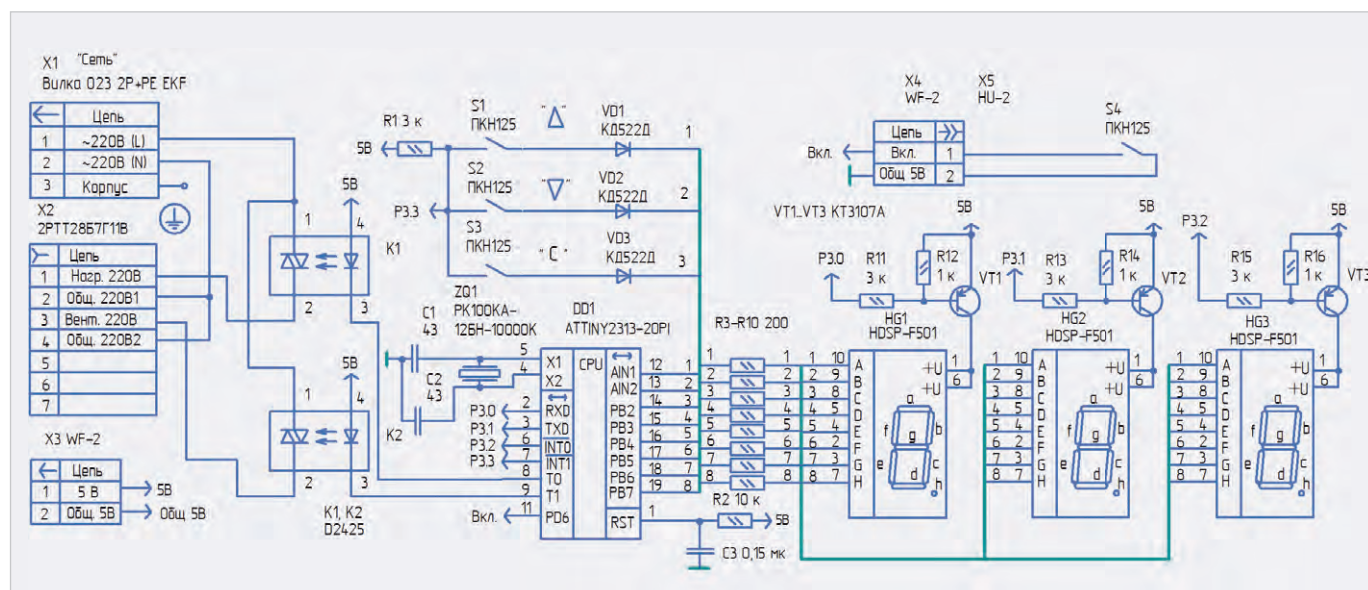


Рис. 5. Принципиальная схема реле времени для задержки выключения вентиляторов в ТП на базе микроконтроллера ATINY2313

микропереключателями 4, 5, 6 задаётся время импульса; микропереключателями 7, 8 задаётся диаграмма работы. РВЦ-1М имеет 8 поддиапазонов выдержки времени. Задание требуемой выдержки в выбранном диапазоне устанавливается поворотным переключателем, расположенным на лицевой панели в пересчёте на временной диапазон, выбранный DIP-переключателем. Смена диаграммы работы и множителей возможна только после снятия напряжения питания.

На лицевой панели реле РВО-П2-26 расположены: два кнопочных переключателя установки выдержки времени (t), значения единиц 0–9 и десятков 0–9, поворотный переключатель «МНОЖ.» для выбора диаграммы работы и временного диапазона, зелёный индикатор включения питания «U». Диаграмма работы и диапазон выдержки времени выбирается переключателем «МНОЖ.». Для каждой диаграммы можно выбрать один из трёх диапазонов выдержки времени. Требуемая выдержка времени «t» выключения вентилятора в тепловентиляторе определяется путём умножения числового значения, установленного на переключателях «единицы» и «десятки», на множитель соответствующего диапазона. Диаграмма работы № 8 для реле РВЦ-1М и положение микропереключателей 7, 8 для диаграммы № 8, а также диаграмма работы № 26 для реле РВО-П2-26 приведены на рис. 4.

С применением элементов локальной автоматики все временные интервалы можно изменить под работу конкретного ТП и условия его работы.

Функциональный узел временной задержки выключения вентилятора на микроконтроллере AVR

Принципиальная схема реле времени для задержки выключения вентиляторов в ТП на базе микроконтроллера ATINY2313 представлена на рис. 5.

Фактически устройство представляет собой таймер с обратным отсчётом времени для выключения вентилятора в ТП. Предлагаемый вариант реле времени реализует временную задержку от 1 до 999 секунд. Устройство имеет следующие функции:

- визуальный контроль и задание временного интервала на выключение вентилятора с помощью кнопок с контролем по цифровому дисплею;
- управление (включение/выключение) с клавиатуры устройства или дистанционно;
- светодиодная индикация выходных каналов;

- декремент заданного временного интервала во время обратного отсчёта при выключении ТП.

Канал управления тепловентилятором (канал управления № 1) собран на твердотельном реле К1. Данный канал управляется с вывода 8 микроконтроллера DD1. Канал управления вентилятором (канал управления № 2) собран на твердотельном реле К2. Канал управляется с вывода 9 микроконтроллера DD1. В интерфейс реле времени входят клавиатура (кнопки S1–S3) и блок индикации (дисплей) из трёх цифровых семисегментных индикаторов N1–HG3. Кнопки клавиатуры имеют следующее назначение:

S1 (Δ) – увеличение на единицу значения при установовке времени в секундах), при удержании данной кнопки в нажатом состоянии более 3 секунд значение времени, индицируемое на дисплее, увеличивается на 5 единиц за 1 секунду;

Таблица 1. Основные технические характеристики РВО-П2-26 и РВЦ-1М

№	Параметр	РВО-П2-26	РВЦ-1М
1	Напряжение питания	AC/DC 24 ±10% В AC 230 ±10% В	AC/DC 24 ±10% В AC 230 ±10% В
2	Диапазоны выдержки времени импульсы и паузы	0,1–9,9 с, 1–99 с, 0,1–9,9 мин	1–10 с, 3–30 с, 10–100 с, 1–10 мин, 3–30 мин, 10–100 мин, 1–10 ч, 3–30 ч
3	Погрешность установки выдержки времени, не более	–	10%
4	Погрешность отсчёта выдержки времени, не более	2%	2%
5	Время готовности, не более	1 с	0,15 с
6	Максимальный коммутируемый ток AC250В (AC1) / DC30В (DC1)	8 А	3 А
7	Максимальное коммутируемое напряжение	400 В	400 В
8	Диаграммы работы	26, 27, 31	7, 8, 9 и 10

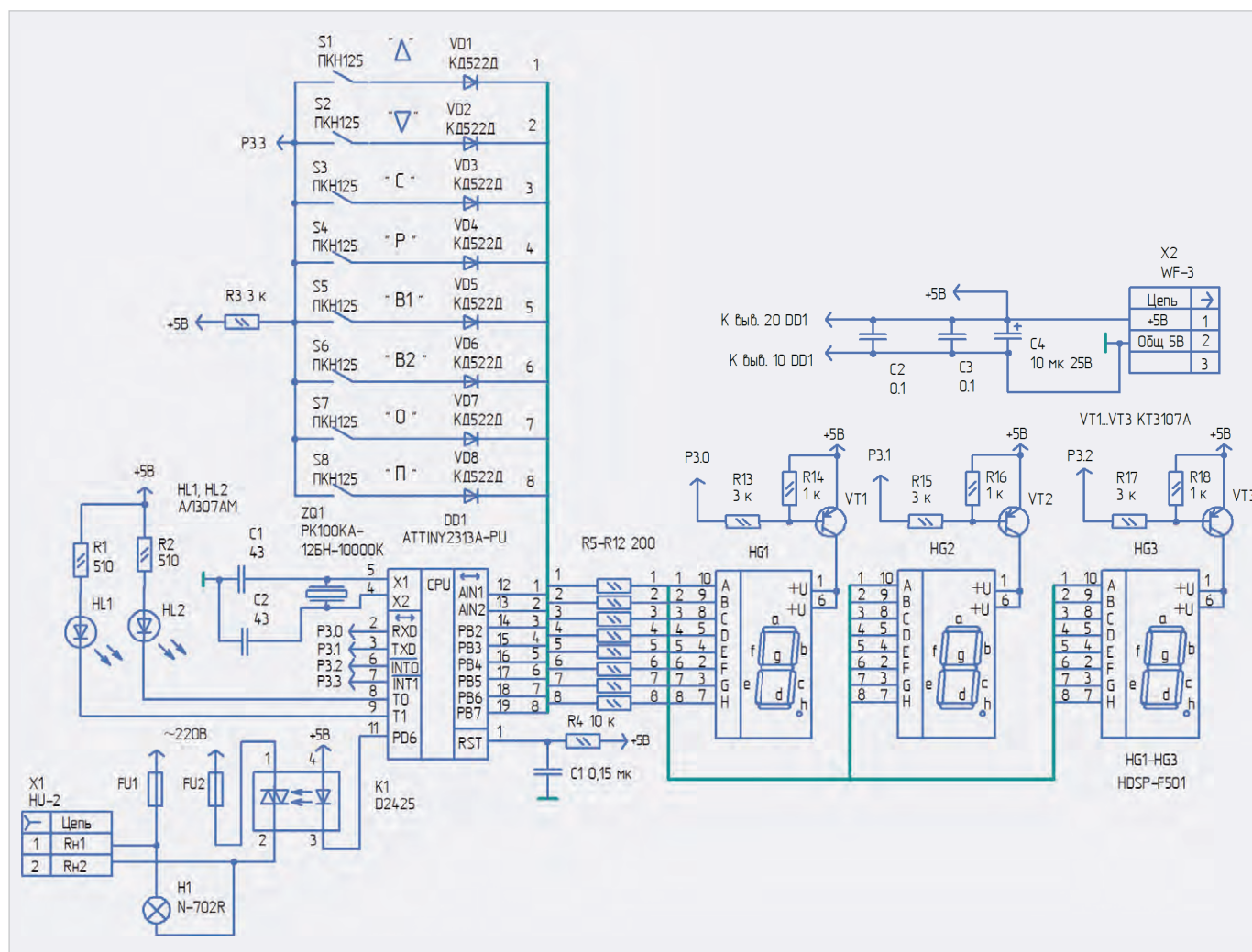


Рис. 6. Реле времени для циклического включения/выключения ТП на базе микроконтроллера ATINY2313

S2 (▽) – уменьшение на единицу значения каждого при установке времени в секундах, соответственно при удержании данной кнопки в нажатом состоянии более 3 секунд значение времени, индицируемое на дисплее, уменьшается на 5 единиц за 1 секунду;

S3 (С) – кнопка включения/выключения реле времени;

S4 – внешняя кнопка (по отношению к реле времени) дистанционного управления, по функциональному назначению данная кнопка аналогична кнопке S3.

Разряды индикации интерфейса имеют следующее назначение:

- 1 разряд (индикатор HG3) отображает единицы секунд;
- 2 разряд (индикатор HG2) отображает десятки секунд;
- 3 разряд (индикатор HG1) отображает сотни секунд.

Сразу после подачи питания на выводе 1 микроконтроллера DD1 через RC-цепь (резистор R2, конденсатор C3) формируется сигнал системного аппаратного сброса микроконтроллера

DD1. В микроконтроллере инициализируются регистры, счётчики, стек, таймер T/C1, сторожевой таймер, порты ввода/вывода, на дисплее индицируется число 001. Кнопка S4 подключается через соединитель X4 (контакты 1, 2) и подключает вывод 11 микроконтроллера DD1 к общему проводнику. Однофазный тепловентилятор со встроенным вентилятором подключается к соединителю X2. Сетевое напряжение ~220 В поступает на устройство через соединитель X1.

Алгоритм работы реле времени в рабочем цикле следующий. После инициализации на выводах 8, 9 микроконтроллера устанавливаются сигналы уровня лог. 1 (каналы № 1 и № 2 отключены). Далее кнопками S1, S2 необходимо задать временную задержку на выключение ΔT канала № 2, заданное значение индицируется на дисплее. При включении реле времени кнопкой S3 (S4) сразу включаются каналы управления № 1 и № 2 (устанавливается лог. 0 на выводах 8 и 9 микроконтроллера DD1). То есть электронагреватель и вентилятор в тепловой пушке включаются одновременно. При выключении реле времени кноп-

циализации на выводах 8, 9 микроконтроллера устанавливаются сигналы уровня лог. 1 (каналы № 1 и № 2 отключены). Далее кнопками S1, S2 необходимо задать временную задержку на выключение ΔT канала № 2, заданное значение индицируется на дисплее. При включении реле времени кнопкой S3 (S4) сразу включаются каналы управления № 1 и № 2 (устанавливается лог. 0 на выводах 8 и 9 микроконтроллера DD1). То есть электронагреватель и вентилятор в тепловой пушке включаются одновременно. При выключении реле времени кноп-

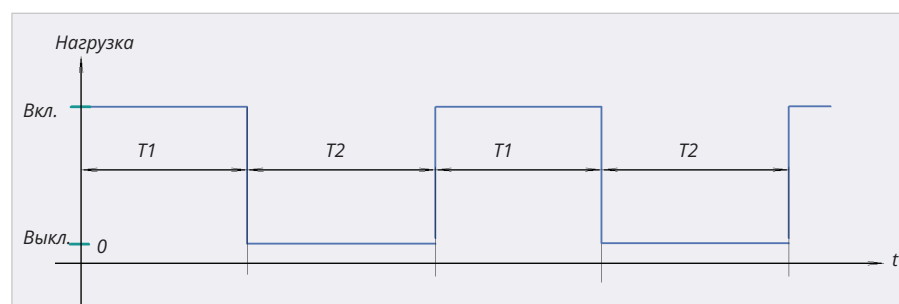


Рис. 7. Временная диаграмма рабочего цикла реле времени в рабочем режиме

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА • № 6 / 2025



Рис. 9. Внешний вид TP-M02 с датчиком температуры ТД-2

S4 (P) – (Режим). Кнопка выбора режима работы: режим № 1 или режим № 2;

S5 (B1) – (Выбор). Кнопка выбора интервалов T1 или T2;

S6 (B2) – (Выбор). Кнопка выбора временного режима работы: минуты или секунды. В режиме минуты включён сегмент h индикатора HG2. В режиме секунды – сегмент h индикатора HG2 выключен;

S7 (O) – (Обнуление). Кнопка экстренного обнуления заданных параметров T1 и T2 и выключения нагрузки;

S8 (B3) – (Вкл/Выкл). Кнопка принудительного (ручного) включения/выключения нагрузки, вне зависимости от того, в каком режиме находится устройство, каждое нажатие данной кнопки меняет состояние нагрузки на противоположное. Данная кнопка необходима для проверки работоспособности канала управления нагрузкой, а также для включения нагрузки в режиме № 2 в интервал времени T2;

HL1 – индикатор режима работы устройства: HL1 горит – режим № 2, HL1 погашен – режим № 1;

HL2 – индикатор интервалов T1 и T2. Если HL1 горит, то на дисплее индицируется интервал T1, если HL1 погашен, то на дисплее индицируется интервал T2.

Разряды индикации интерфейса имеют следующее назначение:

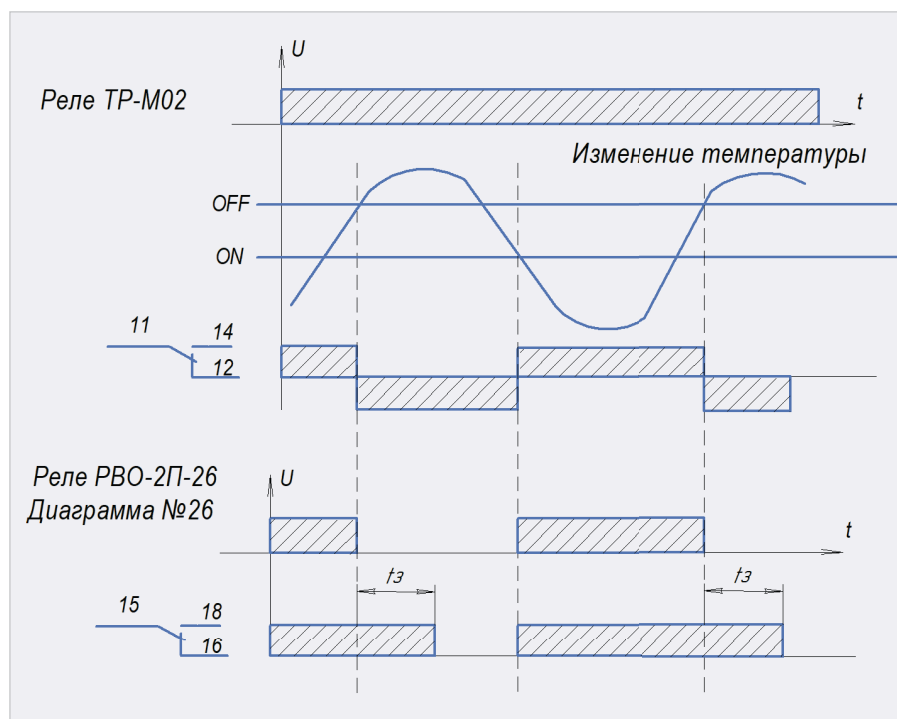


Рис. 10. Временная диаграмма рабочего цикла устройства

1 разряд (индикатор HG3) отображает единицы минут (единицы секунд) интервалов T1 и T2;

2 разряд (индикатор HG2) отображает десятки минут (десятки секунд) интервалов T1 и T2;

3 разряд (индикатор HG1) отображает сотни минут (сотни секунд) интервалов T1 и T2. Лампочка H1 позволяет визуально контролировать факт подключения ТП к сетевому напряжению. Чтобы запустить устройство, необходимо задать интервалы T1, T2, перевести его в режим № 2 и нажать кнопку S3 (C) или S4. В режиме 2 точка h индикатора HG3 мигает периодически, один раз в секунду.

Контроль и поддержание заданной температуры

Контроль и поддержание заданной температуры – классическая задача в

АСУ ТП, где как исполнительный элемент может быть задействован тепло-вентилятор. Есть огромное множество задач, в которых заданная температура должна поддерживаться определённое время. Для решения таких задач, как правило, применяются программные терморегуляторы (или измерители-регуляторы). Но в некоторых случаях может оказаться более «красивым» или более дешёвым применение обычного термореле и реле времени. Принципиальная схема устройства для контроля и поддержания температуры на базе термореле TP-M02 (далее TP-M02) и реле времени РВО-П2-26 представлена на рис. 8.

Внешний вид TP-M02 с датчиком температуры ТД-2 представлен на рис. 9.

В табл. 2 представлены основные технические характеристики TP-M02.

Таблица 2. Основные технические характеристики TP-M02

№	Параметр	TP-M02 AC/DC 36–265 В	TP-M02 AC/DC 10–30 В
1	Номинальное напряжение питания	AC/DC 36–265 В	AC/DC 10–30 В ±10%
2	Диапазон контролируемых температур	–55...+125°C	
3	Погрешность измерения температур: • в диапазоне –10...+85°C • в остальном рабочем диапазоне	± 0,5°C ± 2°C	
4	Температурный гистерезис	Задается пользователем	
5	Время готовности, не более	2,5 с	
6	Максимальный коммутируемый ток AC 250 В (AC1) / DC 30 В (DC1)	16 А	
7	Максимальное коммутируемое напряжение	400 В пер. ток, 1/5 А	



Рис. 11. Внешний вид GSM-контроллера RTU5024

Более подробно работа и технические характеристики TP-M02 приведены в [3]. Реле TP-M02 предназначено для контроля и поддержания заданного температурного режима по сигналам датчика температуры, выполненного на базе микросхемы DS18B20 Dallas Semiconductor (Maxim). В TP-M02 при нажатии кнопки «+» на индикаторе отображается значение температуры порога ON. При нажатии кнопки «-» на индикаторе отображается значение температуры порога OFF. Температурное реле поставляется в комплекте с датчиками ТД-2 или ТД-3, в состав которых и входит DS18B20. Временная диаграмма рабочего цикла устройства в рабочем режиме приведена на рис. 10.

Реле времени РВО-П2-26 отключает вентилятор М1 в тепловентиляторе с установленной задержкой тз. Следует отметить, что РВО-П2-26 может работать и в режиме охлаждения. Перевести его в данный режим из режима нагрева или наоборот совсем нетрудно при помощи двух кнопок интерфейса управления.

Удалённое управление с помощью GSM-контроллера

Управлять ТП (включить/выключить) можно и удалённо с помощью GSM-контроллера (контроллер-реле). Например, таких как RTU5024, КСИТАЛ GSM и пр. На рис. 11 приведён внешний вид GSM-контроллера RTU5024.

В табл. 3 представлены основные технические характеристики RTU5024.

На рис. 12 показан фрагмент принципиальной схемы подключения клемм Relay Out GSM-контроллера к

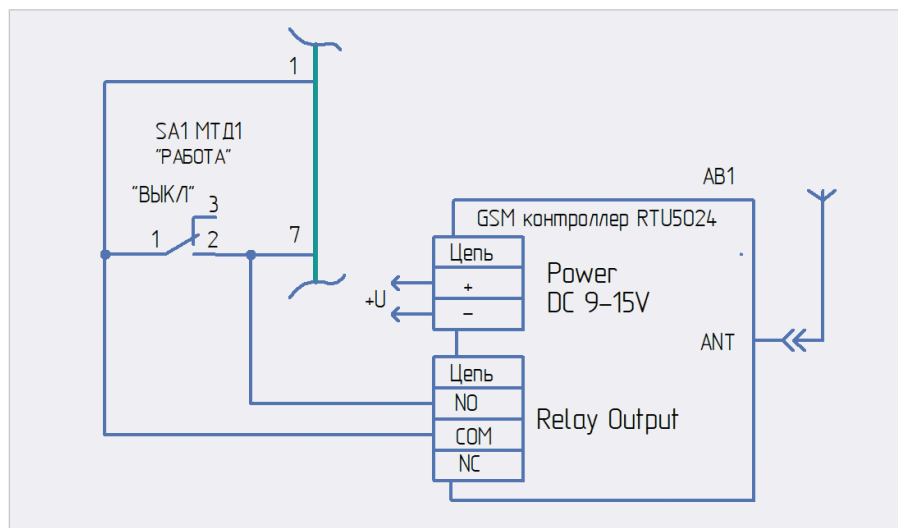


Рис. 12. Фрагмент принципиальной схемы подключения клемм Relay Out GSM-контроллера в устройстве для удалённого управления

тумблеру SA1 «Работа». Данный тумблер задействован в устройствах, приведённых на рис. 2 и 8.

Клеммы Relay Out GSM-контроллера подключены параллельно контактам SA1. То есть реализована возможность как ручного управления тумблером SA1, так и с помощью RTU5024.

RTU5024 – устройство, которое реализует удалённое управление (включить/выключить) различного оборудования по бесплатному звонку с мобильного телефона. После установки SIM-карты в RTU5024 необходимо выполнить процедуру установки и настройки устройства, которая заключается в смене пароля и в настройках функций управления.

Заключение

Несмотря на всё большее распространение более интеллектуальных устройств, рынок модулей локальной автоматизации с несложным алгоритмом работы по-прежнему обширен.

Для решения сравнительно несложных задач для управления ТП в АСУ ТП или в быту вполне оправдано применение таких электронных компонентов локальной автоматизации, как реле времени, реле температуры, GSM контроллер-реле и пр. Устройства управления (блоки управления) на базе вышеуказанных электронных компонентов отличает несложный интерфейс управления, ремонтпригодность, удобная эксплуатация и обслуживание. Локальная автоматизация ТП – это минимальная инвестиция, расширяющая возможности ТП в новом или уже реализованном проекте. Применение элементов локальной автома-

Таблица 3. Основные технические характеристики контроллера RTU5024

№	Параметр	RTU5024
1	Напряжение питания	9–24 В DC
2	Релейный выход: • максимальный коммутируемый ток • тип	3 А / 240 В НЗ/НО
3	SIM-карта	Поддержка 3-вольтовых SIM-карт
4	Антенна	50 Ом, разъём SMA

тики для управления ТП значительно увеличивает функциональные возможности последних. Если вскрыть корпуса отечественных модулей локальной автоматизации, то можно обнаружить, что многие из них выполнены на микроконтроллерах (семейства PIC, AVR и др.). То есть в некоторых случаях в целях унификации при разработке блоков управления для конкретной АСУ ТП у конструктора есть выбор – либо купить готовые модули, либо разработать функциональные узлы на той же элементной базе.

Литература

1. Реле времени РВЦ-1М ТУ 3425-003-31928807-2014. Руководство по эксплуатации.
2. Реле времени РВО-П2-26 ТУ 3425-003-31928807-2014. Руководство по эксплуатации
3. Термореле TP-M02 ТУ 3425-003-31928807-2014. Руководство по эксплуатации.
4. URL: www.meandr.ru.



Современная электроника и искусственный интеллект

Часть 3. Новые процессорные модули ведущих производителей для систем искусственного интеллекта

Виктор Алексеев

Основное направление разработок новых аппаратных средств, предназначенных для искусственного интеллекта, связано с поисками возможного компромисса между увеличением вычислительных мощностей и энергопотреблением. Эксперты отмечают, что в настоящее время наблюдается отход от доминировавшей несколько последних лет тенденции наращивания вычислительных мощностей в центрах обработки данных. В противовес этому конструкторы стараются найти решения, позволяющие конструировать новые ИИ-модели более продвинутыми, но с меньшими затратами. В статье описаны новые электронные компоненты для моделей ИИ трёх лидирующих на этом рынке компаний: NVIDIA, AMD и Cerebras.

Введение

Если оценивать в общих чертах новинки аппаратной части систем искусственного интеллекта (АПИИ), то можно выделить две основные линии развития: оптимизацию энергопотребления и снижение затрат на разработку и эксплуатацию [1].

Лидеры индустрии производства АПИИ стараются усовершенствовать свои модели за счёт лучшей пропускной способности памяти и увеличенных скоростей обработки данных. В основном это достигается с помощью использования передовых технологий [2].

В то же время флагманские ускорительные модули, например NVIDIA (B200, B300), обладая огромной вычислительной мощностью, потребляют значительное количество энергии и не всегда оптимальны для решения специфических задач ИИ [3].

Несмотря на доминирование нескольких крупных компаний, рынок аппаратных решений ИИ остаётся динамичным и открытым для инноваций. Этот факт можно объяснить несколькими причинами. Лидеры рынка больше заинтересованы в расширении своей существующей экосистемы, чем в радикальных инновациях, потенциально подрывающих их основной бизнес. Разработка новых архитектур требует огромных

инвестиций в НИОКР, что ограничивает скорость инноваций у крупных игроков. Поэтому такие концерны, как NVIDIA и AMD, фокусируются на высокодоходных сегментах центров обработки данных. При этом многие другие направления, например периферийные вычисления и специализированные решения, остаются недостаточно разработанными.

Всё вышеперечисленное создаёт прекрасные стартовые условия для многочисленных начинающих фирм, старающихся заполнить образовавшиеся ниши. Важно то, что такие небольшие фирмы стараются создавать решения «под ключ», включающие как

аппаратное, так и программное обеспечение. Такой подход позволяет стартапам получить определённые преимущества по сравнению с универсальными решениями флагманских концернов этой индустрии [4].

В целом аппаратное обеспечение ИИ становится быстрее, дешевле и экономичнее. Новые электронные компоненты и блоки, появившиеся в 2024–2025 годах, значительно расширяют возможности ИИ, улучшая производительность, эффективность и компактность компьютеров и вычислительных центров.

Современная ситуация и неутешительные прогнозы вызывают необходимость создания нового поколения энергоэффективных электронных компонентов, предназначенных для искусственного интеллекта.

Новые ускорители графических процессоров корпорации NVIDIA

Корпорация NVIDIA на сегодняшний день считается мировым лидером в разработке и производстве ускорителей графических процессоров, мощных серверов и кластеров для

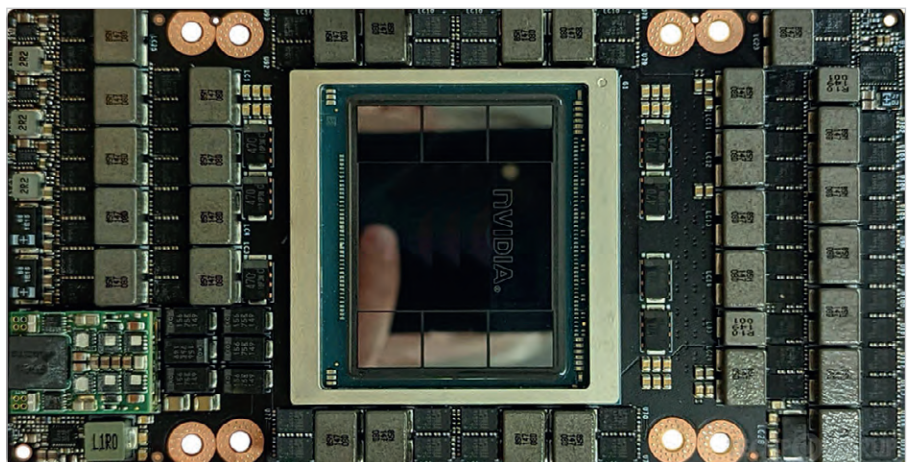


Рис. 1. Ускоритель графического процессора B100 выпускается в форм-факторе SXM5

ИИ дата-центров. О доминировании NVIDIA можно судить по объёму продаж в этом сегменте рынка. Рыночная капитализация (FY) на конец финансового 2025 года (май 2025 года) составляла около трёх с половиной триллионов долларов США. Эта цифра сравнима с бюджетами таких развитых стран, как, например, Канада. Причём по сравнению с 2022 годом рост FY составил примерно 230%, что напрямую связано со взрывным характером развития искусственного интеллекта [5].

Подробно историю развития этой фирмы и описание всей номенклатуры выпускаемой продукции можно найти, например, на сайте [6].

Ускоритель NVIDIA B100 AI B200 Accelerator компания NVIDIA представила в 2024 году в рамках рекламы следующего поколения микроархитектуры графических процессоров Next-Generation B200 Microarchitecture Blackwell [7].

Имеет смысл пояснить название этого устройства, которое чаще всего употребляют сами изготовители. Термин «B200 Accelerator» обозначает устройство, которое позволяет увеличить производительность графического процессора, используя возможности параллельной обработки в дополнение к центральному процессору CPU. В англоязычных статьях часто оставляют только слово «Accelerator». Однако лучше полностью переводить этот термин как «ускоритель графического процессора» – УГП.

Ускоритель графического процессора NVIDIA B100 представляет собой базовую версию архитектуры Blackwell, специально разработанную для организаций, которые хотят модернизировать свои существующие системы без значительных изменений в инфраструктуре энергоснабжения и охлаждения [8].

Ускоритель ГП B100 выпускается в форм-факторе SXM5, совместимом с предыдущей моделью H100 по интерфейсу и мощности потребления (700 Вт), что позволяет использовать его в качестве переходной модели на новую технологию (рис. 1).

УГП B100 совместим с предыдущей моделью H100.

При этом у B100 производительность (FP8 Tensor) 4500 Тфлопс значительно выше, чем у H100 (2000 Тфлопс для INT8 или 1000 Тфлопс для FP16 Tensor Core) [9].

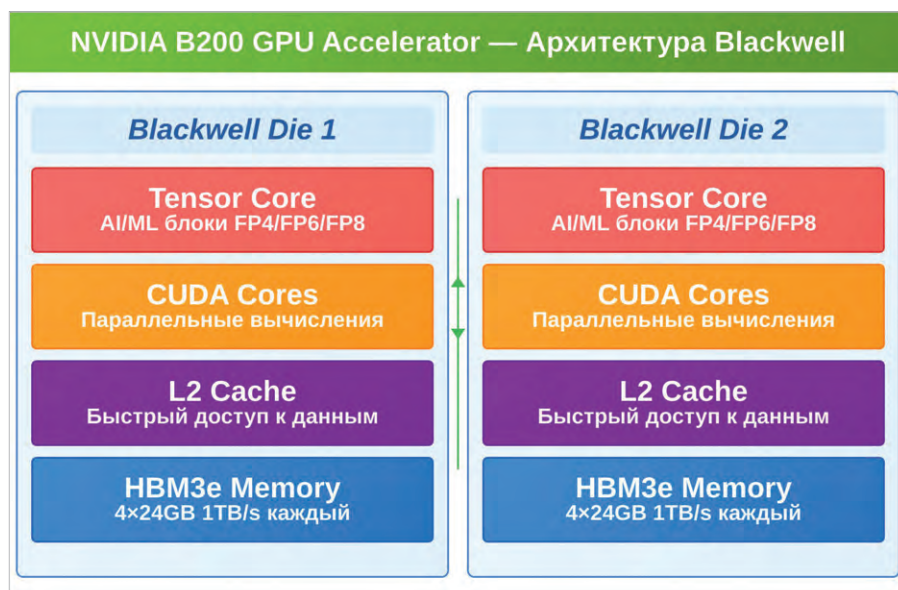


Рис. 2. Упрощённая схема архитектуры УГП «Blackwell B200 AI B200 Accelerator»

Специализированный форм-фактор Server PCI Express Module – SXM разработан NVIDIA для высокопроизводительных вычислений в центрах обработки данных. Это модуль с прямым разъёмом, обеспечивающий лучшую подачу питания, охлаждение и более высокую пропускную способность по сравнению с традиционными графическими PCIe-картами.

Ускоритель ГП обладает 192 Гбайт памяти HBM3e с пропускной способностью до 8 Тбайт/с, что в 2,4 раза превышает пропускную способность памяти H100. Эта существенная разница особенно важна для инференса больших языковых моделей, где производительность часто ограничена именно пропускной способностью памяти [10].

NVIDIA Blackwell B200 AI B200 Accelerator – новый ускоритель графического процессора, который поступил в коммерческую продажу в 2025 году. Полные физические параметры нового ускорителя графического процессора B200 не разглашаются в открытых источниках. Известно только, что этот УГП выполнен в стандарте 6-го поколения NVIDIA Server PCI Express Module – SXM6 [11].

Понять, насколько большой B200, можно по описанию предыдущей модели H100, которая имеет габариты 260×110×347 мм и вес 1,7 кг [12].

Новая архитектура Blackwell является преемником предыдущих версий NVIDIA Hopper и Ada Lovelace, однако отличается от них как по назначению, так и по техническому исполнению [13].

Несмотря на то что версия Hopper (H100/H200) также построена на 4-нм

техпроцессе, она рассчитана на меньшее количество транзисторов: около 80 миллиардов в H100. Для более ясного представления о преимуществах Blackwell следует напомнить, что означают используемые в ИИ форматы данных. Числовые форматы FP16, FP8, FP4 определяют соответственно 16-битное, 8-битное и 4-битное числа с плавающей точкой.

Специальный формат BF16 – это упрощённая версия FP16, разработанная для задач ИИ, в которых можно отбрасывать мелкие детали. Другой особый ИИ-формат INT8 предназначен для работы с числами без дробной части.

Архитектура Blackwell поддерживает форматы FP16, FP8, FP4 и INT8, что даёт возможность ускорить вычисления с меньшей точностью, не критичной для ИИ. Так, например, Blackwell позволяет достичь 4-кратного прироста производительности для инференса LLM по сравнению с Hopper, оптимизированного для FP16 и BF16.

Главное архитектурное отличие архитектуры Blackwell, по сравнению с предыдущей версией NVIDIA Hopper H100, заключается в том, что B200 построен по схеме двух кристаллов (Dual-Die), соединённых высокоскоростным интерфейсом NV-HBI (NVIDIA High Bandwidth Interface), что позволяет им функционировать как единый ускоритель ГП.

Максимальная площадь кристалла для технологии TSMC 4NP составляет примерно 860 мм². В конструкции старой версии ускорителя ГП H100 была использована практически вся

доступная площадь (814 мм²) базового кристалла. Поэтому в ускорителях B100/B200 использовано два кристалла, позволивших удвоить вычислительную мощность.

Интерфейс NV-HBI с пропускной способностью 10 Тбайт/с обеспечивает полную когерентность кэша, единое адресное пространство памяти и прозрачность для программного обеспечения.

Упрощённая схема архитектуры УГП Blackwell B200 AI B200 Accelerator показана на рис. 2.

Технология Tensor Core NVIDIA предназначена для ускорения вычислений с использованием смешанной точности, что особенно важно в задачах искусственного интеллекта. По существу, Tensor Cores представляют собой специализированные вычислительные ядра в ускорителе B200, предназначенные специально для работы с ИИ.

Особенность Tensor Cores заключается в том, что они могут выполнять сразу много параллельных операций, например, одновременно умножать целые матрицы за один такт. Кроме того, эти ядра используются для операций с низкой точностью (FP16, FP8, FP4), обучения нейронных сетей, а также для инференса AI-моделей. По сравнению с предыдущими версиями УГП ядра в Blackwell Ultra Tensor Cores обеспечивают ускорение слоёв внимания (Attention-Layer) в два раза больше (для формата FP8) и в полтора раза больше для операций с плавающей запятой (FLOPS) [2].

Кроме ядер Tensor Cores, ответственных за сложные параллельные вычисления, в структуре Blackwell B200 существуют ядра CUDA Cores, выполняющие простые последовательные математические операции. Кроме обычной арифметики (сложение, умножение, деление) CUDA Cores используются для тривиальных графических вычислений, физической симуляции, криптографии, а также для любых других вычислительных задач, которые можно решать по шагам.

Высокоскоростная буферная L2 кэш-память (L2 Cache Memory) предназначена для ускорения доступа к часто используемым данным, что снижает задержки при обращении к основной памяти. Кроме того, она может быть использована как когерентный кэш между двумя кристаллами.

Кэш L2 в ускорителях графических процессоров NVIDIA является важным

компонентом, повышающим производительность, особенно в задачах глубокого обучения.

В новых ускорителях B200 NVIDIA используется High Bandwidth Memory 3E Stacks (HBM3e), сверхбыстрая основная память. Эта память в конфигурации 8 стеков по 24 Гбайт каждый (всего 192 Гбайт) имеет пропускную способность 8 Тбайт/с (по 1 Тбайт/с на стек). В качестве интерфейса используется 1024-битная шина данных на каждый стек.

В ускорителях ГП B200 применяется технология ускорения работы моделей NVIDIA Transformer Engine TE 2.0 второго поколения, которая позволяет автоматически выбирать оптимальный формат. Важно то, что новая версия поддерживает форматы низкой точности, такие как FP6 и FP4, что даёт возможность в ряде случаев значительно повышать эффективность обработки данных. Эта технология предоставляет инструменты для повышения производительности глубокого обучения GLM/LLM. Например, в её комплекте есть библиотека с открытым исходным кодом NVIDIA TensorRT-LLM, позволяющая создавать и оптимизировать LLM, используя простой API на Python.

Основные технические характеристики новой модели B200 в сравнении с предыдущей версией H100 приведены в табл. 1.

Из других важных особенностей Blackwell B200 следует отметить систему безопасности Trusted Execution Environment (TEE-I/O), которая обеспечивает защиту ИИ-моделей и интеллектуальной собственности, поддерживая конфиденциальную

вычислительную среду как на самом ускорителе ГП, так и на хостах [14].

Ускоритель графического процессора B200 является в настоящее время флагманской моделью, на основе которой NVIDIA производит серверные платы, законченные серверы, кластерные серверные стойки.

УГП Blackwell B200 выпускаются в форм-факторе SXM6, который рассчитан на более высокие значения мощности и пропускной способности. Этот модуль SXM6 с памятью 192 Гбайт HBM3e и высокой скоростью обмена через NVLink ориентирован на классические серверные платформы.

Данный стандарт NVIDIA SXM6 поддерживает как воздушное, так и жидкостное охлаждение.

NVIDIA B300 Blackwell Ultra – это следующая модель ускорителей графических процессоров, которую NVIDIA анонсировала в марте 2025 года, и ожидается эта модель к выпуску во второй половине 2025 года [15].

Официального детального технического описания для B300 от NVIDIA пока нет. На сайте NVIDIA есть только общая информация о продуктах B300, DGX B300 и GB300, но без точных технических спецификаций.

Поэтому ниже приведена только краткая информация, доступная на сегодняшний день на других сайтах партнёров NVIDIA.

Новый УГП B300 предназначен для инференса сложных задач, когда ИИ должен сначала «подумать», проанализировать несколько вариантов решения, а потом выбрать лучший.

Этот ускоритель ГП B300 изготовлен по той же технологии TSMC 4NP, что и рассмотренный выше B200. Однако

Таблица 1. Основные технические характеристики B200 и H100

Характеристика	NVIDIA B200	NVIDIA H100
Архитектура	Blackwell	Hopper
Год выпуска	2025	2022
Техпроцесс	TSMC 4NP (enhanced 4N)	TSMC 4N
Количество транзисторов	208 млрд	80 млрд
Конфигурация	Двухкристальная (Dual-Die)	Однокристальная
Форм-фактор	SXM6	SXM5
Память B200	192 Гбайт HBM3e	80 Гбайт HBM3
Пропускная способность памяти	До 8 Тбайт/с	3,35 Тбайт/с
Производительность FP32	80 Тфлопс	67 Тфлопс
Тензорная производительность FP32	2,2 Пфлопс	500 Тфлопс
Тензорная производительность FP16/BF16	4,5 Пфлопс	1 Пфлопс
Поддержка FP8	Да (10 Пфлопс)	Да (2 Пфлопс)
Поддержка FP4	Да (20 Пфлопс)	Нет
Максимальное энергопотребление	1000 Вт	700 Вт
Поколение NVLink	5-е поколение	4-е поколение
Transformer Engine	2-е поколение	1-е поколение

ряд изменений в архитектуре позволил заметно улучшить его параметры.

Прежде всего, использована новая 12-слойная HBM3E память B300 Blackwell Ultra объёмом 288 Гбайт. Это критично для работы с крупнейшими языковыми моделями, которые имеют триллионы параметров [16].

Кроме того, B300 может работать с производительностью до 15 петафлопс в формате FP4. Однако при этом увеличилась мощность до 1400 Вт (TDP) [17].

В отличие от B200, которые комплектуются ConnectX-7 (до 400 Гбит/с), B300 использует ConnectX-8, где NVIDIA интегрировала дополнительные функции в сетевой интерфейс, уменьшив таким образом зависимость от сторонних чипов (например, PCIe Retimer).

Ускоритель ГП B300 разработан в новом конструктиве, получившем название SXM Puck благодаря тому, что по форме напоминает шайбу (Puck). Он объединяет УГП, высокоскоростную память HBM3e и другие компоненты в компактный, высокоэффективный блок, который легко интегрируется в серверные системы.

Этот модуль позволяет легко собирать, заменять или обновлять УГП в серверах, как конструктор LEGO. Модуль можно также вставить в большую систему, например, NVIDIA HGX, DGX или GB300 NVL72. Такой подход значительно упрощает создание и ремонт мощных ИИ-кластеров.

Увеличение мощности потребовало использования в конструктиве SXM Puck оптимизированного жидкостного охлаждения. В этой новой схеме используются жидкостные охлаждающие пластины для прямого отвода тепла от B300, а также усовершенствованные разъёмы UQD (Universal Quick Disconnect), предназначенные для быстрого подключения системы охлаждения. Специальные стойки с переключенными каналами охлаждения позволяют разместить больше УГП в кластере, а также интегрировать модули в такие системы, как NVIDIA MGX.

Платформа HGX B200 представляет собой первую ступеньку в линейке систем масштабирования устройств на основе ускорителей ГП Nvidia. Однако сама по себе HGX B200 – это своего рода основа будущего устройства, в которой нет центрального процессора CPU, но есть посадочные места под них, а также под другую периферию.

Отсутствие в комплекте поставки центрального процессора объясняется

Таблица 2. Варианты конфигураций HGX B200 с разными количествами УГП

B200, шт.	CPU	RAM (ГБ)	Память HBM3e (ГБ)	Количество необходимых линий PCIe 5.0
1	1x Intel Xeon 6960P (72 ядра)	250	180	16–32
1	1x AMD EPYC 9124 (16 ядер)	250	180	16–32
2	1x Intel Xeon 6952P (96 ядер)	~500	360	32–64
2	1x AMD EPYC 9224 (24 ядра)	~500	360	32–64
2	2x Intel Xeon 6952P (96 ядер каждый)	~500	360	64–128
2	2x AMD EPYC 9224 (24 ядра каждый)	~500	360	64–128
4	2x Intel Xeon 6979P (120 ядер каждый)	~750	720	64–128
4	2x AMD EPYC 9655 (96 ядер каждый)	~750	720	64–128
8	2x Intel Xeon 6980P (128 ядер каждый)	~1000	1440	128–256
8	2x AMD EPYC 9965 (192 ядра каждый)	~1000	1440	128–256

тем, что это даёт заказчикам возможность подобрать CPU под свои конкретные задачи с необходимой именно им архитектурой.

Поэтому партнёрские компании, такие как, например, Supermicro, ASUS, Lenovo или DataCrunch, добавляют CPU, память и другие необходимые комплектующие детали. Как правило, HGX B200 комплектуется CPU Intel Xeon 6 6900 или AMD EPYC серии 9004/9005 [18].

Наиболее распространённый и стандартный вариант платформы HGX B200, предназначенный для максимальной производительности в задачах ИИ, обучения моделей и инференса, включает восемь УГП NVIDIA B200.

Ключевой особенностью HGX B200 является использование NVLink 5.0 с пропускной способностью 1,8 Тбайт/с между ускорителями. Это позволяет всем восьми B200 функционировать как единый вычислительный комплекс, превосходящий по техническим возможностям традиционные структуры с PCIe-соединениями.

Платформа HGX B200 поддерживает воздушное или жидкостное охлаждение (например, в Lenovo ThinkSystem SR780a V3 с водяным охлаждением Lenovo Neptune). Конфигурация 8×B200 представляет собой оптимальный вариант для обучения больших языковых моделей (LLM), аналитики данных и выполнения сверхсложных глобальных вычислительных задач [19].

Платформа NVIDIA Blackwell HGX B200 заметно превосходит предшествовавшую модель NVIDIA HGX H100 по базовым параметрам:

- 15-кратное увеличение скорости инференса в реальном времени;
- 12-кратное снижение стоимости эксплуатации и энергопотребления;
- 3-кратное ускорение обучения больших языковых моделей благодаря движку Transformer Engine второго поколения с форматом FP8 [8].

Платформа HGX B200 поддерживает современные сетевые технологии NVIDIA, включая NVIDIA BlueField-3 B3140N VPI 400GbE и NVIDIA ConnectX-7 NDR OSFP400 InfiniBand. Кроме того, использование NVIDIA Quantum-2 InfiniBand и Spectrum-X Ethernet позволяет работать с сетевыми скоростями до 400 Гбит/с, обеспечивая эффективное масштабирование на уровне дата-центра.

Для менее требовательных задач или компактных систем, где не нужна такая высокая производительность, разработаны варианты с меньшим количеством ускорителей графических процессоров (1, 2, 4) [20].

В табл. 2 приведены варианты конфигураций HGX B200 с разными количествами УГП для CPU серий Intel Xeon 6 6900 и AMD EPYC 9004/9005 [21].

Важно подчеркнуть, что выбор того или иного CPU определяется количеством линий PCIe 5.0, необходимых для поддержки 1, 2, 4 и 8 ускорителей графических процессоров B200.

Платформу NVIDIA HGX B300 на базе рассмотренного выше нового УГП Blackwell Ultra SXM NVIDIA планирует выпустить в коммерческую продажу во второй половине 2025 года. Детальной технической информации пока нет. На сайте NVIDIA приведены только сравнительные технические характеристики HGX B300 и HGX B200, которые показаны в табл. 3.

Использование нового ускорителя ГП позволило значительно улучшить такие параметры HGX B300, как FP4 Tensor Core, INT8 Tensor Core, FP64/FP64 Tensor Core, общую память, пропускную способность сети.

Для ускорения вычислений и генеративного ИИ, кроме NVLink, используются высокоскоростные соединения InfiniBand, Spectrum-X Ethernet. Помимо того, HGX B300 оснащён NVIDIA BlueField-3 DPUs, который предназна-

чен для гипермасштабируемых облаков ИИ.

О своих разработках на базе нового HGX B300 сообщили партнёры NVIDIA. Так, 29 апреля 2025 года была опубликована информация о NVIDIA HGX B300 NVL16, содержащем шестнадцать B300 [22].

NVIDIA DGX B200 – это полностью готовый к использованию сервер, который включает ускорители графических процессоров Blackwell B200, управляющий процессор x86 и всё необходимое оборудование для работы с различными задачами искусственного интеллекта. Сервер NVIDIA DGX B200 построен на платформе HGX B200 с ускорителями графических процессоров Blackwell B200 [23].

Полностью готовый к работе сервер DGX B200 имеет в своём составе серверный блок HGX B200, процессор x86 CPU, а также всю необходимую периферию. На рис. 3 показан внешний вид материнской серверной платы DGX B200.

На рис. 3 цифрами показано следующее.

1. SSD-накопители формата M.2 для ОС сервера (сверху) и BlueField-3 DPU (Data Processing Unit) (снизу) – специальный процессор для обработки сетевого трафика.
2. Интерфейс для подключения дополнительных плат расширения (сетевые карты, накопители и др.), разъём PCIe-карт для слотов 2 и 4.
3. Высокоскоростные сетевые модули для соединения серверов в кластере, QSFP-трансиверы для внешней сети ConnectX-7.
4. Сетевая карта 100Gb Ethernet (сверху) и сетевое хранилище BlueField-3 DPU (снизу), обеспечивающие подключение к внешней сети и управление сетевым трафиком.
5. Дополнительные слоты для плат расширения, разъём PCIe-карт для слотов 1 и 3.
6. Оперативная память сервера, 32x 64 Гбайт или 128 Гбайт, модули DIMM общим объёмом до 4 Тбайт.
7. Специализированные сетевые контроллеры ConnectX-7 для высокоскоростной передачи данных между ускорителями ГП.
8. Центральная плата, которая соединяет все компоненты сервера и обеспечивает их питанием.
9. Специальные кабели DensiLink для подключения внутренних сетевых карт к внешним разъёмам сервера.

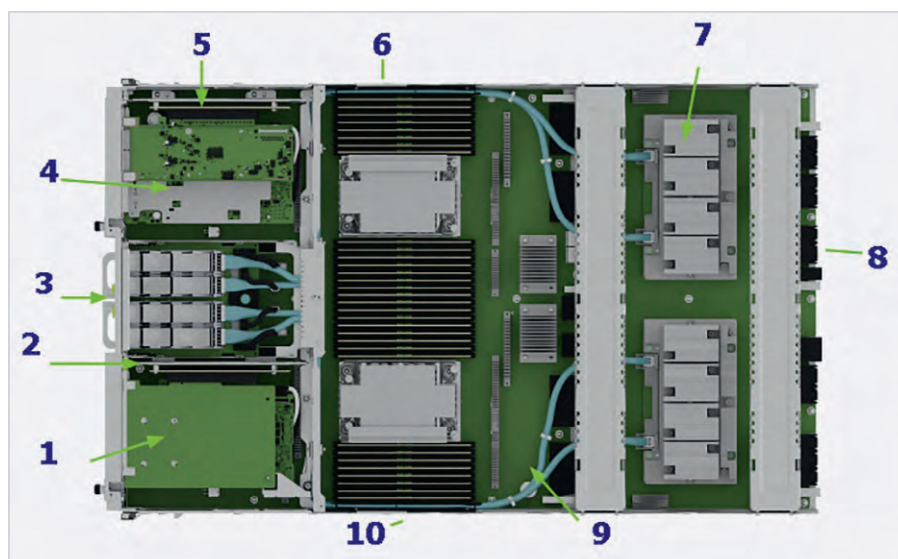


Рис. 3. Материнская плата сервера DGX B200 (пояснения приведены в тексте)

10. Два CPU-процессора, которые управляют всей системой и координируют работу ускорителей ГП (обычно 2x Intel Xeon 6980P или 2x AMD EPYC 9965).

Основные технические характеристики NVIDIA DGX B200 приведены в табл. 4 [24].

В наиболее распространённом стандартном варианте – сервер, объединяющий восемь ускорителей ГП NVIDIA Blackwell B200, соединённых NVLink пятого поколения.

По сравнению с системами предыдущего поколения DGX B200 обеспечивает 3-кратное увеличение производительности обучения и 15-кратное ускорение инференса. Этот сервер DGX B200 имеет производительность до 72 петафлопс. Общий объём B200-памяти составляет 1440 Гбайт, что позволяет работать с моделями, содержащими триллионы параметров.

Важнейшим преимуществом DGX B200 является наличие встроенного полного программного стека NVIDIA AI Enterprise, включая NVIDIA Base Command и обширную экосистему поддержки третьих сторон.

Это превращает DGX B200 в готовое к использованию решение, не требующее дополнительной интеграции программного обеспечения [25].

В некоторых ситуациях полезной может оказаться поддержка современных форматов сжатия (LZ4, Snappy, Deflate), а также функция ускорения полного конвейера запросов к базам данных.

Из других важных функциональных возможностей DGX B200 следует отметить систему надёжности и диагностики RAS Engine (Reliability, Availability, Serviceability), которая обеспечивает: предиктивное управление,

Таблица 3. Сравнительные технические характеристики B300 и B200

Наименование	HGX B300	HGX B200
Форм-фактор	8x NVIDIA Blackwell Ultra SXM	8x NVIDIA Blackwell SXM
FP4 Tensor Core**	144 Пфлопс / 105 Пфлопс	144 Пфлопс / 72 Пфлопс
FP8/FP6 Tensor Core*	72 Пфлопс	72 Пфлопс
INT8 Tensor Core*	72 Пфлопс	72 Пфлопс
FP16/BF16 Tensor Core*	36 Пфлопс	36 Пфлопс
TF32 Tensor Core*	18 Пфлопс	18 Пфлопс
FP32	600 Тфлопс	600 Тфлопс
FP64/FP64 Tensor Core	10 Тфлопс	296 Тфлопс
Общая память	До 2,3 Тбайт	1,4 Тбайт
NVLink	Пятое поколение	Пятое поколение
NVIDIA NVSwitch™	NVLink 5 Switch	NVLink 5 Switch
Пропускная способность NVSwitch GPU-to-GPU	1,8 Тбайт/с	1,8 Тбайт/с
Общая пропускная способность NVLink	14,4 Тбайт/с	14,4 Тбайт/с
Пропускная способность сети	1,6 Тбайт/с	0,8 Тбайт/с
Увеличение производительности с учётом Attention Performance	2x	1x

*С разреженностью **С разреженностью / без разреженности

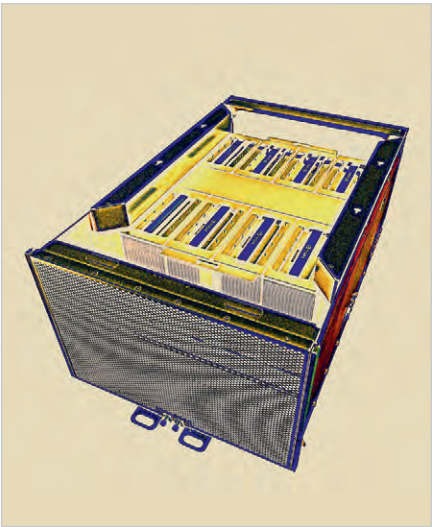


Рис. 4. Внешний вид сервера NVIDIA DGX B200 [27]SXM5

мониторинг тысяч точек данных для предотвращения простоев, глубокую диагностическую информацию для планового обслуживания.

Практически сервер NVIDIA DGX B200 – это унифицированная платформа искусственного интеллекта, предназначенная для компаний любого размера. Внешний вид сервера NVIDIA DGX B200 показан на рис. 4.

Сервер DGX B300 на базе нового ускорителя ГП NVIDIA Blackwell Ultra GPUs B300 планируется начать выпускать во второй половине 2025 года.

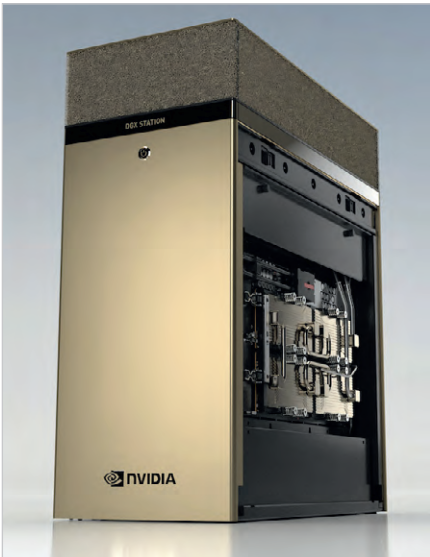


Рис. 5. Внешний вид NVIDIA DGX Station A100

Технические характеристики DGX B300 приведены в табл. 4 [26].

NVIDIA DGX B300 – это мощная система, разработанная специально для задач искусственного интеллекта (ИИ), включая обучение, тонкую настройку и вывод (Inference) моделей. Она предназначена для предприятий, которым нужны высокопроизводительные решения для генеративного ИИ, аналитики данных и высокопроизводительных вычислений (HPC).

В настоящее время кроме DGX B200 NVIDIA выпускает целую линейку про-

дуктов DGX, адаптированных для различных масштабов применения искусственного интеллекта.

Сервер выполнен в конструктиве 10U Rackmount. Габаритные размеры: 444×482×897 мм. Вес: 142 кг.

NVIDIA DGX Station представляет собой компактную настольную рабочую станцию, которая позволяет разработчикам и исследователям работать с проектами искусственного интеллекта без необходимости в серверной инфраструктуре. Такой подход позволяет использовать возможности дата-центра прямо на рабочем столе [28].

DGX Station может служить как индивидуальная настольная система для одного пользователя, работающего с продвинутыми ИИ-моделями на локальных данных, так и в качестве централизованного вычислительного узла для нескольких членов команды. Система поддерживает технологию NVIDIA Multi-Instance B200 (MIG), позволяющую разделить ресурсы на семь изолированных экземпляров, каждый со своей высокоскоростной памятью, кэшем и вычислительными ядрами.

Особенно важно для образовательных учреждений то, что бюджетные ИИ-компьютеры, такие как NVIDIA DGX Station A100, предоставляют студентам и преподавателям доступ к передовым технологиям без необходимости строить дорогостоящую серверную инфраструктуру. Это делает изучение и разработку ИИ-приложений более доступными для начинающих пользователей. Внешний вид NVIDIA DGX Station A100 показан на рис. 5.

Последняя версия DGX Station разработана на базе суперчипа NVIDIA GB300 Grace Blackwell Ultra Desktop и обладает следующими характеристиками: 784 Гбайт единого системного пространства памяти и производительность до 20 петафлопс для ИИ-вычислений. Система использует жидкостное охлаждение для управления тепловыделением компонентов мощностью почти 1500 Вт, что позволяет поддерживать уровень шума ниже 35 дБ под нагрузкой.

GB200 Grace Blackwell Superchip представляет собой комбинированную плату ускорителя графического процессора, содержащую два B200 Tensor Core, соединённых с процессором NVIDIA Grace через NVLink (900 Гбайт/с) [29, 30].

В технических описаниях можно встретить наименование Bianca

Таблица 4. Основные технические характеристики серверов NVIDIA DGX B200 и DGX B300

Параметр	DGX B200	DGX B300
УГП	8x NVIDIA Blackwell B200	8x NVIDIA Blackwell Ultra GPUs
Память УГП	1,44 Тбайт, пропускная способность HBM3e 64 Тбайт/с	2,3 Тбайт
Производительность	72 петафлопс, FP8 обучение; 144 петафлопс, FP4 инференс	
Системы NVIDIA® NVSwitch™	2x	
Общая пропускная способность NVIDIA NVLink	14,4 Тбайт/с	
Суммарная потребляемая мощность	~14,3 кВт	
Центральный процессор	2x процессора Intel® Xeon® Platinum 8570	2x процессора Intel® Xeon® 6776P
Мониторинг и управление сетевыми устройствами	4x порта QSFP – 8 NVIDIA ConnectX-7 VPI, до 400 Гбит/с; NVIDIA InfiniBand/Ethernet, 2x двухпортовых QSFP 112 NVIDIA BlueField-3 DPU, до 400 Гбит/с	8x портов QSFP – 8 NVIDIA ConnectX-8 VPI, до 800 Гбит/с; NVIDIA InfiniBand/Ethernet, 2x портовый QSFP112 NVIDIA BlueField-3 DPU, до 400 Гбит/с NVIDIA
Подключение к сети Интернет	Встроенная сетевая карта с RJ45, 1 Гбит/с и контроллер базовой платы, 1 GbE RJ45 Host BMC, 1 Гбит/с, RJ45	
Носитель ОС	Два NVMe M.2 SSD объёмом 1,9 Тбайт каждый, управляемые контроллером BMC	
Встроенный накопитель	8 твердотельных SSD с интерфейсом U.2, ёмкость 3,84 Тбайт	8 твердотельных SSD с интерфейсом E1.S, ёмкость 3,84 Тбайт
Программное обеспечение	NVIDIA DGX OS; NVIDIA Mission Control; NVIDIA Base Command Manager / NVIDIA AI Enterprise; Red Hat Enterprise Linux, Rocky, Ubuntu	
Тип корпуса	10 RU	
Размеры системы	Высота: 444 мм, ширина: 482 мм, длина: 897 мм	Н/Д
Интервал рабочих температур	5–30°C	10–35°C

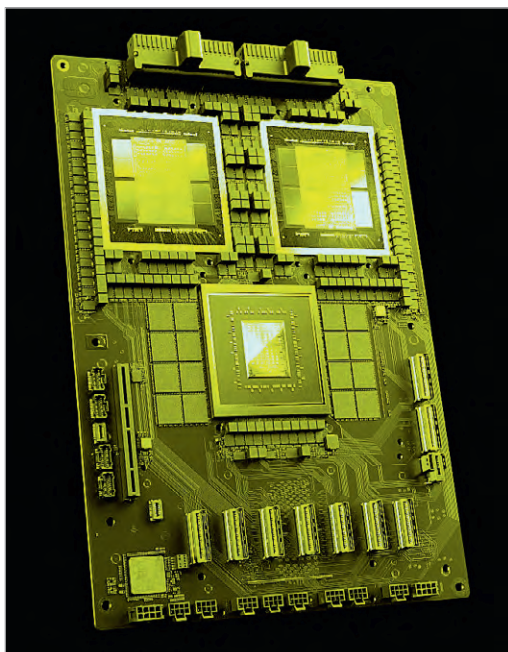


Рис. 6. Внешний вид комбинированной платы ускорителя графического процессора GB200 Grace Blackwell Superchip

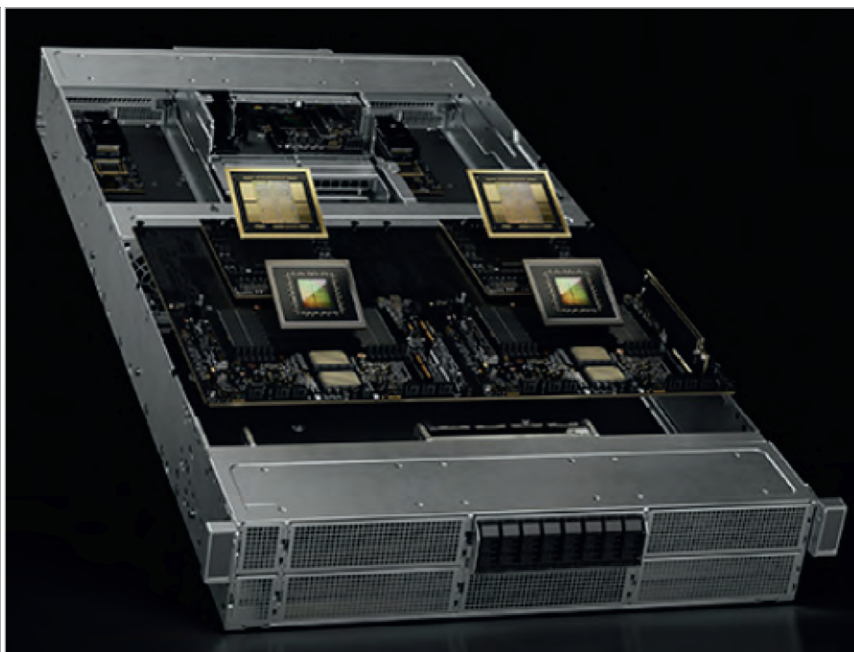


Рис. 7. Платформа GB200 NVL2 объединяет 2 ускорителя ГП B200 Blackwell и 2 процессора Grace [34]

Board, которое является внутрифирменным названием для модуля GB200 Grace Blackwell Superchip. Каждая плата Bianca содержит один процессор Grace CPU и два ускорителя графического процессора B200 [31].

Внешний вид комбинированной платы ускорителя графического процессора GB200 Grace Blackwell Superchip показан на рис. 6.

Семейство серверных процессоров NVIDIA Grace было специально разработано для дата-центров, ориентированных на обработку больших объемов данных с высокой энергоэффективностью. Процессоры NVIDIA Grace представляют собой одноsocketные платформы, которые оптимизированы для масштабируемости и высокой пропускной способности. Они предназначены для сложных вычислительных задач, требующих высокой производительности.

Процессоры семейства Grace строятся на базе архитектуры Arm с ядрами Neoverse V2. В зависимости от конфигурации Grace CPU может содержать от 72 до 144 ядер. Например, в составе GB200 Superchip используется один чип Grace с 72 ядрами, а автономный Grace CPU Superchip объединяет два чипа Neoverse V2 общим количеством 144 ядра [32].

Каждый GB200 Superchip способен обеспечить 40 петафлопс разреженных операций FP4, что делает его идеальным решением для инференса сверхкрупных языковых моделей.

Суперчип создаёт единое когерентное адресное пространство памяти между CPU и B200, что кардинально упрощает программирование и повышает эффективность обмена данными. Общий объём памяти суперчипа составляет 864 Гбайт: 480 Гбайт LPDDR5x для CPU и 384 Гбайт HBM3e для B200 [33].

GB200 NVL2 – платформа для стандартных дата-центров, объединяющая 2 ускорителя Blackwell B200 и 2 процессора Grace (рис. 7).

Платформа использует масштабируемую одноузловую архитектуру NVIDIA MGX, что позволяет легко интегрировать её в существующую инфраструктуру дата-центров. Особенно эффективна NVL2 для задач поиска в векторных базах данных, генерации с расширенным поиском (RAG) и обработки данных.

Энергопотребление системы составляет примерно 2700 Вт, что делает её доступной для широкого круга дата-центров без необходимости кардинальной модернизации систем энергоснабжения и охлаждения.

GB200 NVL4 представляет собой одноплатное решение, объединяющее четыре ускорителя Blackwell B200 и два процессора Grace на единой материнской плате [35].

Система обеспечивает 768 Гбайт памяти HBM3E для GPU с суммарной пропускной способностью 32 Тбайт/с, а также 960 Гбайт памяти LPDDR5X

для процессоров Grace. Все процессоры объединены через технологию NVLink, создавая единый домен с когерентной памятью объёмом 1,3 Тбайт.

По сравнению с предыдущим поколением GH200 NVL4 новая система обеспечивает 2,2-кратное увеличение производительности симуляций и 1,8-кратное ускорение обучения и инференса. Энергопотребление составляет 5400 Вт, что требует применения жидкостного охлаждения. Важной особенностью платформ NVL2 и NVL4 является соотношение процессоров Grace CPU к ускорителям B200, которое составляет 1:1 (2 CPU на 2 GPU в NVL2 и 2 CPU на 4 GPU в NVL4).

Такая архитектурная разница обусловлена различным назначением платформ: NVL2 и NVL4 ориентированы на задачи, требующие интенсивной предварительной обработки данных, сложной логики управления потоками и активного взаимодействия с внешними системами.

Увеличенное количество CPU-ядер обеспечивает:

- эффективную обработку множества запросов пользователей;
- сложную предварительную обработку входных данных;
- управление векторными базами данных и поисковыми индексами;
- координацию работы в распределённых системах.

NVIDIA DGX GB200 NVL72 – это мощный суперкомпьютер, созданный спе-



Рис. 8. Дата-центр на базе DGX SuperPOD

циально для работы с искусственным интеллектом (ИИ), в состав которого входят 36 процессоров NVIDIA Grace и 72 ускорителя графических процессоров Blackwell B200, размещённых в серверной стойке. Они соединены между собой с помощью технологии NVLink, которая позволяет им работать как единое целое, как один гигантский процессор, содержащий суммарное количество ARM-ядер Neoverse V2, равное 2592 шт. Эта платформа может выполнять до 1,44 эксафлопс (1,44 квинтиллиона операций в секунду) вычислений для ИИ, что делает её одним из самых мощных решений для таких задач. Кроме того, суперкомпьютер имеет до 240 Тбайт быстрой памяти, что позволяет обучать и развёртывать даже самые большие GLM ИИ-модели.

Однако такое количество высокопроизводительных компонентов делает систему GB200 NVL72 очень энергоёмкой: энергопотребление стойки достигает 120 кВт. Поэтому вся система оснащена мощной разветвлённой системой жидкостного охлаждения.

Размеры GB200 NVL72 Rack составляют 600×1000×2236 мм. Общий вес составляет 1360 кг [36].

DGX SuperPOD – масштабируемые ИИ-суперкомпьютеры находятся на вершине линейки платформы NVIDIA DGX. Это полностью готовый

к работе ИИ-кластер, который может масштабироваться до десятков тысяч УГП B200 для решения самых сложных задач обучения и вывода генеративных ИИ-моделей, содержащих триллионы параметров.

Платформа DGX SuperPOD построена по модульной архитектуре на основе масштабируемых единиц (SU), каждая из которых состоит из 32 систем DGX B200 или из восьми стоек DGX GB200 NVL72. Полностью протестированная система масштабируется до четырёх SU, но могут быть построены и более крупные развёртывания в зависимости от требований заказчика. Каждая масштабируемая единица DGX SuperPOD способна обеспечить 640 петафлопс ИИ-производительности при точности FP8 [37].

На рис. 8 показан дата-центр на базе DGX SuperPOD.

Новейшие версии DGX SuperPOD оснащены системами DGX GB300 с суперчипами NVIDIA Grace Blackwell Ultra. Их появление и подробное описание ожидается ближе к концу 2025 года.

Успех NVIDIA в области искусственного интеллекта обусловлен не только мощными графическими ускорителями, но и обширной программной экосистемой, которая делает эти вычислительные ресурсы доступными для широкого круга разработчиков.

CUDA (Compute Unified Device Architecture) является программной основой, которая обеспечивает прямой доступ к виртуальному набору инструкций УГП и параллельным вычислениям на рассмотренном выше оборудовании NVIDIA [38].

NVIDIA AI Enterprise представляет собой облачно-ориентированную программную платформу, обеспечивающую взаимодействие между облаком, дата-центром и периферией. ПО NVIDIA AI Enterprise включает в себя микросервисы NIM и NeMo для повышения производительности моделей и ускорения времени развёртывания генеративного ИИ [39].

NVIDIA AI Data Platform интегрирует корпоративные хранилища с NVIDIA-ускоренными вычислениями и программным обеспечением NVIDIA [40].

NVIDIA NIM – это набор предварительно созданных, оптимизированных микросервисов вывода для быстрого развёртывания новейших AI-моделей на любой NVIDIA-ускорительной инфраструктуре [41].

NVIDIA NeMo – представляет собой набор микросервисов, который обеспечивает комплексный набор функций для создания End-to-End платформ тонкой настройки, оценки и обслуживания больших языковых моделей [42].

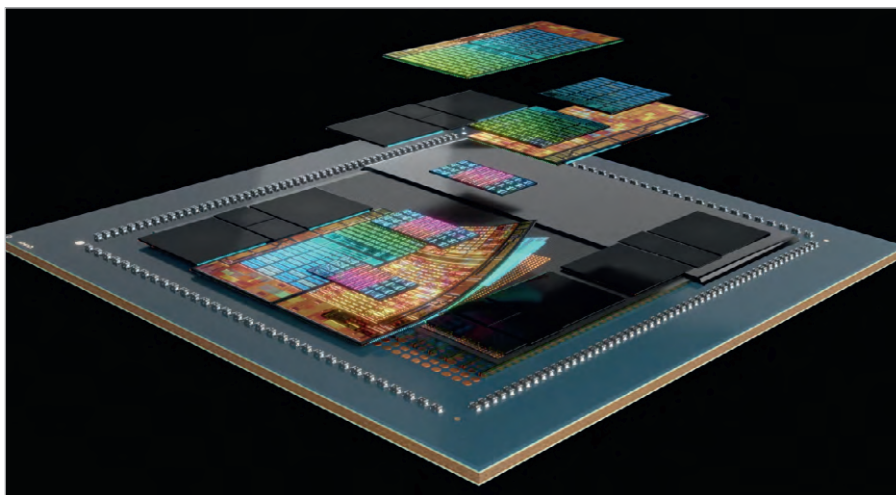


Рис. 9. Трёхмерная архитектура AMD Instinct MI300X

Кроме того, NVIDIA разработала множество приложений для разработчиков, таких, например, как Omniverse, Omniverse Cloud [43], DRIVE, DRIVE AGX [44], NVIDIA NGC, Project DIGITS (Linux) [45], AI Blueprints [46], Cosmos [47].

Программная экосистема NVIDIA представляет собой комплексное решение, охватывающее весь цикл разработки AI-приложений: от базовых вычислительных платформ, таких как CUDA, до специализированных отраслевых решений, таких как DRIVE и Omniverse.

Завершая обзор продукции NVIDIA, можно предположить, что, несмотря на ожесточённую конкурентную борьбу, эта корпорация по совокупности позиций будет оставаться в лидерах, по крайней мере, ещё несколько ближайших лет.

Ускоритель графического процессора AMD Instinct MI300X и технология упаковки 3.5D

Компания Advanced Micro Devices (AMD) может претендовать на роль крупного игрока на рынке процессоров для ИИ. Это одна из старейших компаний в области микропроцессоров, основанная ещё в 1969 году Джерри Сандерсом. В последние годы AMD сделала радикальный поворот в сторону искусственного интеллекта. Приобретение компании Xilinx за \$49 млрд в 2022 году стало крупнейшей сделкой в истории полупроводниковой индустрии, а покупка Pensando за \$1,9 млрд укрепила позиции в области сетевых технологий центров обработки данных.

В 2024 году AMD запустила в производство революционный для того

времени высокопроизводительный ускорительный модуль MI300X, разработанный специально для решения задач, связанных со сверхбольшими вычислительными мощностями (High Performance Computing – HPC), в том числе для обучения и работы больших языковых моделей.

По итогам года этот процессор стал одним из наиболее успешных проектов, который достиг отметки в \$1 млрд продаж быстрее любого другого продукта в истории AMD.

Последняя модель ускорительного модуля AMD Instinct™ MI300X GPU Accelerator представляет собой одну из наиболее совершенных на сегодняшний день конструкций ГПУ-ускорителей, разработанных когда-либо компанией AMD [48].

Имеет смысл пояснить название этого устройства, которое употребляет сам изготовитель. Термин GPU Accelerator обозначает устройство, которое позволяет увеличить производительность обработки данных, используя возможности параллельной обработки GPU в дополнение к центральному процессору CPU. В англоязычных статьях часто оставляют только слово Accelerator, которое лучше по смыслу переводить как «ускорительный модуль». Именно этот термин мы будем использовать в дальнейшем.

Ускорительный модуль AMD Instinct MI300X – это не просто «большая видеокарта», а сложнейшая трёхмерная структура взаимосвязанных микросхем, созданная по технологии 3D-стекинга (рис. 9). Эта схема получила такое внутрифирменное название AMD, как «Технология упаковки 3.5D», фиксируя внимание на комбинации 3D-стекирования GPU и I/O-

кристаллов с помощью гибридного бондинга в сочетании со стандартной 2.5D-упаковкой (рис. 9).

Конструкция Instinct MI300X включает восемь графических вычислительных чипов (Accelerator Complex Die – XCD), уложенных в трёхмерные стеки. В состав XCD входят ядра и компоненты для обработки данных. Каждый XCD, созданный по технологии 5 нм TSMC, содержит 38 вычислительных блоков (Compute Units – CU), разработанных на основе архитектуры AMD CDNA 3. Всего в одном MI300X содержится 304 вычислительных блока (CU).

При этом конкретный XCD имеет свой выделенный кэш L2 4 МБ, обеспечивающий более быстрый доступ к часто используемым данным.

Кроме того, MI300X может быть оснащён общим 256 МБ AMD Infinity Cache™ для всех восьми XCD, что обеспечивает ещё один уровень кэширования для сокращения доступа к памяти вне чипа.

Четыре интегральные сборки на кристалле (IO Dies), выполняющие функции ввода/вывода, управляют памятью, взаимосвязью и маршрутизацией данных. Кроме того, они координируют работу всех XCD с использованием специальной сети связи AMD Infinity Fabric. Эта сеть фактически выполняет функцию «нервной системы» MI300X, которая позволяет всем частям ускорительного модуля мгновенно обмениваться информацией.

Технология AMD Infinity Fabric позволяет реализовать высокоскоростные связи с малой задержкой между отдельными элементами и всей системой в целом со скоростью до 896 Гбайт/с.

Взаимодействие XCD и IOD осуществляется с помощью усовершенствованной технологии 3D Stacking.

По существу, AMD Instinct MI300X представляет собой сложную структуру взаимосвязанных чипсетов, оптимизированных для высокой производительности и эффективного доступа к памяти, объединяющую восемь 12-слойных стеков памяти HBM3 с восемью 3D-стековыми 5-нм чипсетами XCD на четырёх магистральных сборках на кристалле – 6-нм IOD-кристаллах. Процессорный модуль Instinct MI300X использует восемь стеков внешней памяти HBM3, по 24 Гбайт каждый, что обеспечивает суммарный объём 192 Гбайт. Скорость доступа к памяти составляет 5,3 Тбайт/с.

Таким образом, XCD обеспечивают вычислительную мощность, IOD управляют вводом-выводом и памятью, а Infinity Fabric объединяет все эти элементы в общий вычислительный модуль [49, 50].

Ускорительный модуль AMD Instinct MI300X может работать в различных форматах с различной производительностью: FP8 – 2,6 петафлопс; FP16/BF16 – 1,3 петафлопс; FP32 – 163 терафлопс; FP64 – 82 терафлопса.

Значительно увеличить производительность и память можно за счёт платформы AMD Instinct MI300X Platform, которая состоит из восьми ускорительных модулей Instinct MI300X, размещённых в крэйте Universal Baseboard – UBB 2.0 (рис. 10).

В такой конфигурации восемь модулей Instinct MI300X работают в формате OAM (Open Accelerator Module), в котором каждый ускоритель напрямую соединён с другим. Этот режим поддерживает 7 связей Infinity Fabric на каждый ускоритель (128 Гбайт/с каждая) и 8 подключений PCIe Gen 5 для связи с сервером. Общая пропускная способность между всеми ускорителями составляет 896 Гбайт/с. Внутри каждого ускорителя 8 вычислительных чипов работают параллельно. На уровне платформы все 8 ускорителей видят друг друга как единую систему.

Основные характеристики платформы AMD Instinct MI300X Platform приведены в табл. 5.

Открытая программная экосистема ROCm 6 позволяет пользователям разрабатывать и адаптировать свои программы, используя такие популярные фреймворки, как PyTorch, TensorFlow, JAX.

Текущая версия открытого программного стека AMD ROCm 6.1 включает драйверы, инструменты разработки и API для программирования GPU от низкоуровневых ядер до конечных пользовательских приложений ROCm. Кроме того, она предоставляет расширенную поддержку нескольких GPU для создания масштабируемых AI-систем [53].

Платформа AMD Instinct MI300X Platform может обучать модели с триллионами параметров, распределяя обработку между всеми 2432 вычислительными блоками (304×8). Благодаря огромной параллельной вычислительной мощности эта платформа позволяет также создавать большие мультимодальные

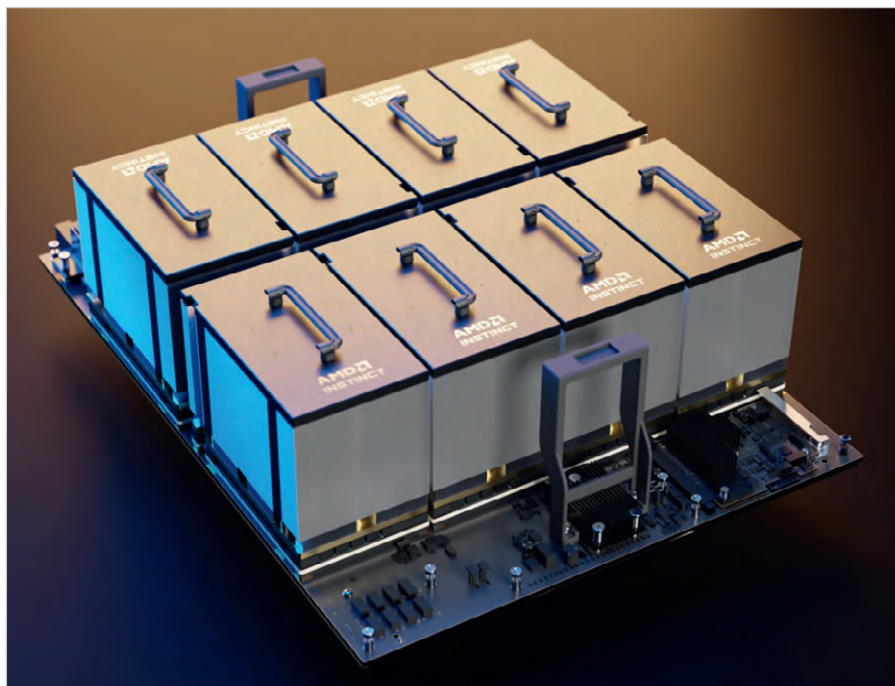


Рис. 10. Платформа AMD Instinct™ MI300X Platform [51]

модели ИИ с генерацией текстов, изображений и видео в реальном времени.

Безусловно, нужно обратить внимание на цены продукции AMD. Один ускорительный модуль Instinct MI300X (192 Гбайт HBM3) обойдётся корпоративным заказчикам, таким как Microsoft, примерно по цене \$10 000 за единицу.

Для других, менее важных корпоративных клиентов цена может составить около \$15 000 за единицу Instinct MI300X [54].

Полная платформа Instinct MI300X Platform MI300X (8 ускорительных модулей + крэйт UBB 2.0) стоит ориентировочно в районе \$34 000 [55].

Эти цифры позволяют говорить о том, что ускорительные модули AMD Instinct MI300X значительно дешевле аналогичной продукции того же класса B200 NVIDIA.

При этом AMD предлагает больше памяти (192 Гбайт против 80–192 Гбайт у конкурентов) и открытую программную экосистему ROCm 6.

Кроме того, Instinct MI300X имеет лучшие показатели по энергоэффективности (TBP – 750 Вт на ускорительный модуль).

Приведённые выше данные показывают, что AMD Instinct MI300X может составить серьёзную конкуренцию, отбирая у NVIDIA таких клиентов, как: Microsoft, Azure, Meta, Oracle Cloud, Google, Amazon, Hugging Face, которые начали интегрировать Instinct MI300X

в свои инфраструктуры искусственного интеллекта [56, 57].

Семейство AMD Instinct MI300X/MI325X представляет собой серьёзную попытку бросить вызов доминированию NVIDIA в области ИИ-ускорителей. Благодаря революционной 3.5D-архитектуре, рекордному объёму памяти и стратегическим партнёрствам с ведущими технологическими компаниями AMD демонстрирует, что конкуренция в сфере аппаратного обеспечения искусственного интеллекта становится всё более интенсивной.

Особенно впечатляющими выглядят планы AMD в отношении новой модели MI355X с заявленным 35-кратным улучшением производительности инференса и поддержкой новых низкоточных форматов FP4/FP6.

Они будут оснащены 256 Гбайт памяти HBM3E и обеспечат пропускную способность памяти до 6 Тбайт/с. AMD видит большой потенциал в рынке

Таблица 5. Основные характеристики платформы AMD Instinct MI300X Platform [52]

Наименование	Значение
Количество ускорителей	8 штук в одной системе AMD MI300X Platform
Общий объём памяти	1,5 Тбайт HBM3
Скорость памяти	5,3 Тбайт/с
Производительность ИИ	42 Пфлопс (FP8)
Потребление энергии	750 Вт на ускоритель
Соединение между чипами	896 Гбайт/с
Подключение к серверу	PCIe Gen 5 x16



Рис. 11. Схема суперкомпьютера Cerebras CS-3 AI

ускорителей ИИ, который по прогнозам достигнет \$500 млрд к 2028 году, что подчёркивает важность данного продукта для бизнеса [58].

Если эти обещания оправдаются, AMD может существенно изменить расклад сил на рынке ИИ-ускорителей, предоставив заказчикам реальную альтернативу решениям NVIDIA и простимулировав инновации во всей отрасли.

Cerebras WSE-3 – всё для ИИ на одном кристалле

По всей видимости, одной из наиболее впечатляющих новинок в области АПИИ стал Cerebras WSE-3, представленный в мае 2024 года. Этот процессор знаменует собой революцию в архитектуре процессоров для искусственного интеллекта.

Несмотря на то что название Cerebras Systems знакомо далеко не всем специалистам, это достаточно крупная американская компания с «хорошей родословной». Она была основана в 2015 году пятью инженерами из фирмы SeaMicro, которая была продана AMD в 2012 году. На сегодняшний день Cerebras Systems имеет офисы в Саннивейле, Сан-Диего, Торонто и Бангалоре (Индия) и насчитывает около 525 сотрудников. В 2025 году планируется завершение

оформления IPO под тикером CBRS с целевой оценкой до \$8 млрд. Примечательно то, что эта компания сильно зависит от одного крупного клиента G42 из Объединённых Арабских Эмиратов, который обеспечил 87% всей выручки за 2024 год.

Компания G42 является ведущей технологической группой арабского мира, специализирующейся на искусственном интеллекте (ИИ), облачных вычислениях, хранении данных и геопространственном интеллекте. Штаб-квартира находится в Абу-Даби [59].

Компания Cerebras Systems разработала Wafer-Scale Engine 3 WSE 3 – процессор, который кардинально переосмысливает подходы к созданию вычислительных систем для искусственного интеллекта. Этот чип представляет собой не просто очередное улучшение существующих технологий, а принципиально новую архитектурную концепцию.

Главная особенность WSE-3 заключается в его монолитной конструкции: весь процессор изготавливается из единой кремниевой пластины (Wafer) площадью 462 см², что в 57 раз больше флагманского GPU NVIDIA H100 [59]. Эта инновационная конструкция позволила создать чип рекордных размеров с беспрецедентными характеристиками.

В табл. 6 приведены сравнительные характеристики Wafer Scale Engine-3 и H100 [60].

Данные, приведённые в табл. 6, демонстрируют преимущества процессора Cerebras Wafer Scale Engine 3 по сравнению с ускорителем графического процессора Nvidia H100.

Процессор WSE-3, созданный с использованием новейшего 5-нм техпроцесса, является основой суперкомпьютера Cerebras CS-3 AI (рис. 11) [61].

Нужно отметить, что особое внимание в процессоре Cerebras WSE-3 уделено системе памяти, которая принципиально отличается от конкурентов. В процессоре используется 44 Гб встроенной SRAM-памяти, распределённой непосредственно на кристалле рядом с вычислительными ядрами. Это в 880 раз больше, чем у NVIDIA H100.

В этом заключается коренное отличие системы памяти Cerebras от NVIDIA, использующей внешнюю HBM3E-память [64].

Дополнительно системы суперкомпьютерных блоков CS-3 на основе WSE-3 могут быть оснащены внешней памятью объёмом 1,5 Тбайт, 12 Тбайт или даже 1,2 Пбайт.

Монолитная конструкция на одной кремниевой пластине обеспечивает ключевое преимущество WSE-3, которое заключается в исключительной пропускной способности, составляющей 21 Пбайт в секунду для памяти (это в 7000 раз выше H100) и 214 Пбит в секунду для внутренних соединений (это в 3715 раз быстрее H100). В традиционных системах ИИ множество отдельных процессоров должны постоянно обмениваться данными через относительно медленные межсоединения. В WSE-3 все ядра находятся на одном кристалле и связаны высокоскоростными внутренними шинами,

Таблица 6. Сравнительные характеристики Cerebras Wafer Scale Engine-3 и NVIDIA H100

Характеристика	Cerebras WSE-3	NVIDIA H100	Преимущество Cerebras
Размер чипа	46 225 мм ²	814 мм ²	57x
Ядра	900 000	16 896 FP32 + 528 Tensor	52x
Память на чипе	44 Гбайт	0,05 Гбайт	880x
Пропускная способность памяти	21 Пбайт/с	0,003 Пбайт/с	7000x
Пропускная способность шины	214 Пбит/с	0,0576 Пбит/с	3715x

что устраняет эти узкие места [65]. Такая архитектура особенно эффективна для обучения больших языковых моделей, где требуется обработка огромных объёмов данных со множественными взаимосвязями между различными частями нейросети [66].

Для создания ещё более мощных систем Cerebras разработала технологию масштабирования, позволяющую объединять до 2048 суперкомпьютеров CS-3 в единые кластеры. Это обеспечивает линейное масштабирование производительности без потери эффективности.

Впечатляющим примером такого масштабирования является проект Cerebras Condor Galaxy, который представляет собой сеть взаимосвязанных суперкомпьютеров CS-3, разрабатываемых совместно с компанией из ОАЭ G42.

Целью проекта является создание крупнейшей и самой быстрой в мире инфраструктуры суперкомпьютеров, предназначенной для генеративного искусственного интеллекта.

Уже построены Condor Galaxy 1 и 2 с производительностью в четыре экзафлопс. Продолжается строительство Condor Galaxy 3, планируемая мощность которого восемь экзафлопс.

Система Condor Galaxy 1–2 спроектирована как облачный распределённый суперкомпьютер ИИ, позволяющий учёным в разных городах и странах использовать её ресурсы для крупномасштабных задач ИИ и научных задач. В настоящее время вычислительными мощностями Condor Galaxy 1–2 могут пользоваться учёные во многих городах США и в некоторых других зарубежных странах, в том числе и в режиме онлайн.

Condor Galaxy 3 (CG-3) будет состоять из 64 системных блоков CS-3, что позволит обучать модели с параметрами до 24 триллионов. Это в 10 раз больше, чем GPT-4 или Gemini [67].

В рамках создания третьей стадии проекта CG-3 компания Cerebras Systems добавляет шесть новых центров обработки данных ИИ в Северной Америке и Европе. Это увеличит пропускную способность вывода до более чем 40 миллионов токенов в секунду. Новые объекты будут созданы в Далласе, Миннеаполисе, Оклахома-Сити, Монреале, Нью-Йорке и городах Франции, при этом 85% от общей мощности будет находиться в Соединённых Штатах [68].

Следует обратить внимание на то, что суперкомпьютеры CS-3 на базе WSE-3 физически расположены в США (Санта-Клара, Даллас), но управляются совместно с G42 из ОАЭ. Это позволяет Cerebras и G42 контролировать доступ в соответствии с американским законодательством, при этом предоставляя ресурсы международным исследователям из дружественных стран [69].

Опыт использования системы Condor Galaxy уже показал её огромную значимость для развития ИИ, а также многих направлений мировой науки и техники, требующих больших вычислительных мощностей.

Системы CS-3 на базе WSE-3 от Cerebras представляют собой значительный скачок в скорости и эффективности обучения ИИ, особенно для больших языковых моделей, таких как Llama 2 (70 млрд параметров). Например, традиционное обучение Llama 2 требовало около 1,7 миллиона часов работы GPU, распределённых по тысячам высокопроизводительных GPU. На это уходило несколько недель рабочего времени в зависимости от размера кластера и эффективности [70].

Сегодня компактная конфигурация всего из четырёх систем CS-3 может точно обучить модель Llama 2 с семьюдесятью миллиардами параметров менее чем за день [71].

Впечатляющие результаты были получены в фундаментальных научных исследованиях. Например, исследователи Аргоннской национальной лаборатории получили премию Гордона Белла за исследования вариантов COVID-19, выполненные на кластере CS-2.

В мае 2024 года команда из Сандийской национальной лаборатории смоделировала взаимодействие 800 000 атомов, сократив год вычислений до двух дней [72].

По достоинству оценили возможности процессоров Cerebras некоторые ведущие производители электронных компонентов. Например, концерн Qualcomm заключил с Cerebras соглашение об обучении с помощью WSE-3 моделей ИИ, которые будут работать на процессорах Qualcomm AI 100 Ultra [73].

Также объявлено о сотрудничестве с Dell Technologies в области разработки новой прикладной инфраструктуры генеративного искусственного интеллекта [74].

Нужно также сказать несколько слов о стоимости этого оборудования. Согласно данным отраслевого издания Data Center Dynamics, компания Cerebras не раскрывает официальную стоимость своих чипов, однако, по оценкам экспертов, они стоят около \$2–3 млн за единицу [75].

По информации Reuters, первый суперкомпьютер Condor Galaxy 1 с 32 узлами обошёлся партнёру G42 в \$100 млн, что составляет \$3,13 млн за узел, включая обслуживание. Полная программа развёртывания 9 кластеров может превысить \$900 млн [76].

Аналитики The Next Platform оценивают стоимость полномасштабного кластера из 2048 систем CS-3 в районе \$5–6 млрд [77].

Завершая этот короткий обзор новой продукции Cerebras, можно с уверенностью говорить о том, что WSE-3 представляет собой радикальный отход от традиционных подходов в проектировании процессоров. Успех WSE-3 может стать началом нового этапа в развитии специализированных процессоров для искусственного интеллекта.

Заключение

Анализ современного рынка аппаратного обеспечения для искусственного интеллекта показывает, что эта отрасль переживает период активных изменений. Рассмотренные в данной статье решения от NVIDIA, AMD и Cerebras представляют лишь наиболее яркие примеры инновационных подходов к созданию ИИ – ускорителей процессоров.

Благодаря экосистеме CUDA и универсальности решений сегодня на рынке ускорителей графических процессоров продолжает доминировать NVIDIA. Архитектура Blackwell (B200/B300) с поддержкой FP4 и революционной двухкристальной конструкцией устанавливает новые стандарты производительности для обучения и инференса больших языковых моделей.

Технология упаковки 3.5D, использованная AMD в своих ускорителях MI300X/MI325X, предлагает конкурентоспособную альтернативу с большим объёмом памяти (192 Гбайт) и открытой программной платформой ROCm, что особенно привлекательно для корпоративных заказчиков, стремящихся к независимости от монополии NVIDIA.

Таблица 7. Сравнительные характеристики современных ИИ-процессоров

Процессор	Тех. процесс	Производительность (FP16)	Память (HBM3/SRAM)	TDP	Применение	Экосистема ПО
Cerebras WSE-3	5 нм	125 Пфлопс	44 Гбайт SRAM, до 1,2 Пбайт внешней	~15 кВт	Обучение сверхмасштабных LLM	Cerebras Software Platform
NVIDIA B200	4 нм	~10 Пфлопс*	192 Гбайт HBM3e	1000 Вт	Универсальное (обучение и инференс)	CUDA, TensorRT
Intel Gaudi 3	5 нм	~2,5 Пфлопс	128 Гбайт HBM2e	600 Вт	Обучение и инференс LLM	Intel AI Suite, PyTorch
AMD MI325X	5 нм	1,3 Пфлопс	256 Гбайт HBM3e	750 Вт	Обучение и инференс в HPC и облаке	ROCm, PyTorch, TensorFlow
Google TPU v5	4 нм	~1 Пфлопс**	HBM3 (объём не раскрыт)	Н/Д	Инференс и обучение в TensorFlow	TensorFlow, JAX
Huawei Ascend 910C	7 нм	640 Тфлопс	128 Гбайт HBM3	400–600 Вт	Обучение и инференс LLM в дата-центрах	MindSpore, CANN
Graphcore IPU-POD256	7 нм	~350 Тфлопс	460 Гбайт In-Processor Memory	~15 кВт	Исследовательские задачи, обучение	Poplar SDK, PyTorch
Qualcomm AI 100 Ultra	5 нм	~75 Тфлопс	LPDDR5/DDR5	75–150 Вт	Edge Computing, локальный инференс	Qualcomm AI SDK
Apple M4 Max	3 нм	~40 Тфлопс	128 Гбайт унифицированной памяти	40–60 Вт	Локальный инференс на устройствах	Core ML, Metal
DeepSeek (RISC-V)	7 нм/5 нм	~16 Тфлопс***	HBM3/DDR5 (зависит от SoC)	50–150 Вт	Локальный инференс LLM	Собственная экосистема RISC-V

Примечания к таблице:

*NVIDIA B200: производительность в FP8 (20 Пфлопс) пересчитана в FP16 (~10 Пфлопс, так как FP8 обычно вдвое эффективнее) [14].

**Google TPU v5: точные данные не раскрыты, оценка ~1 Пфлопс основана на двукратном превосходстве над TPU v4 (~500 ТФ FP16).

***DeepSeek (RISC-V): оценка ~16 Тфлопс FP16 основана на 32 TOPS INT8 для Sophgo SG2380 (1 ТФ FP16 ≈ 2 TOPS INT8).

Инновационный подход демонстрирует Cerebras с технологией Wafer-Scale процессоров WSE-3, показывая возможности кардинального переосмысления архитектуры для сверхмасштабных вычислительных задач.

Однако современный рынок ИИ-процессоров значительно шире представленных в статье решений. В табл. 7 приведён рейтинг ведущих мировых компаний с учётом, прежде всего, производительности их процессоров (таблица подготовлена с помощью ИИ Claude-4 Sonet, 2025).

В заключение можно сказать, что даже наш поверхностный обзор продукции ведущих производителей позволяет отметить несколько ключевых тенденций, определяющих направление развития аппаратного обеспечения для искусственного интеллекта. Прежде всего, это повышение энергоэффективности при росте производительности.

Например, такие процессоры, как Huawei Ascend 910C (TDP 400–600 Вт) и Apple M4 Max (TDP 40–60 Вт), демонстрируют тенденцию к снижению энергопотребления при высокой производительности. При этом Ascend 910C обеспечивает 640 Тфлопс (FP16), конкурируя с NVIDIA H100 при существенно меньшем энергопотреблении. Cerebras WSE-3, несмотря на высокий TDP (~15 кВт), показывает исключительную эффективность для сверхмасштабных задач благодаря производительности 125 Пфлопс (FP16) [78].

Другое быстроразвивающееся направление связано со специализацией оборудования под конкретные задачи ИИ.

Различные процессоры оптимизируются под специфические применения. В то время как NVIDIA B200 остаётся универсальным решением для обучения и инференса, Google TPU v5 специально оптимизирован для экосистемы TensorFlow. Идеально подходит для обучения моделей с триллионами параметров процессор Cerebras WSE-3. Китайский Huawei Ascend 910C поддерживает экосистему MindSpore для таких моделей, как Pangu. Процессоры Intel Gaudi 3 ориентированы на снижение стоимости в корпоративном сегменте [79].

Также заметно увеличивается интерес к открытым архитектурам после публикации информации о специализированных чипах RISC-V (SiFive P670, DeepSeek). Особенно заметным было появление на рынке ИИ-моделей DeepSeek R-1, которые позволили значительно снизить затраты на разработку и производство. Характерный пример показывает Google, интегрирующий RISC-V ядра (SiFive X280) в TPU v5, обеспечивая таким образом гибкость и универсальность системы программирования [80].

В ближайшие 2–3 года ожидается дальнейшая диверсификация рынка ИИ-процессоров. Конкуренция между ведущими производителями будет стимулировать инновации в обла-

сти энергоэффективности, специализации архитектур и масштабируемости решений.

Литература

1. AI Index Report 2025. URL: <https://hai.stanford.edu/ai-index/2025-ai-index-report>.
2. NVIDIA Tensor Cores. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/tensor-cores/>.
3. CXL 3.0. URL: https://computeexpresslink.org/wp-content/uploads/2025/02/CXL_Q1-2025-Webinar-Presentation_FINAL.pdf.
4. CEREBRAS SYSTEMS, INC. URL: <https://f.hubspotusercontent30.net/hubfs/8968533/Cerebras-Systems-Overview.pdf>.
5. Market cap. URL: <https://companiesmarketcap.com/nvidia/marketcap/>.
6. NVIDIA. URL: <https://abr.vn/jukp>.
7. NVIDIA Blackwell Platform Arrives to Power a New Era of Computing. URL: <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-blackwell-platform-arrives-to-power-a-new-era-of-computing>.
8. NVIDIA Blackwell Architecture and B200/B100 Accelerators Announced. URL: <https://www.anandtech.com/show/21310/nvidia-blackwell-architecture-and-b200b100-accelerators-announced-going-bigger-with-smaller-data>.
9. NVIDIA Hopper Architecture In-Depth. URL: <https://developer.nvidia.com/>

- blog/nvidia-hopper-architecture-in-depth/.
10. NVIDIA Blackwell B100, B200, GPU. URL: <https://datacrunch.io/blog/nvidia-blackwell-b100-b200-gpu>.
11. SXM (socket). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/SXM_\(socket\)](https://en.wikipedia.org/wiki/SXM_(socket)).
12. NVIDIA-H100. URL: <https://www.shi.com/product/46062270/NVIDIA-H100-GPU-computing-processor>.
13. NVIDIA Blackwell vs NVIDIA Hopper: A Detailed Comparison. URL: <https://www.nexgencloud.com/blog/performance-benchmarks/nvidia-blackwell-vs-nvidia-hopper-a-detailed-comparison>.
14. NVIDIA B200. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/products/b200/>.
15. NVIDIA announces Blackwell Ultra B300. URL: <https://www.tomshardware.com/pc-components/gpus/nvidia-announces-blackwell-ultra-b300-1-5x-faster-than-b200-with-288gb-hbm3e-and-15-pflops-dense-fp4>.
16. NVIDIA's Christmas Present: GB300 & B300. URL: <https://semianalysis.com/2024/12/25/nvidias-christmas-present-gb300-b300-reasoning-inference-amazon-memory-supply-chain>.
17. NVIDIA GB200 Delivered, and Here Comes the GB300. URL: <https://www.fibermall.com/news/nvidia-here-comes-the-gb300.htm>.
18. NVIDIA HGX Platform. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/hgx/>.
19. Blackwell Platform Arrives to Power a New Era of Computing. URL: <https://resources.nvidia.com/en-us-blackwell-architecture/datasheet?ncid=no-ncid>.
20. NVIDIA® B200 SXM6. URL: <https://datacrunch.io/b200>.
21. Created with Grok 3 AI by xAI, 2025. URL: <https://x.com/i/grok>.
22. NVIDIA HGX B300 NVL16 information. www.fibermall.com.
23. NVIDIA DGX B200. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/dgx-b200/>.
24. Datasheet DGX B200. URL: <https://resources.nvidia.com/en-us-dgx-systems/dgx-b200-datasheet>.
25. Introduction to NVIDIA DGX B200 Systems. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/dgx-b200/>.
26. DGX-B300-datasheet. URL: <https://resources.nvidia.com/en-us-dgx-systems/dgx-b300-datasheet>.
27. NVIDIA DGX B200 User Guide. URL: <https://docs.nvidia.com/dgx/dgxb200-user-guide/dgxb200-user-guide.pdf>.
28. NVIDIA DGX Station. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/products/workstations/dgx-station/>.
29. GB200. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/gb200-nvl72/>.
30. GB200 Hardware Architecture. URL: <https://semianalysis.com/2024/07/17/gb200-hardware-architecture-and-component/>.
31. Blackwell B200. GB200 Grace Blackwell. URL: <https://nvdam.widen.net/s/wwnsxrhm2w/blackwell-datasheet-3384703>.
32. NVIDIA CPU Grace. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/grace-cpu>.
33. NVIDIA GB200 NVL72 training. URL: <https://training.continuumlabs.ai/infrastructure/servers-and-chips/nvidia-gb200-nvl72>.
34. NVIDIA GB200 NVL2. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/gb200-nvl2/>.
35. NVIDIA GB200 NVL4. URL: <https://www.techpowerup.com/328966/nvidia-prepares-gb200-nvl4-four-blackwell-gpus-and-two-grace-cpus-in-a-5-400-w-server>.
36. NVIDIA GB200 NVL72. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/gb200-nvl72/>.
37. NVIDIA DGX SuperPOD. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/dgx-superpod/>.
38. CUDA. URL: <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>.
39. NVIDIA AI Enterprise. Software Platform. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/data-center/products/ai-enterprise/>.
40. New Class of Enterprise Infrastructure. URL: <https://gclnk.com/AnBA24Uv>.
41. NIM for Developers. URL: <https://developer.nvidia.com/nim>.
42. Nemo-microservices. URL: <https://gclnk.com/9p0wrZho>.
43. Omniverse Platform. URL: <https://developer.nvidia.com/omniverse>.
44. Car Technology from NVIDIA. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/solutions/autonomous-vehicles/>.
45. NVIDIA unveils robot training. URL: <https://www.reuters.com/technology/ces-nvidia-ceo-set-take-stage-ces-just-after-shares-hit-record-high-2025-01-07/>.
46. AI Agents: Built to Reason, Plan, Act. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/ai/>.
47. NVIDIA Expands Omniverse. URL: <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-expands-omniverse-with-generative-physical-ai>.
48. Meet the New AMD Instinct™ MI325X Accelerators. URL: https://www.amd.com/en/products/accelerators/instinct.html?utm_campaign=instinct&utm_medium=redirect&utm_source=301.
49. AMD Instinct™ MI300 series microarchitecture. URL: <https://rocm.docs.amd.com/en/latest/conceptual/gpu-arch/mi300.html>.
50. AMD MI300X Accelerator Unpacked: Specs, Performance & More. URL: <https://tensorwave.com/blog/mi300x-2>.
51. AMD Instinct™ MI300X Platform. URL: <https://shorturl.at/SxDcB>.
52. AMD INSTINCT™ MI300X PLATFORM. URL: <https://www.amd.com/content/dam/amd/en/documents/instinct-tech-docs/data-sheets/amd-instinct-mi300x-platform-data-sheet.pdf>.
53. AMD ROCm™ 6 OPEN SOFTWARE FOR AI AND HPC WORKLOADS. URL: <https://www.amd.com/content/dam/amd/en/documents/instinct-tech-docs/product-briefs/amd-rocm-6-brief.pdf>.
54. IxT.com (2024). URL: <https://www.ixbt.com/news/2024/02/03/amd-instinct-mi300x-192-10-15-nvidia-h100.html>.
55. Interpro Microsystems. AMD Instinct MI300X 192GB 8 OAM + UBB. URL: <https://www.interpromicro.com/product/39955-amd-instinct-mi300x-192gb-8-oam-ubb>.
56. AMD's MI300 AI accelerator sales drive 80 percent growth. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/amds-mi300-ai-accelerator-sales-drive-80-percent-growth-in-data-center-segment/>.
57. Meta and Microsoft say they will buy AMD's new AI chip. URL: <https://www.cnn.com/2023/12/06/meta-and-microsoft-to-buy-amds-new-ai-chip-as-alternative-to-nvidia.html>.
58. AMD Instinct™ MI325X Accelerators. URL: <https://www.amd.com/en/products/accelerators/instinct/mi300/mi325x.html>.
59. G42 partners with Cerebras. URL: <https://www.mediaoffice.abudhabi/en/technology/g42-partners-with-cerebras-to-launch-worlds-largest-ai-training-supercomputer-network/>.
60. Cerebras WSE-3 wafer-scale AI chip. URL: <https://www.tweaktown.com/news/96843/cerebras-wse-3-wafer-scale-ai-chip-57x-bigger-than-largest-gpu-with-4-trillion-transistors/index.html>.

61. Cerebras CS-3: the world's fastest and most scalable AI accelerator – Cerebras. URL: <https://www.cerebras.ai/blog/cerebras-cs3>.
62. Cerebras Unveils Six Data Centers. URL: <https://www.datacenterfrontier.com/hyperscale/article/55273769/cerebras-unveils-six-data-centers-to-meet-accelerating-demand-for-ai-inference-at-scale>.
63. Cerebras reveals revenue surge in US IPO filing. URL: <https://economictimes.indiatimes.com/?back=1>.
64. Cerebras WSE-3 AI Chip Launched 56x Larger than NVIDIA H100. URL: <https://www.servethehome.com/cerebras-wse-3-ai-chip-launched-56x-larger-than-nvidia-h100-vertiv-supermicro-hpe-qualcomm/>.
65. Cerebras Unveils Its Next Waferscale AI Chip. URL: <https://spectrum.ieee.org/cerebras-chip-cs3>.
66. Cerebras Systems Sets New Benchmark in AI. URL: <https://www.unite.ai/cerebras-systems-sets-new-benchmark-in-ai-innovation-with-launch-of-the-fastest-ai-chip-ever/>.
67. CONDOR GALAXY. URL: <https://www.cerebras.ai/condor-galaxy>.
68. Cerebras WSE3 Versus Nvidia B200. URL: <https://www.nextbigfuture.com/2025/05/cerebras-wse3-versus-nvidia-b200.html>.
69. Cerebras's 36 exaFLOPS Condor Galaxy AI super takes flight. URL: https://www.theregister.com/2023/07/20/cerebras_condor_galaxy_supercomputer.
70. Reddit discussion on Llama training. URL: https://www.reddit.com/r/LocalLLaMA/comments/1f4ecsl/its_insane_how_much_computer_meta_has_they_could/.
71. CEREBRAS TRAINS LLAMA MODELS TO LEAP OVER GPUS. URL: <https://www.nextplatform.com/2024/10/25/cerebras-trains-llama-models-to-leap-over-gpus/>.
72. Wikipedia – Cerebras. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Cerebras>.
73. Cerebras Selects Qualcomm. URL: <https://www.eetimes.com/cerebras-sells-100-million-ai-supercomputer-plans-8-more/>.
74. Cerebras Enables Faster Training. URL: <https://www.cerebras.ai/press-release/cerebras-enables-faster-training-of-industrys-leading-largest-ai-models>.
75. Data Center Dynamics. Cerebras unveils four trillion-transistor giant chip. URL: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/cerebras-unveils-four-trillion-transistor-giant-chip-targets-generative-ai/>.
76. Cerebras Sells \$100 Million AI Supercomputer Plans Eight More. URL: <https://www.eetimes.com/cerebras-sells-100-million-ai-supercomputer-plans-8-more/>.
77. The Next Platform. Cerebras goes hyperscale with third gen waferscale supercomputers. URL: <https://www.nextplatform.com/2024/03/14/cerebras-goes-hyperscale-with-third-gen-waferscale-supercomputers/>.
78. Ascend Computing. URL: <https://e.huawei.com/en/products/servers/ascend>.
79. Intel Gaudi 3 AI Accelerators. URL: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/processors/ai-accelerators/gaudi.html>.
80. RISC-V Core IP Portfolio. URL: <https://www.sifive.com/risc-v-core-ip>.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

30-ваттные модули DC/DC-преобразователей напряжения для применения в сетях промышленной электроники с 4-кратным изменением напряжений

Серия WINL30 DC/DC-преобразователей напряжения, выпускаемых под торговой маркой Wibbow, включает ряд 30-ваттных модулей с гальванической развязкой для установки на печатную плату в непосредственной близости от нагрузки.

Устройства выполнены с регулированием выходного напряжения методом широтно-импульсной модуляции с постоянной высокой рабочей частотой 300 кГц и синхронным выпрямлением.

Силовой низкопрофильный трансформатор реализован по планарной технологии из высокочастотного феррита, что обуславливает меньшие потери в сердечнике. Эти технические решения позволили получить высокий КПД преобразователей – до 90%, значение удельной мощности 3720 Вт/дм³. Габаритные размеры модулей 32×21×12 мм.

Серия включает одно- и двухканальные модели, обеспечивающие наиболее востребованные напряжения и предназначенные для работы в сетях с изменением напряжения от 9 до 36 В (кратность диапазона вход-



ного напряжения 4:1). Модули содержат набор сервисных и защитных функций, необходимых для безопасной работы: защита от пониженного входного напряжения, перегрузки по току и короткого замыкания, перегрева, повышенного выходного напряжения; подстройка выходного напряжения; выключение внешним сигналом со стороны входа, что может использоваться при необходимости снижения энергопотребления. Встроенный помехоподавляющий фильтр на входе обеспечивает уменьшение уровня кондуктивных помех со стороны питающей сети. Модули стабильно функционируют при температурах от –40 до +105°C. Можно заказать модели для работы в диапазоне температур от –55 до +105°C (температурный класс М).

Использование DC/DC-преобразователей с расширенным диапазоном входного напряжения позволяет сократить номенклатуру потребляемой продукции, так как возможна установка одного и того же типа мо-

Основные параметры 30-ваттных DC/DC-преобразователей серии WINL30 с расширенным диапазоном входного напряжения

Тип модуля	Выходное напряжение, В	Выходной ток, А	Пулсация выходного напряжения, мВ (от пика до пика)	КПД
WINL30-24WHS5P	5	6	<75	89
WINL30-24WHS12P	12	2,5	<150	90%
WINL30-24WHS15P	15	2	<150	90%
WINL30-24WHS24P	24	1,25	<180	90%
WINL30-24WHS48P	48	0,63	<480	90%
WINL30-24WHD5P	±5	±3	<400	89%
WINL30-24WHD12P	±12	±1,25	<120	89%
WINL30-24WHD15P	±15	±1	<120	89%

дулей в узлы аппаратуры, питающиеся от различающихся входных напряжений. Но при выборе блоков питания для каждого конкретного случая необходимо учитывать специфику схемотехники модулей с расширенным диапазоном входного напряжения, применение которых может быть оправдано только в тех случаях, когда не удаётся обойтись другими средствами.

Компактные модули серии WINL30 гарантируют высокую стабильность рабочих характеристик и долговременную надёжность в жёстких условиях эксплуатации в промышленных сетях электропитания.



Электронные системы геомагнитной навигации и перспективы РЭБ

Андрей Доезжаев

Беспилотные летательные аппараты и транспортные средства (БПЛА и БПТС) прочно вошли в повседневную жизнь. Однако вместе с этим обострилась проблема защиты их от перехвата управления, особенно учитывая повышение эффективности, мобильности и селективности средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Самым уязвимым элементом, вызывающим наибольшее внимание разработчиков радиоэлектронных систем, остаётся возможность подавления или отключения GPS, подмены сигнала и дистанционного захвата управления беспилотником, что может иметь серьёзные последствия. В связи с этим активно ведутся перспективные разработки в области альтернативных методов спутниковой навигации и комплексного контроля за перемещением беспилотных систем.

О прогрессе и эволюции РЭА

Прогресс в сфере радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) развивается стремительными темпами. Ещё совсем недавно, 14 апреля 1983 года, в Великобритании был представлен первый переносной радиотелефон – устройство, больше напоминавшее по размеру кирпич, чем современный гаджет. Именно он стал прародителем сегодняшних тонких и multifunctional смартфонов. Трудно было представить, что всего за 40 лет – в рамках жизни одного поколения – телефоны превратятся в устройства тоньше обычного журнала.

Беспилотные летательные аппараты сегодня активно трансформируются в универсальные платформы: от средств доставки оборудования до высокоточного оружия с возможностью такти-

ческого применения. Причём развитие этих систем идёт стремительными темпами. Только за период с 2023 по 2025 годы были разработаны и запущены в серийное производство комплексы РЭА для управления беспилотными автомобилями и грузовиками.

Однако столь бурный прогресс ставит перед обществом новые серьёзные вопросы. Один из них – обеспечение безопасности дорожного движения на дорогах общего пользования, особенно в условиях мегаполисов, где ежедневно перемещаются тысячи транспортных средств. Например, как можно гарантировать безопасность на таком сложном и нагруженном участке, как МКАД, если в общем потоке участвуют и БПТС?

Встаёт важнейший вопрос: насколько надёжны электронные системы управления и как они защищены от

внешнего вмешательства и перехвата управления? Ведь в случае взлома подобных систем последствия могут быть не просто серьёзными, а катастрофическими – с массовыми авариями, нарушением инфраструктуры и угрозой жизни людей.

Что происходит с установками РЭБ в России

Ситуация со средствами радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и системами постановки помех становится всё более сложной. В 2025 году, по сравнению с предыдущими периодами, средние затраты на приобретение антидроновых комплексов снижаются. Предприятия всё чаще руководствуются принципом «разумной достаточности»: небольшим организациям нет необходимости в дорогостоящих системах – им вполне подойдут компактные и функциональные установки. В то же время мощные и громоздкие комплексы РЭБ остаются актуальными для крупных промышленных предприятий, объектов критической инфраструктуры, таких как нефтеперерабатывающие заводы, электроподстанции и транспортные узлы, где требуется масштабная защита и устойчивость к широкому спектру угроз [4].

Заказчики делятся на две группы: первая модернизирует уже имеющуюся систему противодействия дронам, вторая закупает оборудование с нуля. Для промышленных заказчиков цена установки составляет несколько десятков миллионов рублей, а для крупных или важных объектов может достигать до нескольких сотен миллионов рублей. В основном антидроновые решения приобретаются для защиты объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК).

Рынок антидроновых систем разделяют на три составляющие. Первая – физическая защита: различные сети и укрытия. Это самая дешёвая статья расходов (от 300 руб. за 1 м²). Далее следуют средства РЭБ, этот сегмент делят отечественные и китайские поставщики. В дополнение к средствам РЭБ

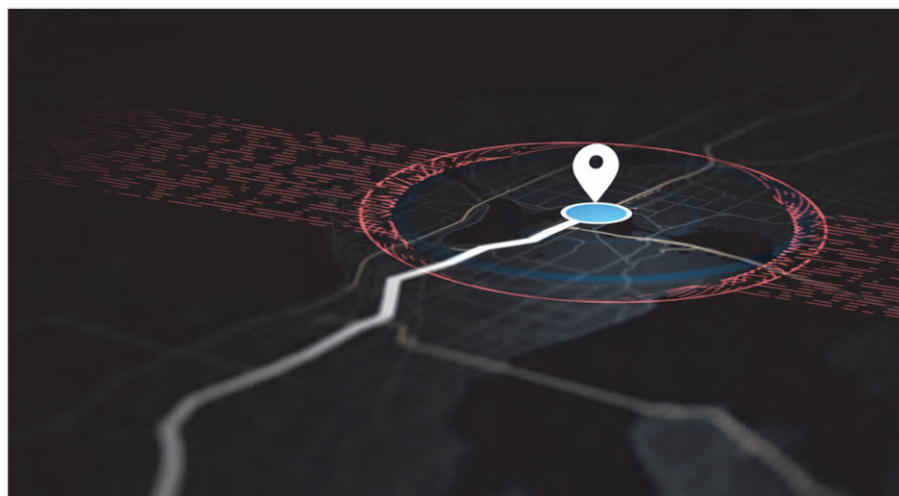


Рис. 1. Общий принцип определения координат

Общее описание спуфинг атаки

Спуфинг (от англ. spoofing — подмена, мистификация) — это атака, которая пытается обмануть GPS-приемник, ширококестельно передавая немного более мощный сигнал, чем полученный от спутников GPS, такой, чтобы быть похожим на ряд нормальных сигналов GPS.

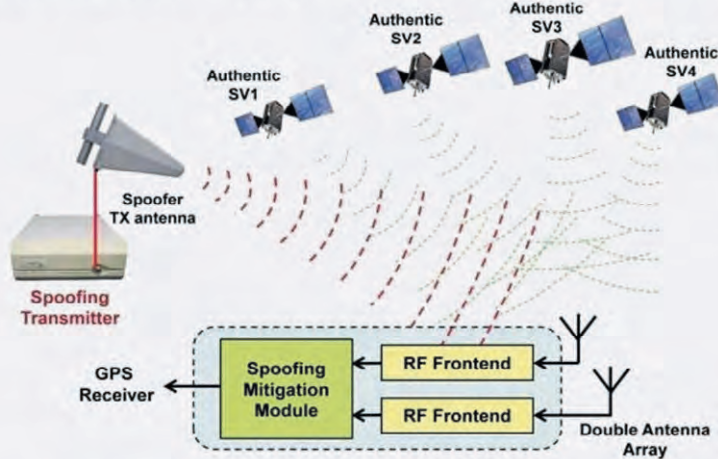


Рис. 2. Иллюстративная схема воздействия спуфинга

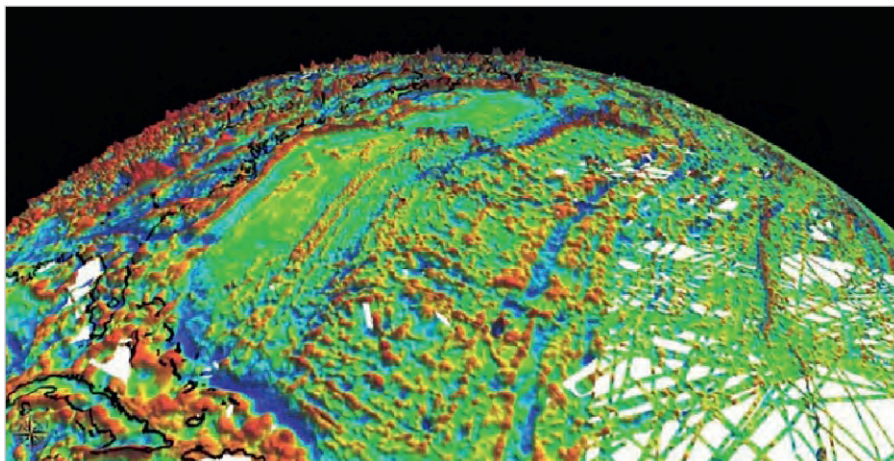


Рис. 3. Карта геомагнитной активности Земли

закупаются и средства наблюдения: радиолокаторы, лидары и специальные камеры.

Третья часть — средства кинетического поражения беспилотников: лазерные установки, дроны-перехватчики, противовоздушные комплексы «воздух-воздух» и «земля-воздух». Это самый перспективный сегмент рынка, и он будет расти в ближайшие годы.

Наряду с закупками антидроновых систем растёт недовольство со стороны заказчиков, потому что системы работают неэффективно, и предприятиям приходится заказывать технический аудит у независимых компаний. Актуальны две проблемы: несоответствие технических характеристик оборудования заявленным и его неправильное размещение на защищаемом объекте.

Общее о системах РЭБ и установке защитных помех

За последние несколько лет средства РЭБ, базирующиеся на значительном конструктивном заделе и наработках, сформированных ещё в СССР и продолженных в России, превратились в стратегический ресурс. Общй принцип определения координат с помощью спутникового оборудования представлен на рис. 1.

Дублирующие системы наведения (инерционные и другие на основе замещающей поверхности) не всегда обеспечивают необходимую точность наведения, в отличие от спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС и GALILEO.

На рис. 2 представлена типичная схема воздействия спуфинга (подмены спутникового сигнала). Ещё одна проблема, заслуживающая внимания

специалистов, касается способа постановки помехи средствами РЭА специального назначения, симулирующими GPS-сигналы с сигнатурой, соответствующей другой территории, к примеру, соседней страны. Высокие технологии симуляции и GPS-спуфинга в данном примере влияют на навигацию БПЛА и могут приводить к отклонению полётной программы, когда объект лишается корректного управления, теряется или летит совсем в другую сторону.

Что касается известной технологии позиционирования по координатам GPS, некогда популярной и востребованной повсеместно, а теперь признаваемой специалистами как анахронизм эпохи, в качестве самостоятельной системы она недостаточна, поэтому применяется в комплексе с другими навигационными технологиями. Есть специальные и открытые интернет-ресурсы, фиксирующие в любой точке мира в реальном времени помехи GPS, к примеру GPSJam.org [3].

GPS не вечен: проблемные вопросы сегодняшнего дня

Уместно обратить внимание на интересный факт: GPS не вечен. Уровень развития автономного (или частично автономного) с электронной системой ДУ транспорта прямо влияет на национальную безопасность. Речь о РЭА — сканерах с инфракрасным и лазерным способами определения координат, уже установленных на современных транспортных средствах (ТС), включая гибридные автомобили и электромобили. Эти устройства РЭА могут дать условно точную карту местности там, где они используются. Причём внедрение или использование такой бытовой (гражданской) навигации внешними системами не заблокировано, и их владельцы могут даже не знать об использовании своих навигационных систем дистанционными инструментами.

Эхо торговой войны с повышением пошлин

Есть сведения о том, что разработчики в КНР непрерывно собирают данные бортовой телеметрии с проданных в США машин и в дальнейшем имеют возможность использовать информацию в военных целях. Например, составить точные карты для автономной навигации средств доставки крылатых ракет и управляемых снарядов, БПЛА с защитой от спуфинга.

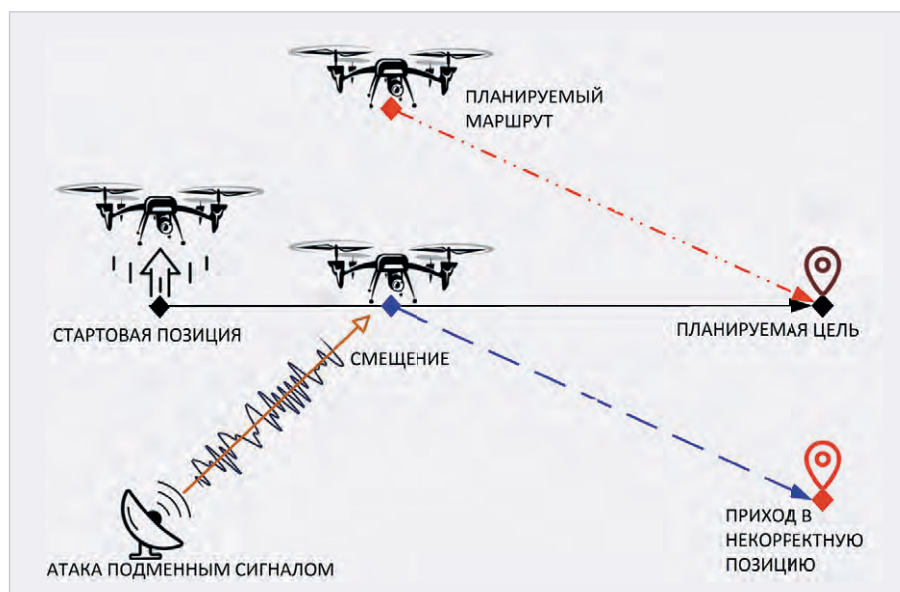


Рис. 4. Иллюстрация корректного (сверху) и некорректного (внизу) полета БПЛА при спуфинговой атаке

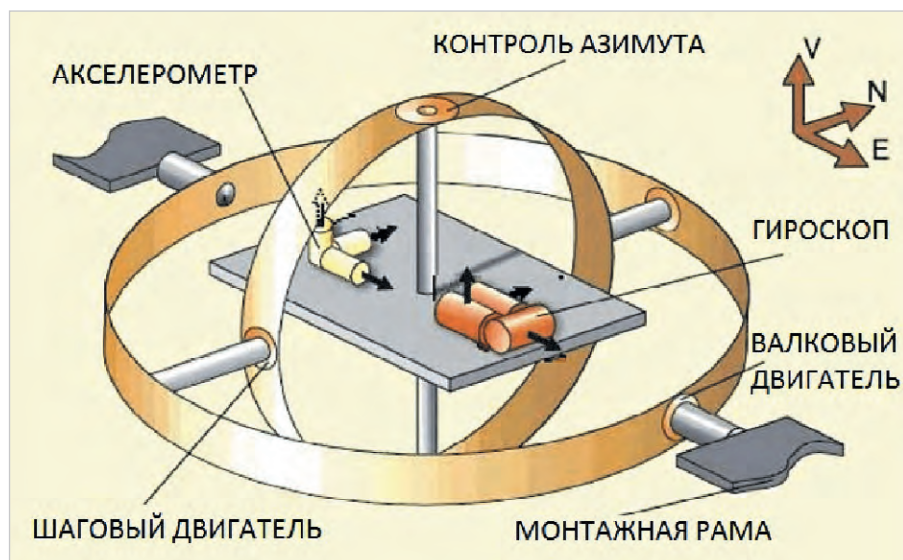


Рис. 5. Основные элементы управления движением БПЛА

Когда сегодня с большим рвением в СМИ поднимают тему «торговой войны», инициатором которой в начале 2025 года якобы выступил 45-й и 47-й президент США Дональд Трамп, обывателям забывают сообщить детали инициатив драконовских ввозных пошлин. А они имеют принципиальное значение: конкуренция на рынке между ведущими мировыми производителями дополняется защитой от съёма данных через ввозимые китайские автомобили.

Многие модели смартфонов с технологией локального позиционирования уже позволяют реализовать возможность навигации в помещениях, защищённых от проникновения сигнала сотовой связи и GPS. Эти технологии в том числе основаны на магнитных

аномалиях окружающей обстановки. Если предварительно картографировать магнитные поля и исключить сторонние возмущения ЭМ-помех на частоте основного сигнала, масштабировать данные системы, тогда речь идёт о навигационной РЭА, ориентирующейся на магнитные аномалии Земли. Причём полученные данные можно картографировать со спутника с точностью уже до метра.

Особенности РЭА геомагнитной навигации и шифрования

Одним из отечественных примеров в данной области можно назвать корреляционно-экстремальную систему навигации, разработанную в Раменском приборостроительном конструк-

торском бюро (РПКБ). В отличие от ранее известных электронных навигационных систем, действующих по заранее известным навигационным ориентирам, задача позиционирования решается на основе сразу нескольких эталонных параметров. За основу берутся карты рельефа замещающей поверхности, параметры гравитационного и магнитного полей Земли. Всё это работает в связке с инерционной навигационной системой, баро- и радиовысотомерами, магнито- и гравиметрами [1].

На рис. 3 показана карта геомагнитной активности Земли. Дублирующие системы с разным способом ориентации необходимы из-за большой зашумлённости магнитного поля, серьёзно снижающий точность навигации.

ИИ требуются большие объёмы информации для надёжной селекции шумов, именно поэтому особенное внимание разработчиков РЭА направлено на конструирование сверхчувствительной РЭА для качественного приёма сигналов. Одним из отечественных примеров подобной техники можно считать корреляционно-экстремальную систему навигации, разработанную в РПКБ.

На рис. 4 показано воздействие атаки спуфинга на БПЛА, а сверху – полёта с защищённой системой.

Работа над алгоритмами шифрования не менее важна. Параллельно активно разрабатываются способы оптимизации алгоритмов шифрования в облачных сервисах на основе технологии гомоморфного шифрования – уникального метода защиты данных, позволяющего производить вычисления над зашифрованной информацией без необходимости её дешифрования. Это открывает широкие возможности для безопасной обработки конфиденциальных данных в облачном хранилище и позволит создать надёжную систему защиты информации в соответствии с современными требованиями скорости и производительности.

Электронная интеллектуальная система обнаруживает обман по той же аналогии, как ведут борьбу с мошенниками, меняющими голос с помощью дипфейков, когда для анализа данных проводится анализ десятков характеристик голосовых данных: силы звука, тембра, изменения спектра, частоты, тона и других. АЧХ

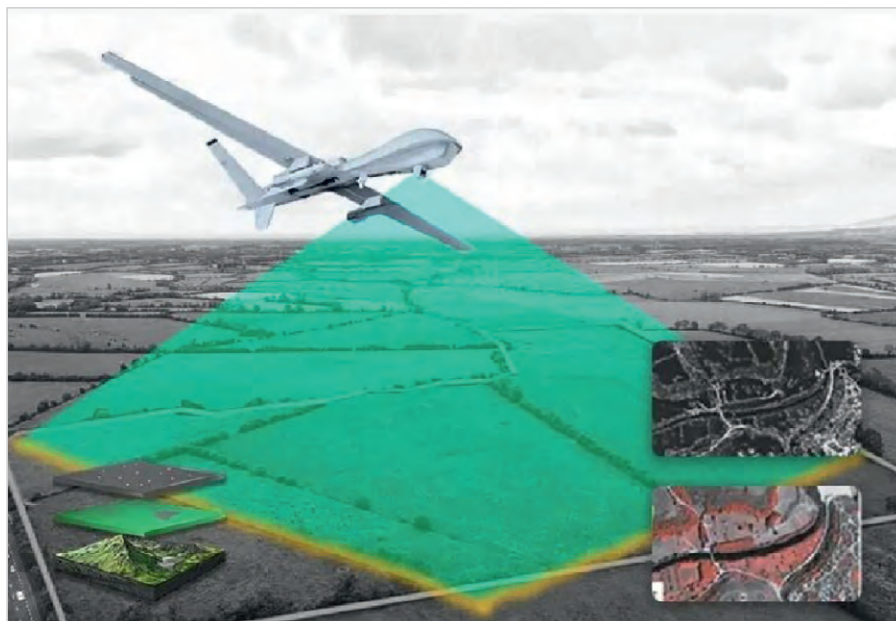


Рис. 6. Иллюстрация считывания ландшафта земли как элемент системы навигации и сравнения шаблонов, заложенных в память



Рис. 7. Варианты воздействия на БПЛА разных сигналов с Земли под контролем системы РЭБ типа «Гроза-С» в гражданском и военном вариантах

голоса человека так же уникальны, как отпечатки пальцев или радужные оболочки глаз, именно поэтому идентификация по голосу входит комплексным фактором в ЕБС и системы идентификации, в том числе бытового назначения, где ординарные (эталонные) данные пополняют реестр на базе госинформсистемы «Антифрод» с протоколами защиты, аналогичными тем, что применяются на портале «Госуслуги».

Принцип защиты БПЛА в полёте

Защитные механизмы БПЛА в полёте и движении реализуются также с

помощью РЭА. На рис. 5 показаны основные части управления БПЛА. Принцип действия радарных уровнемеров основан на измерении времени распространения радиоволны от антенны уровнемера до поверхности продукта, уровень которого измеряется, и обратно. Радарные уровнемеры устойчивы к таким факторам, как запылённость, испарения с контролируемой поверхности, и обладают высокой точностью измерения в различных средах. На рис. 6 показан пример считывания ландшафта земли как элемента системы навигации и сравнения шаблонов, заложенных в программную память БПЛА.

Принцип работы системы глушения БПЛА

При обнаружении потенциальной угрозы со стороны беспилотника электронная система, анализируя несколько факторов, принимает решение на глушение (либо может работать в постоянном режиме постановки глушащей помехи). Сначала система нацеливается на каналы командной связи дрона, поскольку с операторами или со спутниками GPS в автоматическом режиме происходит взаимодействие на определённых радиочастотах [2]. Оборудование для глушения транслирует сильные помехи на этих частотах, эффективно заглушая настоящие сигналы управления или навигации. Эффективность помех во многом зависит от сложности конструкции БПЛА и его устойчивости к помехам. Некоторые модели БПЛА двойного назначения или предназначенные для военных целей оснащены технологией защиты от помех, что делает их нейтрализацию более сложной с помощью стандартных методов глушения (рис. 7).

Помехи нарушают способность дрона получать команды от оператора, а также существенно затрудняют доступ к сигналам GPS, необходимым для навигации. Без этих сигналов большинство дронов либо переходят в безопасный режим, который может включать возврат в заданное место или медленное снижение до посадки, либо просто зависают на месте, пока не закончится заряд батареи. Некоторые продвинутые системы глушения могут использовать спуфинг, когда устройство глушения формирует и передаёт ложные сигналы, имитирующие сигналы управления от оператора или сигналы GPS. Как мы показали выше, эффективный и своевременный мощный спуфинг может обмануть дрон и заставить его следовать ложным командам, что позволит глушителю косвенно контролировать траекторию полёта БПЛА.

Решения для глушения необходимы в различных сценариях, включая защиту военных объектов, аэропортов, важных коммерческих объектов и критической инфраструктуры и даже для предотвращения шпионажа или террористической деятельности. Такие решения используют взвешенно, с осторожностью, адекватно опасности, поскольку неизбирательное глушение может помешать нор-



Рис. 8. Квантовая электромагнитная навигационная система AQNav в трюме грузового самолёта C-17

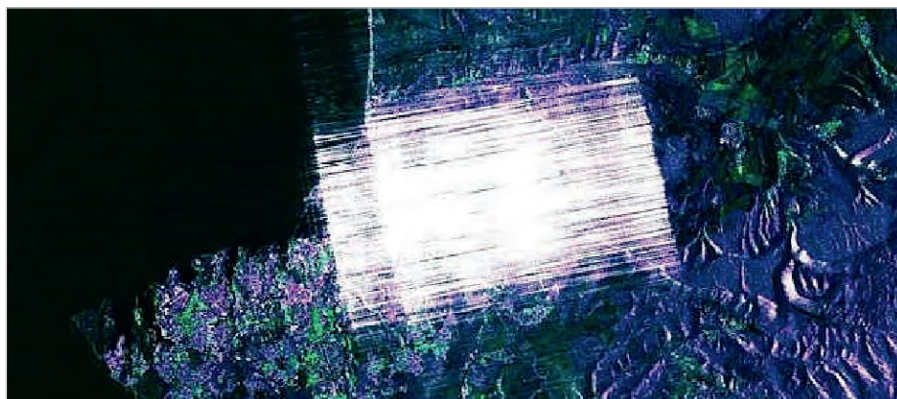


Рис. 9. Так выглядит шумовая помеха в проекции карты местности, сканированной со спутника, масштаб в 1 см – 1 км

мальной работе средств связи, РЭА и в целом легальной, полезной навигации в соответствующем районе [5].

Особенное объяснение фантомных меток на радарх РЛС

«Фантомные метки» – понятие сленговое, на профессиональном языке означающее препятствия, засекаемые электронным радаром – локатором самолёта. Об этом знает каждый опытный пилот.

Электронный радар построен на эффекте Доплера и действует по принципу дальномёра или эхолота: имеет встроенный генератор импульсов сверхвысокой радиочастоты и приёмник сигналов на той же частоте. Есть отличия в радарх направленного действия и работающих в режиме сканера пространства вокруг – на 360° – во все стороны от объекта.

Когда нет препятствий, отправленный локатором сигнал поглощается пространством. Когда сигнал отражается от препятствия (в воздушном пространстве), он воспринимается приёмником, при этом электронная система просчитывает автоматически время прохода отражённого сигнала в пространстве – так определяется дистанция до объекта, и можно классифицировать сам объект по массе, форм-фактору (габаритам) и другим параметрам. Поэтому говорить о том, что обнаружен фантомный объект или НЛО, некорректно. Всегда можно установить курс, размер, форму, иные особенности, вплоть до радиоактивного излучения. Соответственно сигнал радара самолёта (вертолёта) может показать в разном формате и стаи птиц, и БПЛА, и встречный самолет в том же «эшелоне» высоты, и электромагнитную волну, и изменя-

ющийся грозовой фронт – всё то, что в разной степени отражает сигнал.

Радары гражданских самолетов (и их пилоты) не могут классифицировать цели (объекты) по форм-фактору, в отличие от военных РЛС. Поэтому так называемые фантомные метки на радарх гражданских самолетов – не более чем стаи птиц или даже скопление облачности или грозовые поля при соответствующих метеоусловиях. Смотреть надо не на наличие меток, а на динамику изменения их активности. Стаи птиц типично не летят на одной высоте, они перемещаются; облака, отражающие сигнал радара при наличии грозовой активности, не перемещаются со скоростью самолета; возможные и крупные БПЛА редко летят на высотах 12–18 км над землёй, не меняя траектории полёта.

Если объекты, зафиксированные гражданским радаром, исчезают с радара (как временные явления, что чаще всего) – опасаться нечего. Если остаются активными в той же фазе, направлении и локации, тогда уместно зафиксировать полученные данные в бортовом журнале и в переговорах с диспетчером (с автоматической фиксацией в бортовом чёрном ящике) и сопоставить данные с РЛС военных по месту и времени.

Новейшие квантовые сенсорные устройства РЭА

Самолёты, вертолёты и БПЛА могут избежать влияния РЭБ. Пока же, несмотря на попытки разработчиков, на каждый БПЛА или управляемый снаряд (ракету) систему AQNav не установить из-за габаритов и потребления энергии.

Чтобы сохранить систему в действии и предотвратить влияние спурфинга на случай подавления сигналов,

используют геомагнитную навигацию в связке с GPS-системами.

Фильтрацию входящих сигналов обеспечивают устройства геомагнитной навигации с ИИ. Из американского опыта можно привести пример компании SandboxAQ, презентовавшей систему квантовых сенсоров AQNav с ИИ. Последние, по заверениям разработчиков, весьма чувствительны, улавливают едва заметные деформации магнитного поля, а модуль ИИ в режиме реального времени проводит сверку с эталонными картами и так игнорирует шумовые помехи и РЭБ (рис. 8).

Это навигационная система широкого назначения для противодействия подмене и глушению GPS. Когда сигналы GPS подавлены или недоступны, AQNav использует алгоритмы искусственного интеллекта, чувствительные квантовые датчики-магнитометры и собранные данные о магнитном поле Земли с уникальными географическими характеристиками для обеспечения навигации в режиме реального времени. Затем с помощью алгоритмов ИИ обеспечивается сравнение характеристик земной коры с известными магнитными картами, что позволяет AQNav точно и оперативно определять местоположение.

В основе разработки знание о том, что магнитное поле Земли излучает постоянный пассивный, ориентированный вонне сигнал, что делает его надёжным источником данных для навигации в пространстве в совокупности с другими инерциальными и другими источниками. Поскольку электронные квантовые датчики очень чувствительны, алгоритмы ИИ используются для улучшения соотношения сигнал/шум, что устраняет механические, электрические или дру-



Рис. 10. Пример карты Пири Рейса

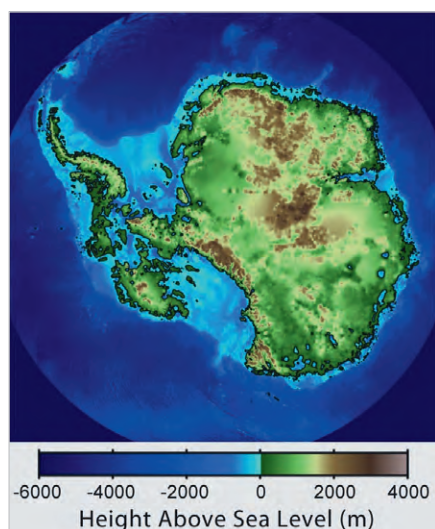


Рис. 11. Вариант карты с условной топографией, вид из космоса

гие помехи, которые могут повлиять на способность системы точно определять своё местоположение.

Квантовая система навигации AQNav работает в любых погодных условиях, может использоваться на воздушной, наземной и морской местности и завершила лётные испытания в 2023 году [9].

Тестовыми носителями AQNav в разное время выступали транспортный самолет С-17А, стратегический бомбардировщик В-52 и даже ударный дрон MQ-9. Для защиты объектов путём постановки помех РЭБ в таком случае нужны квантовые сенсоры, энергетические мощности и ресурсы поистине гигантских масштабов; это пока спорный с технической точки зрения вопрос. Квантовые сенсорные устройства широко применяются в РЭА кос-

мического назначения. В перспективе квантовая система навигации может использоваться для улучшения управления автономными транспортными средствами и использоваться под землёй или под водой, где нет сигналов GPS.

Геодезическая гравиметрия и другие средства

Есть ещё один рассматриваемый разработчиками РЭА элемент и способ ориентации в движении – геодезическая гравиметрия, основанная на измерении изменения ускорения свободного падения из-за локального распределения масс. В случае применения способа в комплексе с другими навигационными системами создание и постановка помехи затруднены, ибо ориентация навигационного оборудования идёт по ориентирам земных пород с помощью гравиметрической разведки, а породы стационарны, ландшафты не перемещаемы.

Практические успешные примеры применения средств РЭБ для нарушения навигации с использованием электронной картографии выглядят следующим образом. На условно низкой околоземной орбите несколько спутников одной группировки с помощью радиолокационных средств сканируют поверхность местности. На основе этих данных в автоматическом режиме формируется цифровая карта рельефа с указанием перепадов высот. Далее эта карта загружается в память навигационной системы летательного аппарата – будь то БПЛА, управляемые боеприпасы или иные виды высокоточного вооружения – и используется в полёте для ориентирования без необходимости обращения к спутниковому сигналу в реальном времени. В таком примере (рис. 9) единственное препятствие во время сканирования местности спутниковыми средствами для создания карты местности способом радиолокации – постановка шумовой помехи как простого примера РЭБ на частоте РЛС.

Противодействие спутниковому влиянию

Спутниковые группировки состоят из тысяч аппаратов, и орбиты их можно высчитать с высокой точностью. Это может понадобиться для организации его «засвечивания» с Земли – постановкой помехи над определённой территорией или с другого спутника.

Время пролёта всех спутников известно до долей секунды. Наземные средства РЭБ могут и дежурить, и приезжать в нужное время, и быть стационарными.

Главное в наше время – не вычислить время появления спутника над районом разведки, а чтобы расчёт РЭБ поставил в нужный момент помеху и автоматически ориентировал антенны-излучатели.

Геомагнитное поле не изменяется от высокочастотного электромагнитного поля. Геомагнитное пространство имеет неповторимый формат, и карты естественных магнитных полей Земли давно составлены – казалось бы, ничто не мешает ими воспользоваться. Есть обучаемые ИИ технологии распределения больших и масштабируемых данных. Первые карты адмирала Пири Рейса (рис. 10) 1513 года были построены относительно системных географических ориентиров, возможно, с опорой на геомагнитные параметры данных, тем не менее спустя 6 веков электронные средства магнитной навигации до сих пор не внедрены наряду с GPS-ориентированием. После завоевания к 1517 году Османской империей Египта адмирал Пири Рейс подарил карту мира султану Селиму I. На рис. 11 показан вариант карты с условной топографией, вид из космоса.

Детализация и масштабирование подобных карт пока требуют значительного по форм-фактору и весу, потребляемой мощности и особенностям обслуживания РЭА. Ещё две опасности некорректного применения геомагнитной навигации состоят в возможностях ослабления геомагнитного поля по мере удаления летящего объекта от земной поверхности и изменения поля ввиду постановки (намеренной или случайной) на земле объектов, обладающих магнитным значением, к примеру, разбитой бронетехники.

Примеры российских действующих систем

Одна из интересных, хоть и небезупречных с технической точки зрения, современных электронных систем – ЕСУ ТЗ «Созвездие-М» (рис. 12).

Единая система управления тактического звена (ЕСУ ТЗ) – это система с тактическими терминалами и абонентскими коммуникаторами, разработанная воронежским концерном



Рис. 12. ЕСУ ТЗ «Созвездие-М».

Фото с сайта: https://topwar.ru/uploads/posts/2012-02/1330325993_05.jpeg

«Созвездие», которая предназначена для реализации концепции сетевых действий: объединения участников акции в единую информационно-разведывательную сеть. У каждого участника свой электронный планшет с картой местности и определения координат. Предполагалось, что наличие такой системы даёт превосходство над противником в скорости обмена разведывательной информацией и упрощает коммуникацию между различными частями задействованных сил. ЕСУ ТЗ состоит из 11 активных подсистем, управляющих подразделениями радиоэлектронной борьбы, артиллерией, ПВО, инженерным и материально-техническим обеспечением, а также единой информационной сети, где интегрированы различные виды связи, в том числе радиорелейная, тропосферная, цифровая. Система обеспечивает связь с беспилотниками и другими средствами разведки, взаимодействие в реальном времени разных видов и родов войск [6]. Индивидуальный тактический терминал модели ТТ-6.5 представлен на рис. 13.

В начале декабря 2024 года стало известно о решении Индии заключить с Россией договор на покупку усовершенствованной радиолокационной системы (РЛС) раннего предупреждения «Воронеж» с дальностью действия более 8000 км. Сумма сделки оценивается в \$4 млрд [8].

Семейство РЛС «Воронеж» (рис. 14) состоит из комплексов метрового («Воронеж-М», «Воронеж-ВП»), дециметрового («Воронеж-ДМ») и сантиметрового («Воронеж-СМ») диапазонов волн. В состав платформы входят приёмопередающая установка с цифровой антенной решёткой, быстровозводимое здание для личного состава и несколько контейнеров с радиоэлек-



Рис. 13. Индивидуальный тактический терминал модели ТТ-6.5

тронным оборудованием. Конструкция позволяет при необходимости быстро модернизировать систему в ходе эксплуатации. Производителем РЛС является АО «Концерн воздушно-космической обороны «Алмаз-Антей» [7]. Благодаря широкому диапазону действия радиолокационная система обеспечит раннее предупреждение о потенциальных угрозах.

Примерно 60% компонентов системы «Воронеж» будут производиться в Индии, а готовая станция будет смонтирована в Читрадурге (штат Карнатака).

Выводы

Одним из путей преодоления недостатков радиоэлектронных систем может быть возврат в том или ином виде к ориентации по геофизическим (магнитным) полям. Такой приём предполагает немало выгод даже в XXI веке. Во-первых, из-за точности позиционирования объекта, уже достижимой в значениях 1–2 метра. Кроме того, подавить и засорить постановкой помехи с помощью РЭБ системы навигации, основанную на данных естественных полей Земли, непросто. Навигационные комплексы, работающие по магнитному полю планеты, отличаются высокой помехоустойчивостью.

Несмотря на удобство радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) геомагнитной навигации, принципы которой, кстати, были открыты задолго до появления космической навигации, эта система всё ещё имеет ряд недостатков. Тем не менее карта естественных магнитных полей Земли была составлена давно, и геомагнитная навигация может эффективно использоваться в составе современных электронных навигационных комплексов.



Рис. 14. Участок фазированной решётки антенны РЛС «Воронеж-М»

Литература

1. Геомагнитная навигация: российская РЭБ как двигатель мирового прогресса. URL: <https://topwar.ru/255261-geofizicheskaja-navigacija-rossijskaja-rjeb-kak-dvigatel-mirovogo-progressa.html>.
2. Кашкаров А.П. Система спутниковой навигации ГЛОНАСС. М.: ДМК-Пресс, 2017. 96 с.
3. Кашкаров А.П. Электронные устройства для глушения беспроводных сигналов (GSM, Wi-Fi, GPS и некоторых радиотелефонов). М.: ДМК Пресс, 2016. 96 с.
4. От 60 до 80% гражданских предприятий установили системы защиты от дронов. URL: <https://www.dk.ru/news/237220817>.
5. Простое объяснение работы системы глушения БПЛА. URL: https://overclockers.ru/blog/Hardware_inc/show/133339/Ekspert-na-pal-cah-obyasnil-kak-rabotajut-anti-dronovye-umnye-sistemy.
6. Тумбарцев М. Единая система управления тактического звена. URL: <https://anna-news.info/edinaya-sistema-upravleniya-takticheskogo-zvena-na-rossijskih-tankah/>.
7. India, Russia set to sign USD 4-billion deal for advanced radar system. URL: <https://www.indiatoday.in/india/story/india-russia-all-set-for-usd-4-billion-deal-for-advanced-radar-system-2646849-2024-12-09>.
8. Russian Jamming Is a Real Threat to Military Aircraft—But America's New Quantum Tech Can Defeat It. URL: <https://www.popularmechanics.com/military/aviation/a62085402/magnetic-navigation-aircraft/>.
9. Uelch K. SandboxAQ launches navigation system to counter GPS spoofing, jamming. URL: <https://breakingdefense.com/2024/06/sandboxaq-launches-navigation-system-to-counter-gps-spoofing-jamming/>.



К 130-летию со дня рождения великого советского физика Игоря Евгеньевича Тамма. Анонс статьи

Виктор Алексеев

26 июня 2025 года исполняется 130 лет со дня рождения Игоря Евгеньевича Тамма (1895–1971) – российского физика-теоретика, академика АН СССР, лауреата Нобелевской премии по физике.

Игорь Тамм получил широкую мировую известность благодаря своим фундаментальным работам, таким, например, как: фотоэффект в металлах; особые энергетические уровни электронов вблизи поверхности кристаллов; квантовая теория рассеяния света в кристаллах. Спустя четверть века эти работы Тамма легли в основу базовых принципов разработки транзисторной техники.

В возрасте всего 38 лет Тамм был избран членом-корреспондентом АН СССР по отделению математических и естественных наук. Игорь Тамм был одним из ведущих разработчиков термоядерного оружия СССР. В 1953 году Тамм стал академиком АН СССР по отделению физико-математических наук.

Среди прочих научных достижений Игоря Тамма особую роль играет создание теории «Черенковского излучения» – ЧИ, за что вместе с Ильёй

Михайловичем Франком и Павлом Алексеевичем Черенковым получил в 1958 году Нобелевскую премию по физике.

В 1934 году аспирант С.И. Вавилова Павел Алексеевич Черенков обнаружил, что заряженные элементарные частицы, проходя с очень большими скоростями сквозь воду, испускают свет. В 1937 году Илья Франк и Игорь Тамм дали теоретическое объяснение этому эффекту.

Игорь Тамм показал, что ЧИ можно использовать как своего рода «световую подпись» заряженных частиц, движущихся в прозрачной среде, со скоростью, превышающей фазовую скорость распространения света в этой среде.

Излучение возникает только при условии $v > c/n$, где n – показатель преломления среды, v – скорость частицы, c – скорость света. Таким образом, ЧИ представляет собой яркий пример того, как относительно простое физическое наблюдение при правильной интерпретации может привести к важным открытиям и проложить новые пути для дальнейших исследований.

Эффект Черенкова широко используется в настоящее время, в первую очередь – в классических приложениях ядерной физики. В нейтринной обсерватории Super-Kamiokande (Япония) для регистрации ЧИ используется резервуар с 50 000 тонн сверхчистой воды, окружённый 11 000 фотоумножителей. В колоссальной установке IceCube на Южном полюсе в качестве детектирующей среды применяется лёд, в котором на глубине до 2,5 км размещены более 5000 ультрабыстрых ФЭУ.

Космические лучи сверхвысоких энергий, сталкиваясь с атмосферой Земли, вызывают ливни вторичных частиц, которые, в свою очередь, стимулируют вспышки ЧИ в атмосфере. Эти вспышки изучаются с помощью наземных телескопов, например, с помощью американской системы VERITAS.

В то же время ЧИ используется в самых передовых проектах ядерной физики. Так, в «Большом адронном коллайдере» (БАК) используют детекторы RICH (Ring Imaging Cherenkov), которые работают именно по принципам, описанным Таммом. Когда частица проходит через радиатор, возникающее ЧИ фокусируется в кольцо на фотодетекторе. Радиус кольца зависит от скорости частицы, что позволяет различать пионы, каоны и протоны с одинаковым импульсом. Кольцевые детекторы ЧИ (RICH) играют значительную роль в экспериментах по физике частиц и ядерной физике, обеспечивая идентификацию частиц. Они работают исключительно хорошо для идентификации адронов, поскольку существует мало других методов, которые могут различать пионы, каоны и протоны в многогигаэлектронвольтовом диапазоне импульсов.

В последние годы появляется всё больше исследований внутренней динамики ЧИ, характеризующейся временными масштабами в субфемтосекундном диапазоне, которые по-новому раскрывают особенности



Детекторы черенковского излучения RICH [<https://hep.hamamatsu.com/>]

этого явления, отсутствующие в общей квантовой теории. Например, существует исследование, показывающее, что ЧИ содержит ранее неизвестные квантовые эффекты на аттосекундных временных масштабах, включая парадоксальное «отрицательное время пространства».

Крайне интересны опыты с «обращённым ЧИ», при котором заряженная частица, движущаяся со сверхсветовой скоростью в веществе, испускает когерентное радиоволновое излучение, направленное не вперёд, как в обычном ЧИ, а назад, к источнику частицы. Этот новый механизм обращённого ЧИ может найти применение в компактных источниках света и детекторах частиц нового поколения.

Черенковское излучение применяется в современной медицине. Например, в новейших моделях ПЭТ (позитронно-эмиссионная томография) используются методы, которые преобразуют гамма-кванты в видимый свет через механизм ЧИ.

Недавно открытый метод смещения спектра ЧИ из голубого в красную область даёт возможность более детального обследования внутренних органов.

Поразительные результаты дают эксперименты с изображениями цветного ЧИ, исходящего от пациентов во время лечения. Цветовые оттенки ЧИ в лучевой терапии могут использоваться для интерпретации объёма крови в тканях, насыщения кислородом и основных сосудов внутри тела.

Перечисленные приложения стимулировали развитие следующих сверхбыстрых электронных устройств.

- Детекторы Черенковского излучения – Ring Imaging Cherenkov (RICH).
- Кремниевые фотоумножители (SiPM), способные регистрировать отдельные фотоны с временным разрешением в наносекунды.
- Высококочувствительные ПЗС-матрицы для регистрации слабых световых сигналов.

- АЦП с частотой дискретизации до ГГц для точной регистрации формы импульсов.

- Сверхбыстрые системы реального времени для обработки потоков данных.

- Специализированные ПЛИС для наносекундной обработки сигналов.

Кроме того, работы Игоря Тамма вызвали появление новых устройств с уникальными оптическими свойствами, таких, например, как аэрогели с точно заданным показателем преломления и кварцевое стекло с ультрафиолетовым поглощением.

Также теоретические работы Игоря Тамма оказали влияние и на многие другие области электроники, начиная с проектирования мощных лазеров и солнечных батарей до создания установок управляемого термоядерного синтеза.

Все эти вопросы будут рассмотрены в следующем номере журнала в статье, посвящённой юбилею Игоря Евгеньевича Тамма.



НОВОСТИ МИРА. ЧИТАЙТЕ НА ПОРТАЛЕ WWW.CTA.RU

Гибридно-плёночный DC/DC-преобразователь напряжения с эффективными встроенными входным и выходным фильтрами электромагнитных помех

Модули DC/DC-преобразователей напряжения, выпускаемые многими производителями, имеют на входе и выходе встроенные фильтры, подавляющие электромагнитные помехи до уровней, допустимых для соответствующих применений. В некоторых случаях, когда восприимчивость к воздействию импульсных помех, излучаемых блоками питания, высока, используются модули фильтров, обеспечивающие более серьёзное ослабление шумов.

Для установки модулей фильтрации требуется дополнительное место на печатной плате. Снизить проблемы с компоновкой и сэкономить площадь платы для размещения функциональных схем позволяет встраивание фильтров с большими коэффициентами ослабления помех на входе и выходе модулей. Для применений, где есть жёсткие требования к площади, занимаемой блоками питания, предлагается 30-ваттный гибридно-плёночный модуль DC/DC-преобразователя напряжения WTAL40-28FS5 от компании Wibbow с встроенными на входе и выходе фильтрами.

Входной фильтр с проходным током 3 А и коэффициентом ослабления помех 55 дБ на

частоте 500 кГц обеспечивает соответствие требованиям стандарта MIL-STD-461C, CE03 и обеспечивает фильтрацию для дополнительных преобразователей через выводы фильтра. Выходной фильтр ослабляет высокочастотные синфазные и дифференциальные помехи. Это обеспечивает более высокое значение ширины пропускания пульсаций напряжения и исключает необходимость применения внешних развязывающих конденсаторов. Входной и выходной фильтры ослабляют излучения, обеспечивая более спокойную работу по сравнению со стандартными DC/DC-преобразователями.

Предлагаемый преобразователь напряжения выполнен по одноканальной прямоходовой схеме с регулированием методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с постоянной рабочей частотой до 450 кГц. В контуре обратной связи применяется трансформаторная широкополосная развязка, выносная обратная связь по напряжению используется для компенсации падения напряжения на соединительных проводах.

Другими сервисными функциями являются: дистанционный командный вход, синхронизация рабочей частоты внешним синхросигналом, подстройка выходного напряжения на выводах модуля в небольших пределах для компенсации падения напряжения на проводниках. Модуль снабжён следующим комплектом защит: от перегрузки по току и короткого замыкания, обеспе-



чиваемой схемой ограничения выходного тока до уровня 115% от максимального значения. Диапазон входного напряжения от 17 до 50 В. Типовое значение КПД 75% при полной нагрузке. Устройство предназначено для работы в диапазоне температур от -55°C до +125°C (на основании корпуса).

Параметры WTAL40-28FS5 идентичны параметрам модуля FMTR2805S (Crane Electronics, Interpoint, США).

DC/DC-преобразователь напряжения производится в соответствии с требованиями национальных производственных стандартов:

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





Медиапортал СЭТА

Современная Электроника и Технологии Автоматизации



ТОВАРИЩ!
БИЗНЕС РОСТ ЗАМЕДЛИЛ?

РАНО ВПАДАТЬ В СТУПОР!

НУЖНО КРИЧАТЬ О СЕБЕ НЕМЕДЛЯ,

А МЫ

ОБЕСПЕЧИМ РУПОР!



Журналы

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



Видеоканалы

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



Медиапортал

Это ваши новости и статьи, оперативно доставленные по адресу



Конференции

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



Дизайн-студия

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



СОВРЕМЕННАЯ
ЭЛЕКТРОНИКА

Издательство «СТА-ПРЕСС»

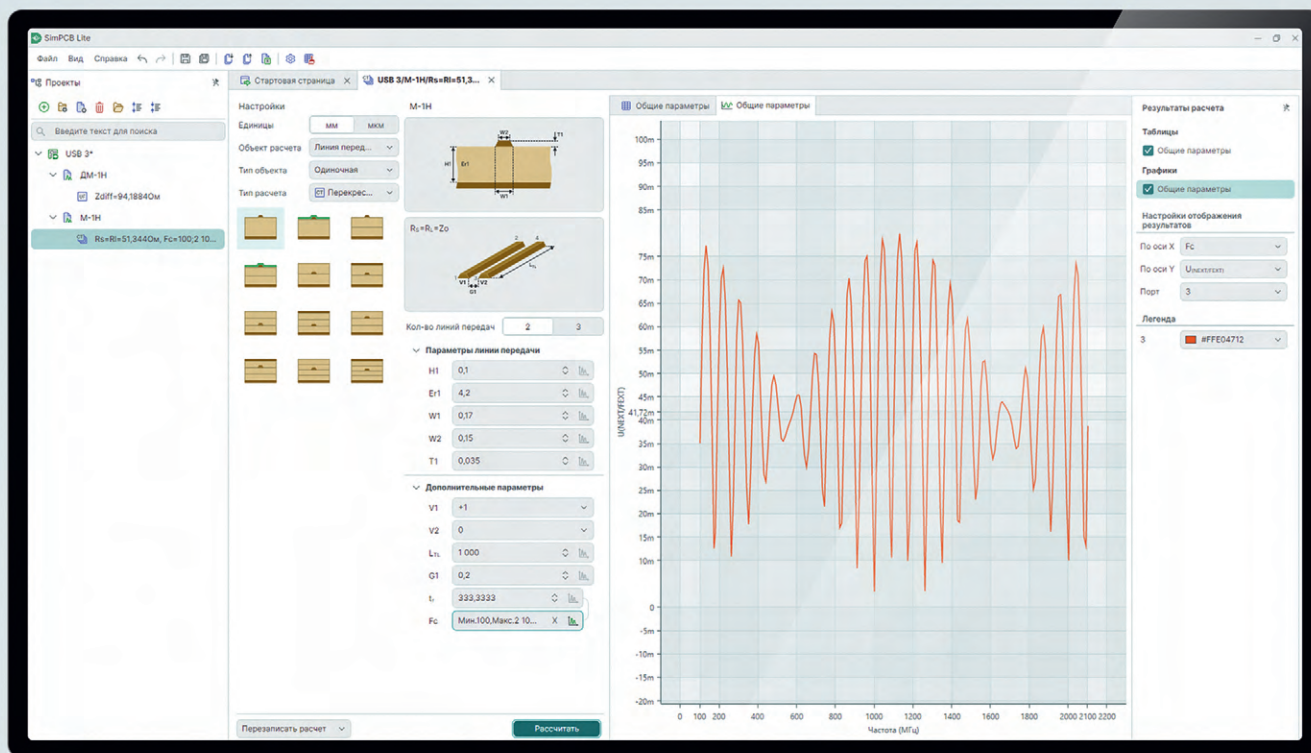
+7 (968) 567-30-06 / shop@cta.ru / www.cta.ru

Приглашаем вас к сотрудничеству!



SimPCB Lite

Новое отдельное приложение
для обеспечения целостности сигнала



- + **Большой набор готовых структур линий передачи** (одиночные, дифф. пары, копланарные) и переходных отверстий
- + **Расчет без потерь.** Вычисление первичных и вторичных параметров линий передачи и переходных отверстий (емкость, индуктивность, волновое сопротивление, задержка сигнала и т.д.)
- + **Частотный анализ** (импеданс, индуктивность, сопротивление, проводимость диэлектрика, ослабление сигнала)
- + **Расчет S-параметров одиночных и дифференциальных линий передачи**
- + **Вычисление перекрестных помех без учета потерь**
- + **Множественный расчет** (вычисление одного или нескольких параметров с учетом шага)

Чтобы получить консультацию и приобрести новое приложение SimPCB Lite, обратитесь к специалистам ЭРЕМЕКС