

Август 2025 | № 10

Электронный дайджест

ЭКСПЕРТ+



ДИПОЛЬ



Технологии

2

Кристалльная надежность

Оборудование и методы монтажа полупроводниковых кристаллов.



Оборудование

12

На эргономике не экономят

Ключевые аспекты современной лабораторной мебели.



Событие

18

Центральное событие

С 26 по 29 мая в «Экспоцентре» в Москве проходила «Металлообработка-2025» — 25-я международная выставка «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности».



Новость

20

Нормативная лексика

В городе Нойбиберге (Германия) состоялось ежегодное заседание Технического комитета МЭК TC 101 Electrostatics.





Оборудование

22

Рациональное упрощение

Особенности осциллографических опций ОСЦ1/SC0 и ОСЦ2/SC1 многофункциональных калибраторов MEATEST MK9023A.

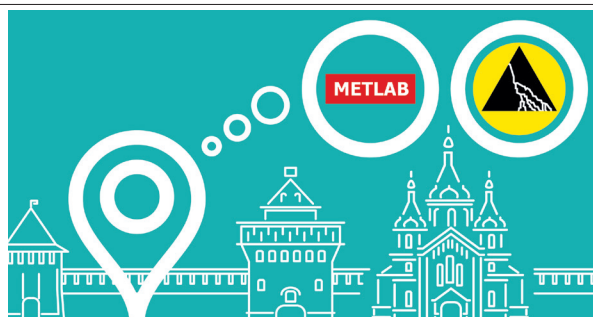


Событие

28

Один пишем, два на ум пошло

С 17 по 19 июня Нижний Новгород стал центром внимания для специалистов радиоэлектронной отрасли.



Оборудование

30

Махнуть, но — глядя

Сравнение технических характеристик многофункциональных калибраторов и подходы в подборе альтернативного оборудования.



Событие

44

Идем в «цифру»

С 2 по 8 июня в Нижнем Новгороде проходила конференция «Цифровая индустрия промышленной России», входящая в пятерку крупнейших событий в области цифровой экономики в России.



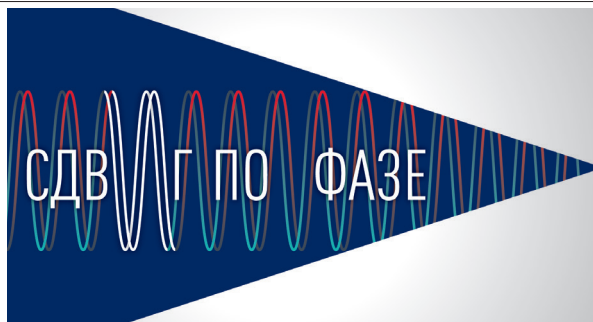


Технологии

46

Сдвиг по фазе

Амплифазометрический метод антенных измерений: теория и практика.

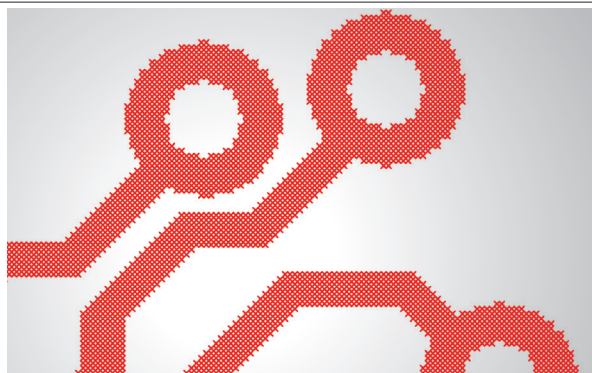


Знания

64

И снова — добры дзень!

Группа компаний «Диполь» продолжает цикл семинаров, посвященных организации производства электроники в современных условиях.

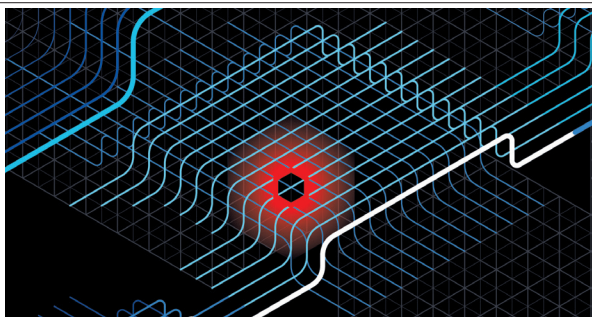


Оборудование

68

На волне конвергенции

Расширенный оптический контроль как способ улучшения гетерогенной интеграции.

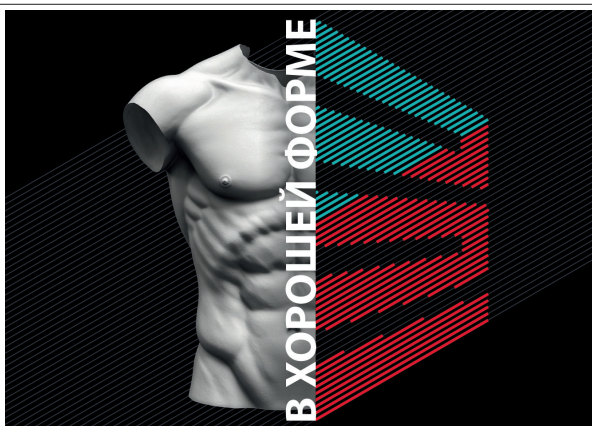


Событие

82

В хорошей форме

В Москве, в МВЦ «Крокус Экспо», с 17 по 19 июня в двадцатый раз проходила Rosmould — международная выставка пресс-форм, штампов, инструмента и производственных технологий.





Знания

84

Атомное образование

Группа компаний «Диполь» включена в учебную программу Академии Росатома.



Новость

86

Новый взгляд на антистатические материалы

Система международных стандартов по антистатической защите электронных устройств пополнилась новым документом.



Новость

88

Калейдоскоп науки

- Наперегонки со временем
- И его посчитали
- Сделают в России



ДИПОЛЬ

Корпоративное информационное издание компании «Диполь».

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 — 58957 от 5 августа 2014 года.

Учредитель АО «Диполь Технологии».

Тираж 5000 шт. Распространяется бесплатно.

Редакционный совет:
Дарья ЖИНДЕЦКАЯ
Алексей СМЫШЛЯЕВ
Николай ЕРЁМКИН
Иван БОРОВЛЕВ

Главный редактор:
Алексей СМЫШЛЯЕВ

Арт-директор:
Николай ЕРЁМКИН

Дизайн:
Николай ЕРЁМКИН





КРИСТАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ



Илья Новожилов,
руководитель направления
«Микроэлектроника»,
ГК «Диполь»
NovozhilovIA@dipaul.ru



Иван Мандрик,
руководитель проектов,
к. т. н., ГК «Диполь»
MandrikIV@dipaul.ru

Оборудование и методы монтажа полупроводниковых кристаллов.

Монтаж кристаллов интегральных схем (ИС) — один из ключевых этапов сборки полупроводниковых устройств (ППУ). Соединение кристалла ИС с основанием корпуса ППУ должно создавать заданную механическую прочность, отвод тепла, стойкость к ударам и вибрациям.

Для обеспечения производительности и качества процесса определяющее значение имеет применение специализированного оборудования для присоединения и пайки кристаллов. В статье рассмотрены технические решения и различные методы высокоточного монтажа полупроводниковых кристаллов.

В настоящее время наиболее ресурсоемкими технологическими операциями при изготовлении ППУ являются процессы сборки, которые занимают около 60–70% от общей стоимости изготовления ППУ. Эти затраты обоснованы, поскольку от качества выполнения данных операций зависит эксплуатационная надежность готовых изделий. Разработка новых способов и технологий монтажа кристаллов находится в центре внимания разработчиков ППУ. Использование таких технологий, как корпусирование ИС на уровне полупроводниковой пластины (WLP), разработка архитектур «систем-в-корпусе» (SiP), сборка ИС с использованием методов 2,5D- и 3D-интеграции направлены на уменьшение размеров ППУ и сокращение длины межсоединений за счет замены длинных горизонтальных связей на короткие вертикальные. Особенностью, с которой обычно сталкиваются разработчики ППУ на производствах, использующих новые технологии сборки, становится широкое разнообразие характеристик оборудования и методов монтажа кристаллов.



Рис. 1. Установка высокоточного монтажа кристаллов T18

Требования к оборудованию для монтажа кристаллов

Для высокоточного монтажа критически важна конструкция платформы установки — ведь любая нестабильность, случайное смещение или вибрация приводят к дополнительной ошибке при установке кристалла. При выборе оборудования необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на точность установки кристаллов:

- расположение линейных энкодеров;
- использование термостабильных материалов с соответствующими коэффициентами теплового расширения (КТР);
- наличие встроенной системы защиты от вибраций;
- современное машинное зрение;
- стабильное программное обеспечение;
- способность захвата удерживать кристалл в определенном положении относительно его центра;
- разрешение энкодера, отвечающего за вращение захвата;
- динамический и статический контроль усилия в процессе монтажа;
- надлежащая калибровка оборудования.

Продуманная конструкция платформы начинается с выбора материалов, стабильность характеристик которых не зависит от перепадов температуры и влажности. Поэтому для таких целей используются гранит или полимерные материалы. Рама установки проектируется с учетом КТР сопутствующих элементов оборудования для исключения относительного смещения.

Машинное зрение также имеет важное значение для высокоточного монтажа. Управление подсветкой кристалла, разрешение камеры и выбор оптики — ключевые параметры для анализа и обработки изображений с высокой степенью детализации. Необходимый контраст для быстрой и качественной обработки изображений достигается подсветкой с хорошей гибкостью регулировки. Одно из таких решений — система из двух камер для кристалла и подложки, которая позволяет одновременно опознавать элементы и реперные метки на кристалле и подложке для повышения точности монтажа.

Методы монтажа кристаллов

Монтаж на адгезив

Для облегчения ориентации и повышения повторяемости операций монтажа на поверхности кристаллов формируются отдельные элементы (метки совмещения), выполняющие роль маркеров. Система машинного зрения должна быстро находить и выравнивать кристаллы, располагающиеся в произвольной ориентации. Однако даже сложная система машинного зрения требует оптических ориентиров для монтажа с высокой точностью.



Рис. 2. Программируемый дозатор клея установки T18

К числу наиболее распространенных методов создания соединения между кристаллом и корпусом ППУ относится монтаж с помощью адгезива. В этом процессе на первом этапе на корпус ППУ наносится проводящий или непроводящий адгезив. Для этого используются различные способы (шприцевое дозирование, штемпелевание, каплеструйное нанесение и др.). На следующем этапе кристалл захватывается вакуумной монтажной головкой и устанавливается на адгезив. Затем адгезив отверждается нагреванием в течение заданного времени.

Настраиваемые параметры:

- ✗ объем адгезива;
- ✗ рисунок нанесения адгезива;
- ✗ давление в дозаторе;
- ✗ время ожидания между операциями дозирования.

Преимущества метода:

- ✗ низкое прикладываемое усилие на кристалл;
- ✗ низкая термическая нагрузка на кристалл.

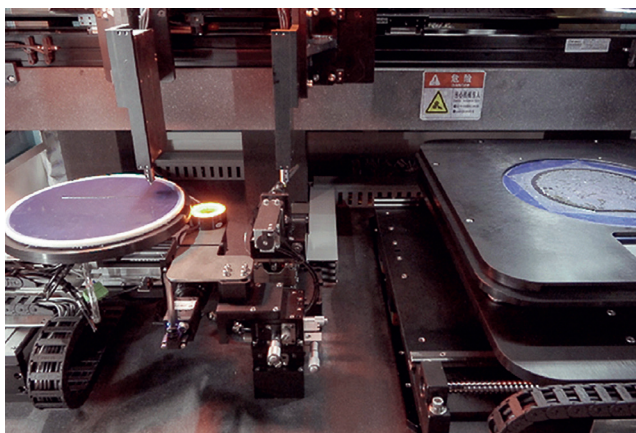


Рис. 3. Процесс сортировки кристаллов

Монтаж на УФ-отверждаемый адгезив

В отличие от эпоксидного адгезива, для которого требуются определенное время и температура в зависимости от его типа, УФ-клей остается в жидком состоянии до тех пор, пока не подвергнется воздействию УФ-излучения. Время отверждения при воздействии УФ-излучения составляет всего несколько секунд.

Настраиваемые параметры:

- объем адгезива;
- рисунок нанесения адгезива;
- давление в дозаторе;
- время ожидания между операциями дозирования.

Преимущества метода:

- низкое прикладываемое усилие на кристалл;
- отсутствие термической нагрузки на кристалл;
- свободно определяемое время для полимеризации;
- быстрое отверждение.



Рис. 4. Установка многокристальной сборки M18

Монтаж ультразвуком

В этом методе при монтаже кристалла используются давление и ультразвуковая вибрация (трение) для создания электропроводящего соединения между кристаллом и подложкой. В отличие от термозвукового монтажа данный процесс можно проводить при комнатной температуре без дополнительного нагрева подложки. Компоненты, чувствительные к температуре, или компоненты, которые сложно нагреваются, могут быть установлены с применением ультразвука.

Настраиваемые параметры:

- усилие при склеивании;
- мощность ультразвука;
- частота;
- время применения ультразвука.

Преимущества метода:

- уменьшение времени монтажа;
- не требует дополнительного нагрева.

Термокомпрессионный монтаж

В большинстве случаев данный процесс применяется в монтаже кристаллов с заранее сформированными металлическими шариками (бампами) на его поверхности. В процессе монтажа кристалл устанавливается на подложку ППУ активной стороной вниз. При прикладывании силы и нагреве в течение заданного времени создается электропроводящий контакт. Технология термокомпрессионного монтажа широко распространена при изготовлении радиочастотных и оптоэлектронных устройств (например, в системах «кристалл-кристалл» и «кристалл-пластина»). В качестве соединения используются сплавы золото-золото (Au-Au) и золото-кремний (Au-Si).

Настраиваемые параметры:

- усилие при склеивании;
- температура подложки;
- температура монтажной головки.

Преимущества метода:

- высокая прочность соединения;
- электропроводящее соединение.

Монтаж кристалла технологией спекания (синтеринг)

В этом методе при спекании кристалл приклеивается к подложке с использованием пасты на основе наночастиц серебра. Это происходит под воздействием температуры (более $+220^{\circ}\text{C}$) и давления (в диапазоне 50–300 бар). Наночастицы серебра соединяются друг с другом за счет диффузионных процессов. Преимуществом по сравнению с обычными процессами пайки является высокая термомеханическая стабильность, прежде всего необходимая в силовой электронике.



Рис. 5. Настольная установка монтажа М-10S для НИОКР

Монтаж кристалла на эвтектический сплав

Данный метод опирается на особые свойства отдельных материалов и их сплавов. Например, в этих процессах часто применяются сплав золото-олово (Au-Sn) с температурой плавления $+280^{\circ}\text{C}$ и сплав золото-кремний (Au-Si), температура плавления — $+363^{\circ}\text{C}$.

Преимущество эвтектических сплавов в том, что их температура плавления значительно ниже, чем у ряда других материалов. При нагревании выше эвтектической температуры образуется «жидкая фаза», обеспечивающая соединение на атомарном уровне. Еще одним существенным достоинством эвтектического соединения является то, что кристалл и подложка соединяются электрически и механически за один технологический этап.

Настраиваемые параметры:

- температура подложки;
- температура монтажной головки;
- температурный профиль пайки.

Преимущества метода:

- герметичность соединения;
- низкие температуры в сравнении с термокомпрессионным монтажом.



Рис. 6. Установка сортировки кристаллов S17

Заключение

В условиях растущего спроса на более компактную и эффективную электронику технологии сборки полупроводниковых устройств привлекают особое внимание. С развитием передовых технологий гетерогенной интеграции требования к точности монтажа кристаллов становятся все более строгими. Выбор метода монтажа кристалла зависит от требований к теплопроводности материалов, механической прочности, электрических характеристик, а также от условий эксплуатации и конечной стоимости будущего ППУ.

Учитывая подобную многофакторность, успешное выполнение технической задачи во многом зависит от участия профессиональной команды. Группа компаний «Диполь» является экспертом в области высокоточной сборки с многолетним опытом работы в микроэлектронике. Компания предлагает широкий спектр инструментов и технологического оборудования для прецизионного монтажа и сортировки кристаллов (рис. 1–6, табл. 1–4), которые могут быть использованы как в научных исследованиях, так и в мелкосерийном и крупносерийном производстве. Установки разных типов могут быть объединены в конвейерную линию, а платформы оснащаются SMD-питателями, вибрототками для подбора из россыпи, модулями синтеринга для максимальной универсальности процесса монтажа компонентов.

Таблица 1. Характеристики настольной установки монтажа кристаллов

Параметры	M-10S
Основные технические характеристики	
Точность позиционирования (3σ), мкм	± 1
Размеры компонента, мм	0,03–20
Поле зрения (мин.), мм	2×1,2
Поле зрения (макс.), мм	13,3×8
Перемещение рабочего столика по оси Z, мм	150
Рабочая область (оси X-Y), мм	120×60
Температура нагрева рабочего столика, °C	До 350
Диапазон усилия прижима, г	10–500
Антивибрационный стол	+
Система управления	Контроль процесса монтажа в режиме реального времени; система выравнивания кристаллов — камера со скользящим затвором + телецентрический объектив (MORITEX); персональный компьютер + ПЛК
Доступные технологические модули:	
Модуль прижима — ручной	+
Модуль УФ-обработки	+
Модуль для эвтектической пайки	+
Модуль нагрева компонента (до +400 °C)	+
Модуль дозатора для нанесения клеев/паст	+
Модуль подключения рабочего газа (форминг-газа или азота)	+

Таблица 2. Характеристики установок монтажа с точностью до ± 3 мкм

Параметры	T18	T18 Plus	T18 Pro
Основные технические характеристики			
Размер кристаллов	От 0,2×0,2 до 10×10 мм; толщина ≥ 70 мкм	От 0,2×0,2 до 10×10 мм; толщина ≥ 70 мкм	От 0,2×0,2 до 10×10 мм; толщина ≥ 70 мкм
Точность монтажа (3 σ), мкм	± 7	± 5	± 3
Угловое перемещение монтажной головки	$\pm 360^\circ$, точность $\pm 1^\circ$	$\pm 360^\circ$, точность $\pm 0,5^\circ$	$\pm 360^\circ$, точность $\pm 0,1^\circ$
Усилие склеивания	20–200 г, точность $\pm 10\%$	20–200 г, точность $\pm 10\%$	20–200 г, точность $\pm 10\%$
Смена инструмента	Автоматическая (12 инструментов)	Автоматическая (12 инструментов)	Автоматическая (12 инструментов)
Оснащение	Программируемый дозатор клея; модуль штемпелевания; ионизатор воздуха	Программируемый дозатор клея; модуль штемпелевания; ионизатор воздуха	Программируемый дозатор клея; модуль штемпелевания; ионизатор воздуха
Производительность, кристаллов/ч	1200	1000	800
Система подачи кристаллов и подложек			
Загрузка/выгрузка	Ручная/автоматическая	Ручная/автоматическая	Ручная/автоматическая
Входная оснастка	Держатель для 6"/8"/12" рамок (wafer frame); держатель для 6"/8" пялец (wafer ring); адаптер для кассет Waffle/Gel-Pak (макс. 12 шт.)	Держатель для 6"/8"/12" рамок; держатель для 6"/8" пялец; адаптер для кассет Waffle/Gel-Pak (макс. 12 шт.)	Держатель для 6"/8"/12" рамок; держатель для 6"/8" пялец; адаптер для кассет Waffle/Gel-Pak (макс. 12 шт.)
Выходная оснастка	Координатный стол X-Y 205×165 мм с держателем для плат	Координатный стол X-Y 205×165 мм с держателем для плат	Координатный стол X-Y 205×165 мм с держателем для плат
Характеристики системы управления			
Система машинного зрения	Точечный (point light) и кольцевой (red ring light) осветители; распознавание: — образов кристаллов и пластин; — негодных кристаллов (ink point recognition); — данных картографирования пластины (mapping reading)	Точечный и кольцевой осветители; распознавание: — образов кристаллов и пластин; — негодных кристаллов; — данных картографирования пластины	Точечный и кольцевой осветители; распознавание: — образов кристаллов и пластин; — негодных кристаллов; — данных картографирования пластины
Система управления	Встроенное программное обеспечение; язык интерфейса: английский; создание, хранение, редактирование рецептов (до 99 шт.); журнал наработки инструментов; система защитных блокировок для безопасной работы оператора	Встроенное программное обеспечение; язык интерфейса: английский; создание, хранение, редактирование рецептов (до 99 шт.); журнал наработки инструментов; система защитных блокировок для безопасной работы оператора	Встроенное программное обеспечение; язык интерфейса: английский; создание, хранение, редактирование рецептов (до 99 шт.); журнал наработки инструментов; система защитных блокировок для безопасной работы оператора

Таблица 3. Характеристики установки сортировки кристаллов

Параметры	S17	S17 Plus	S17 Pro
Основные технические характеристики			
Размер кристаллов	От 0,2×0,2 до 16×16 мм; толщина ≥ 70 мкм	От 0,2×0,2 до 16×16 мм; толщина ≥ 70 мкм	От 0,2×0,2 до 16×16 мм; толщина ≥ 70 мкм
Точность монтажа (3σ)	X, Y ≤ ±38 мкм для кристаллов ≥ 5×5 мм; X, Y ≤ ±25 мкм для кристаллов < 5×5 мм	X, Y ≤ ±38 мкм для кристаллов ≥ 5×5 мм; X, Y ≤ ±25 мкм для кристаллов < 5×5 мм	X, Y ≤ ±25 мкм для кристаллов ≥ 5×5 мм; X, Y ≤ ±15 мкм для кристаллов < 5×5 мм
Угловое перемещение монтажной головки	Без функции вращения, точность ±3°	±360°, точность ±2°	±360°, точность ±2°
Усилие склеивания	Ручная настройка, 30–200 г, точность ±10%	Автоматическая настройка, 20–100 г, точность ±10%	Автоматическая настройка, 20–100 г, точность ±10%
Оснащение	Модуль штемпелевания; ионизатор воздуха	Модуль штемпелевания; ионизатор воздуха	Модуль штемпелевания; ионизатор воздуха
Производительность, кристаллов/ч	7000	5000	1200
Система подачи кристаллов и подложек			
Загрузка/выгрузка	Ручная/автоматическая	Ручная/автоматическая	Ручная/автоматическая
Входная оснастка	Держатель для 6"/8" рамок и палец (wafer frame/ring); адаптер для кассет Waffle/ Gel-Pak 2"/4"	Держатель для 6"/8"/12" рамок и палец; адаптер для 4" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 4 шт.); адаптер для 2" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 1 шт.); индивидуальная оснастка: 120×120 мм	Держатель для 6"/8"/12" рамок и палец; адаптер для 4" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 4 шт.); адаптер для 2" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 1 шт.); индивидуальная оснастка: 120×120 мм
Выходная оснастка	Держатель для 6" палеца (wafer ring); адаптер для 4" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 2 шт.); адаптер для 2" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 6 шт.)	держатель для 6"/8" рамок и палец; адаптер для 4" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 2 шт.); адаптер для 2" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 6 шт.)	Держатель для 6"/8" рамок и палец; адаптер для 4" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 4 шт.); адаптер для 2" кассет Waffle/ Gel-Pak (макс. 9 шт.)
Характеристики системы управления			
Система машинного зрения	Точечный (point light) и кольцевой (red ring light) осветители; распознавание: — образов кристаллов и пластин; — негодных кристаллов (ink point recognition); — данных картографирова- ния пластины (mapping reading)	Точечный и кольцевой осветители; распознавание: — образов кристаллов и пластин; — негодных кристаллов; — данных картографирова- ния пластины	Точечный и кольцевой осветители; распознавание: — образов кристаллов и пластин; — негодных кристаллов; — данных картографирова- ния пластины
Система управления	Встроенное программное обеспечение; язык интерфейса: английский; создание, хранение, редактирование рецептов (до 99 шт.); журнал наработки инструментов; система защитных блокировок для безопасной работы оператора	Встроенное программное обеспечение; язык интерфейса: английский; создание, хранение, редактирование рецептов (до 99 шт.); журнал наработки инструментов; система защитных блокировок для безопасной работы оператора	Встроенное программное обеспечение; язык интерфейса: английский; создание, хранение, редактирование рецептов (до 99 шт.); журнал наработки инструментов; система защитных блокировок для безопасной работы оператора

Таблица 4. Характеристики установки многокристальной сборки

Параметры	M18	M18-TO
Основные технические характеристики		
Размер кристаллов	От 0,8×0,8 до 8×8 мм; опция: от 8×8 до 30×30 мм; толщина ≥ 70 мкм	От 0,2×0,2 до 5×5 мм; опция: от 5×5 до 10×10 мм; толщина ≥ 70 мкм
Точность монтажа (3σ), мкм	±38 мкм; ±10 мкм (с нижней камерой)	±15 мкм; ±10 мкм (с нижней камерой)
Угловое перемещение монтажной головки	точность ±3°; ±1° (с нижней камерой)	точность ±1°
Усилие склеивания	Ручная настройка, 20–200 г, точность ±10 %	Автоматическая настройка, 20–200 г, точность ±10%
Оснащение	Шприцевой дозатор; модуль штемпелевания; ионизатор воздуха; SMD-питатели	Шприцевой дозатор; модуль штемпелевания; ионизатор воздуха; SMD-питатели; модуль синтеринга
Производительность, кристаллов/ч	1000	600
Система подачи кристаллов и подложек		
Загрузка/выгрузка	Ручная	Ручная
Входная оснастка	Держатель для 8» рамок и палец (wafer frame/ring); адаптер для 2» кассет Waffle/Gel-Pak (макс. 12 шт.); адаптер для 4» кассет Waffle/Gel-Pak (макс. 4 шт.); оснастка под заказ: 150×220 мм	Оснастка под заказ: 220×220 мм
Выходная оснастка	Координатный стол, размеры 150×220 мм	Координатный стол, размеры 220×220 мм
Характеристики системы управления		
Система машинного зрения	Точечный (point light) и кольцевой (red ring light) осветители; распознавание: - образов кристаллов и пластин; - негодных кристаллов (ink point recognition); - данных картографирования пластины (mapping reading)	Точечный и кольцевой осветители; распознавание: - образов кристаллов и пластин - негодных кристаллов; - данных картографирования пластины
Система управления	Встроенное программное обеспечение; язык интерфейса: английский; создание, хранение, редактирование рецептов (до 99 шт.); журнал наработки инструментов; система защитных блокировок для безопасной работы оператора	Встроенное программное обеспечение; язык интерфейса: английский; создание, хранение, редактирование рецептов (до 99 шт.); журнал наработки инструментов; система защитных блокировок для безопасной работы оператора 

НА ЭРГОНОМИКЕ



Ксения Калашникова,
*руководитель проектов направления
лабораторной мебели ГК «Диполь»*
KalashnikovaKV@dipaul.ru

НЕ ЭКОНОМЯТ

Ключевые аспекты современной
лабораторной мебели.

Лабораторная мебель — важная часть любой лаборатории. Она влияет не только на комфорт и безопасность работы, но и на эффективность научных исследований.

В связи с развитием новых технологий и стремлением к независимости в России требования к специализированной мебели постоянно растут.

На российском рынке лабораторной мебели наблюдается рост интереса к современным решениям.

Данное направление становится особенно актуальным, поскольку увеличивается число лабораторий как в государственных учреждениях, так и в частном секторе.

Ключевыми аспектами, влияющими на выбор лабораторной мебели в России, являются:

- **Соблюдение стандартов.**
Специализированная мебель должна соответствовать российским и международным стандартам, включая требования по безопасности, экологии и эргономике.
- **Персонализация.**
Каждая лаборатория уникальна, поэтому так важна адаптивность оборудования под конкретные задачи (будь то химический, биологический или иной профиль).
- **Качество и долговечность.**
Лабораторная мебель должна быть устойчива к агрессивной среде, легко очищаться и сохранять свои качества на протяжении длительного времени.

Во главе угла

Для обеспечения безопасности и эффективности работы современная лабораторная мебель должна соответствовать ряду требований.

Устойчивость к воздействию реагентов

Безопасность — ключевой аспект. Лабораторная мебель должна быть изготовлена из материалов, устойчивых к агрессивным химическим веществам и воздействию высоких температур. Например, столы и системы хранения должны выдерживать воздействие кислот, щелочей и растворителей.

Эргономика

Эргономика — это наука, цель которой — создание комфортного рабочего пространства, а также минимизация негативного влияния на физическое и психическое здоровье человека. Правильный выбор высоты столов, наличие регулируемых стульев и возможность менять конфигурацию рабочего места способствуют снижению нагрузок на сотрудников. Это особенно важно в условиях длительной работы.

Важные элементы эргономики:

1. Скрытые провода и встроенные розетки

Упорядоченность рабочего пространства помогает избежать поломки оборудования и травм, а также быстро найти необходимый провод. Современные лабораторные столы оборудуются системами для скрытия коммуникаций, что делает рабочее место более безопасным и организованным. Это также облегчает доступ к электроприбору и обеспечивает более чистый вид лаборатории.



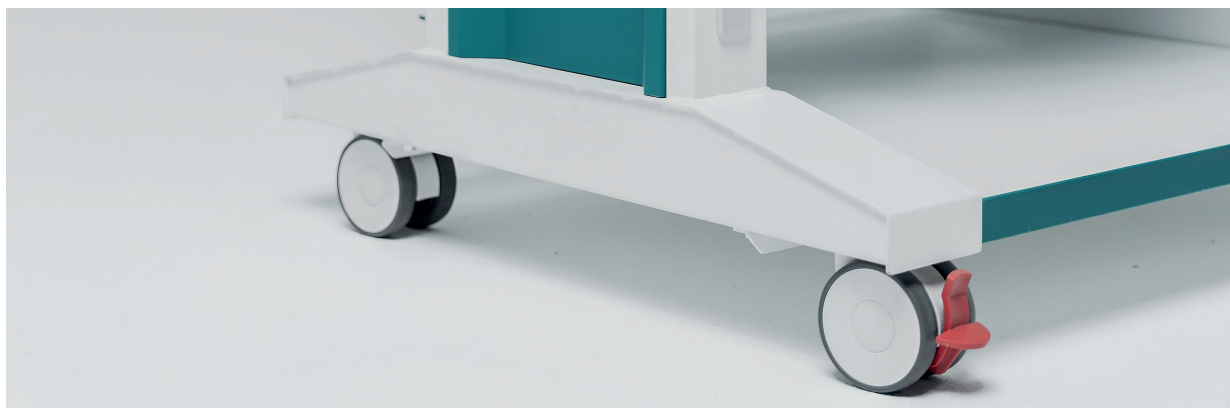


2. Дружественный интерфейс

Комфорт сотрудника играет важную роль в повышении продуктивности. Системы, позволяющие быстро адаптировать мебель под индивидуальные нужды пользователей, способствуют улучшению условий работы и повышению удовлетворенности сотрудников. Утопленные двери в столах-мойках, а также возможность изменения высоты столов делают работу более комфортной.

3. Мобильность

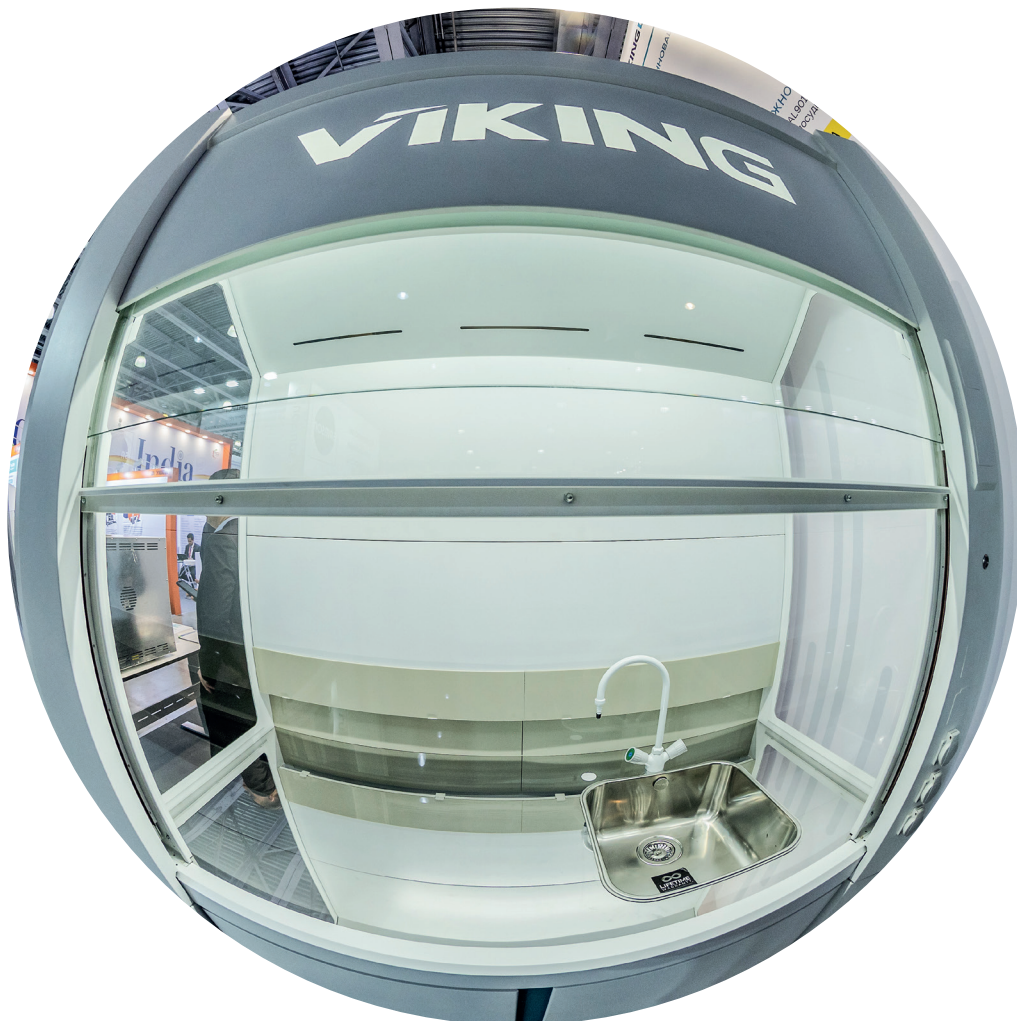
Передвижные столы и стойки позволяют легко изменять конфигурацию рабочего пространства в зависимости от потребностей текущего эксперимента или исследования. Это дает возможность более гибко подходить к организации рабочей среды.



Что будет, если...?

На первый взгляд мебель может казаться не столь важным элементом лаборатории, но отсутствие качественной и специализированной лабораторной мебели может привести к серьезным негативным последствиям для бизнеса:

- ✗ **Снижение производительности.**
Неудобные или неподходящие рабочие места затрудняют работу сотрудников, что снижает общую продуктивность.
- ✗ **Повышенный риск травматизма.**
Неправильно организованное рабочее пространство может привести к травмам и несчастным случаям, что увеличивает риск юридических споров и финансовых потерь.
- ✗ **Некорректные результаты исследований.**
Неправильная организация рабочего места может создать сбои в работе оборудования и привести к неправильным результатам.
- ✗ **Отток кадров.**
Плохие условия труда могут стать причиной увольнений, что сопровождается дополнительными затратами на подбор и обучение новых сотрудников.



Российские решения

Среди популярных решений на рынке стоит выделить лабораторную мебель VIKING LAB — серию столов «Дельта» и «Сигма» от отечественного производителя «Диполь».

VIKING LAB

Лабораторные столы данной компании были разработаны с учетом всех перечисленных выше требований и достижений эргономики. Мебель «Викинг» выделяют на рынке следующие отличительные особенности:

— Качество материалов.

Компания предлагает широкий выбор материалов рабочей поверхности, которые будут устойчивы к разнообразным химическим веществам, что позволяет использовать их в различных лабораторных условиях.

— Регулируемая высота.

Стол оборудуются механизмами для регулировки высоты, делая их пригодными для сотрудников разного роста и физических возможностей.

— Интеграция технических систем.

Лабораторная мебель оснащается специально для работы с электроникой и оборудованием. Например, во многие модели могут быть установлены дополнительные розетки или освещение.



И в заключение

Современная лабораторная мебель — это не просто часть интерьера, а важный инструмент, который влияет на безопасность и эффективность работы. Выбор качественной и удобной мебели, например столов «Дельта» и «Сигма» от «Диполь», помогает создать комфортные условия для сотрудников и защитить интересы бизнеса. Инвестиция в такую мебель — важный шаг для улучшения производительности и повышения конкурентоспособности. 

 — Алексей Смышляев
Никита Бессонов

С 26 по 29 мая в «Экспоцентре» в Москве проходила «Металлообработка-2025» — 25-я международная выставка «Оборудование, приборы и инструменты для металлообрабатывающей промышленности».



В этом традиционном для себя мероприятии группа компаний «Диполь» приняла участие в новом качестве — как создатель Центра аддитивных технологий (ЦАТ).

Выставка «Металлообработка» проводится с 1984 года и представляет весь станкостроительный комплекс — металлорежущее, кузнечно-прессовое, литейное, сварочное оборудование; инструменты, материалы, технологии для обработки поверхностей и нанесения покрытий; контрольно-измерительные системы; комплектующие узлы и изделия; информационные CALS-технологии; современные материалы для металлообработки и т. д.

Это ключевое отраслевое мероприятие во многом определяет тенденции рынка и входит в десятку ведущих международных промышленных форумов.

В этом году на экспозиционной площади 50 тыс. кв. метров передовое оборудование и технологии демонстрировали полторы тысячи компаний из семи государств — России, Белоруссии, Китая, Индии, Италии, Турции и Южной Кореи.

ЦЕНТРАЛЬНОЕ





Центр Аддитивных Технологий

На выставочном стенде специалисты ЦАТ компании «Диполь» представили новый Центр и современное промышленное оборудование, новые решения и разработки:

- **3D-принтер EP-M150 Pro;**
- **3D-принтер Volgobot A3 PRO;**
- **образцы 3D-печати.**

Посетители стенда имели возможность ознакомиться с оборудованием, получить профессиональные консультации по особенностям различных технологий 3D-печати и сканирования, попрактиковаться в эксплуатации 3D-принтеров и сканеров, изучить функциональные образцы, напечатанные из различных материалов.

Справка:

Центр аддитивных технологий (ЦАТ) призван объединить передовые технологии 3D-печати с реалиями их внедрения в действующие производства.

Основные компетенции Центра направлены на проектирование и производство сложных и высокоточных изделий с использованием аддитивных технологий и широкого спектра материалов: металлов (сталь, алюминий, титан, различные жаропрочные сплавы), полимеров и композитов.

В Центре есть участок, оснащенный принтерами, работающими по популярной технологии FDM (послойное наложение расплавленной нити) для создания изделий из широкого спектра термопластичных материалов.

ЦАТ «Диполь» активно применяет технологию компактной фотополимерной печати — DLP и LCD. Данная технология обладает большим ассортиментом фотополимерных смол для конечных изделий, прототипов и мастер-моделей.

В составе ЦАТ действует инженеринговый центр на базе участка 3D-сканирования для получения точных трехмерных моделей объектов, для разработки 3D-моделей, метрологических замеров и обратного проектирования.

 — Иван Боровлев

СОБЫТИЕ

В городе Нойбиберге (Германия) состоялось ежегодное заседание Технического комитета МЭК TC 101 Electrostatics.

В мероприятии в качестве экспертов по стандартизации в области электростатики приняли участие представители группы компаний «Диполь».

Встреча специалистов Международной электротехнической комиссии (IEC) проходила с 1 по 4 июля.

В рабочей группе WG 5, занимающейся разработкой стандартов по обеспечению антистатической защиты электронных устройств, была представлена первая версия обновленного стандарта **IEC 61340-5-2**. Основные новшества связаны с применением оборудования для проверок соответствия и внедрением процессного подхода при разработке и реализации программы ЭСР-управления. В дальнейшем данная редакция проекта стандарта будет обнародована для публичного обсуждения.

Также были рассмотрены новая редакция стандарта **IEC 61340-5-4** по периодическим проверкам соответствия антистатического оснащения на предприятиях и проект нового стандарта **IEC 61340-5-6**, описывающего риск-ориентированный подход при организации антистатической защиты электронных производств.



На пленарном заседании обсуждались результаты деятельности рабочих групп по стандарту, устанавливающему метрологические требования к испытаниям и измерениям при антистатической защите **IEC 61340-1-1**, и изменения терминологии в рамках пересмотра **IEC 61340-1**. Среди прочего участники пленарного заседания отметили доклад китайских коллег, посвященный необходимости развития средств антистатической защиты при производстве и применении литий-ионных батарей и аккумуляторов.

Одним из результатов заседания стало продление срока действия ряда стандартов.

Российскую Федерацию на встрече представляли специалисты компании «Диполь»: председатель Технического комитета по стандартизации ТК 072 «Электростатика» Анатолий Кривов и ответственный секретарь ТК 072 Екатерина Смирнова.

Справка:

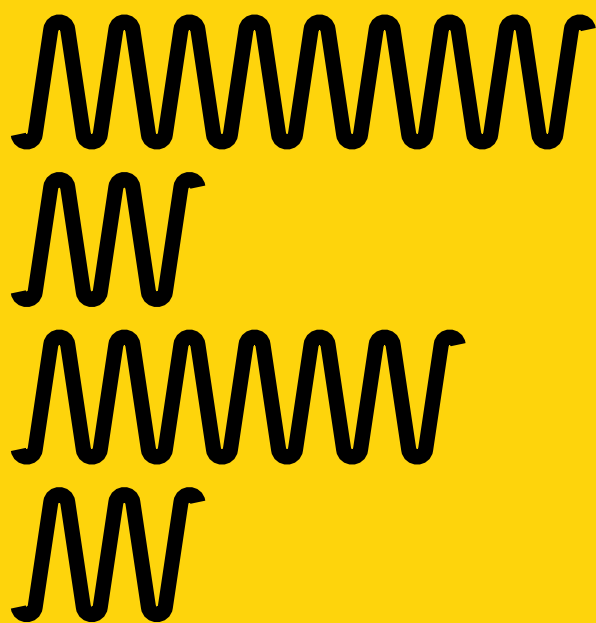
Разработкой международных стандартов в области электростатики занимается технический комитет МЭК 101 Electrostatics. В этой деятельности Россию представляют эксперты национального технического комитета по стандартизации ТК 072 «Электростатика», функционирующего на базе предприятий, входящих в ГК «Диполь».

Комитет является формой сотрудничества заинтересованных организаций и органов власти при проведении работ по национальной, межгосударственной и международной стандартизации в сфере электростатики.

В настоящее время основная цель деятельности ТК 072 в России — развитие и внедрение современных требований по антистатической защите для поддержания на высоком уровне качества выпускаемой и продаваемой продукции ЭКБ.

Ознакомиться с деятельностью технического комитета и перечнем стандартов можно на сайте antistatika.ru. 





РАЦИОНАЛЬНОЕ



Максим Березовский,
ведущий инженер
BerezovskiyMA@dipaul.ru



Особенности осциллографических опций ОСЦ1/SC0 и ОСЦ2/SC1 многофункциональных калибраторов MEATEST MK9023A.

Осциллографические опции ОСЦ1/SC0 и ОСЦ2/SC1 чешских калибраторов MEATEST, используемых для поверки осциллографов с полосой пропускания до 400 и 1100 МГц, являются хотя и упрощенными, но полнофункциональными аналогами известных осциллографических опций SC-600 и SC-1100 американского производителя FLUKE.

Упрощение коснулось способов формирования измерительных сигналов, пользовательского меню и некоторых других метрологических особенностей. Однако «проще» не всегда означает «хуже». Рациональное упрощение идет на пользу общей надежности модуля и удобству пользователя и поверителя.

FLUKE®

MEATEST

Один из основных характеристических показателей осциллографической опции — возможность формирования импульсного сигнала с малым временем нарастания, необходимого для оценки так называемой переходной характеристики осциллографа.

При этом формируется импульсный сигнал с высокой крутизной переднего фронта (малым временем нарастания). Понятно, что время нарастания испытательного сигнала должно быть меньше соответствующей характеристики испытываемых (поверяемых) осциллографов. В описании типа на рассматриваемые опции этот параметр (PWM) нормируется «не более 1 нс». Обращает на себя внимание то, что в режиме формирования временных маркеров (TIME MARKER) для времени нарастания измерительных импульсов нормируется та же самая величина — «не более 1 нс». Это объясняется тем, что оба измерительных сигнала образуются единым формирователем, тогда как в более сложных осциллографических опциях (SC-1100, например) — это два разных сигнала. Любопытно, что, несмотря на строгое лимитирование времени нарастания описанием типа, в соответствующей методике поверки отсутствует пункт, контролирующей эту величину (методика поверки МП 201/2-007-2024). Такое несоответствие вызывает сомнения у пользователей рассматриваемой опции и поверителей.

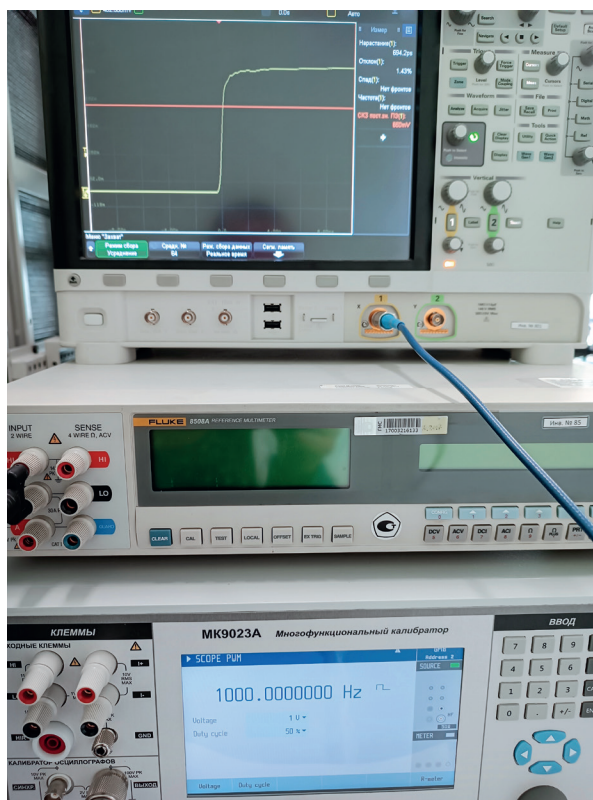


Рис. 1.



На практике несложно убедиться в соответствии заявленного времени нарастания измерительного сигнала (рис. 1). Испытания демонстрируют (использовался поверенный осциллограф с полосой пропускания до 6 ГГц, переключаемая ПП), что параметр времени нарастания испытательных импульсов не превышает величины 700–710 пс. Такую же величину времени нарастания имеет испытательный сигнал режима TIME MARKER (рис. 2). К недостаткам данной осциллографической опции в режиме формирования импульсного сигнала с малым временем нарастания можно отнести ограничение по амплитуде воспроизводимого сигнала, которая не может превышать в данном случае 1 В амплитудного значения. При поверке старых моделей осциллографов, чьи методики поверки ссылаются на ГОСТ и предписывают контролировать параметры ПХ при каждом значении КО (коэффициентов отклонения) вплоть до значения КО 5 В/дел. и амплитуде изображения 4 клетки (минимум), возможного максимума амплитуды 1 В рассматриваемой опции будет явно недостаточно. У ближайших конкурентных осциллографических опций (SC-600 и SC-1100) максимально возможная амплитуда в этом режиме составляет 2,5 В.

Остальные функции указанной опции стандартны, и их нормированные значения подтверждаются соответствующими пунктами методики поверки. Точность установки амплитуды формируемых импульсов с малым временем нарастания имеет второстепенное значение и соответствует заявленным 10%. Погрешность установки частоты следования импульсов также соответствует заявленным 2,5 ppm от установленного значения.

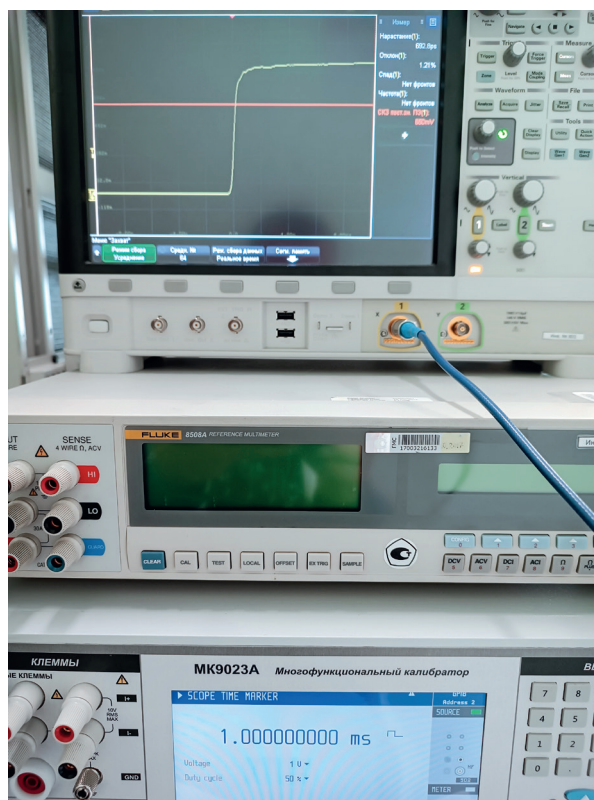


Рис. 2

Следующая наиболее востребованная функция осциллографической опции — режим VOLTAGE, обеспечивающий формирование постоянного напряжения положительной и отрицательной полярности либо прямоугольных импульсов с заданной амплитудой.

Также возможно формирование синусоидальной формы напряжения. При этом могут быть получены амплитудные значения напряжения до 280 В. Диапазон возможных воспроизводимых частот в этом режиме 15 Гц — 1 кГц с точностью 25 ppm от установленного значения частоты. Точность установки амплитуд испытательного сигнала в этом режиме зависит от выбранного поддиапазона и соответствует заявленной с большим запасом. Например, в точке +100 мВ (при формировании постоянного напряжения) фактическая погрешность достигает 130 мкВ (рис. 3). Запас по фактической погрешности относительно заявленной при воспроизведении прямоугольного сигнала (формы меандр) в этом режиме также достаточно велик. Например, при воспроизведении меандра амплитудой 1 В фактическая погрешность воспроизведения составила 2,13 мВ, или примерно 0,22% относительно 0,55%, заявленных в этой точке (рис. 4).



Рис. 3.

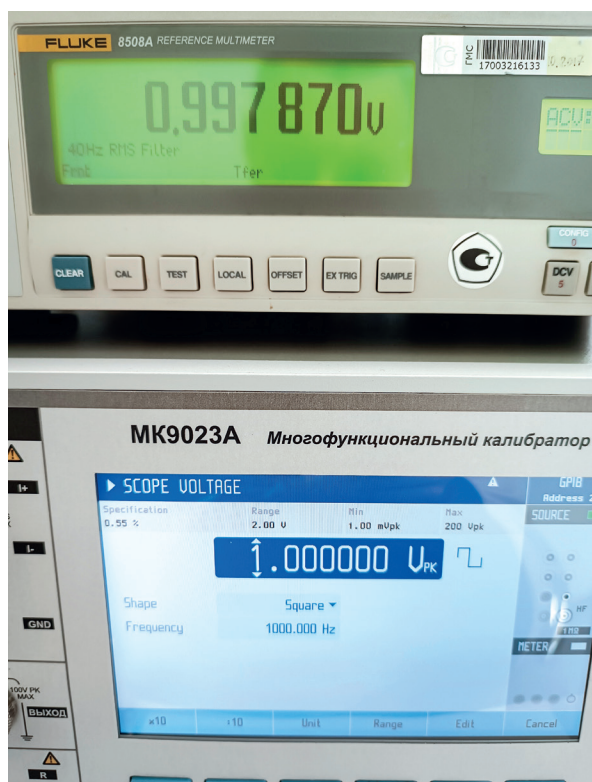


Рис. 4.



Еще один важный и востребованный режим — SCOPE SINE, позволяющий формировать синусоидальный испытательный сигнал в полосе частот 15 Гц — 1100 МГц с заданными по точности параметрами частоты и амплитуды.

Точность установки частоты для этого режима составляет 10 ppm для частот ниже 300 кГц и 0,1 ppm для частот выше 300 кГц. Диапазон возможных амплитуд зависит от установленной частоты испытательного сигнала. До частоты 1 ГГц возможно воспроизведение амплитуд до 1,5 В; выше этой частоты — до 1 В. Точность установки амплитуды и линейности ее воспроизведения в зависимости от частоты соответствуют заявленным производителем. Например, при частотах испытательного сигнала 1 кГц и 50 Гц разница амплитуд (для установленной амплитуды 1 В) составила всего 0,03 мВ, а погрешность воспроизведения амплитуды на этих же частотах — менее 0,6 мВ (при расчете действительной амплитуды используется формула из п. 9.14.2.7 методики поверки $U_{\text{амп}} = U_{\text{скв}} \cdot \sqrt{2}$) (рис. 5).

Режим воспроизведения временных маркеров соответствует установленным производителем лимитам допустимых погрешностей по периоду следования импульсов (0,1 ppm от установленного значения периода).

Этот режим имеет ограничение по амплитуде воспроизводимых импульсов до 1 В.

Кроме того, рассматриваемая осциллографическая опция позволяет контролировать входной импеданс поверяемых осциллографов, но только по параметру сопротивления в двух стандартных для осциллографических опций поддиапазонах: 100 Ом и 2 МОм. При этом обеспечивается заявленная производителем точность измерений $\pm 0,1\%$.

Таким образом, рассматриваемая осциллографическая опция обладает простым и понятным для пользователя интерфейсом, формирует все необходимые виды испытательных сигналов, но и имеет явные упрощения и ограничения, касающиеся главным образом амплитуд формируемых испытательных сигналов в режимах PWM и SCOPE SINE. 



Рис. 5.1

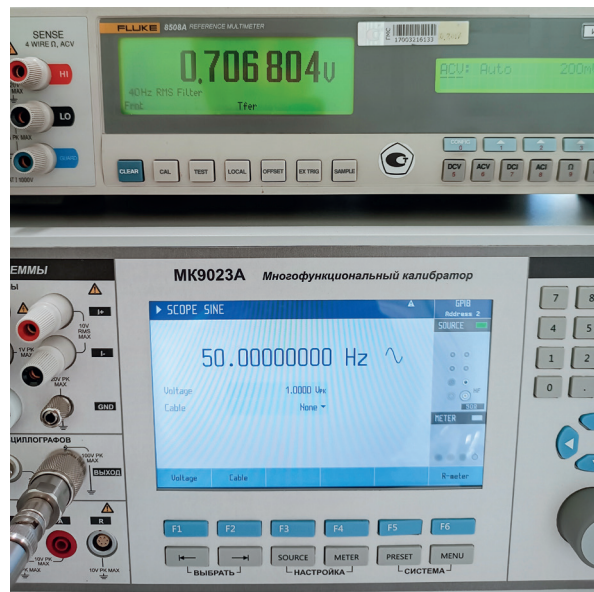


Рис. 5.2

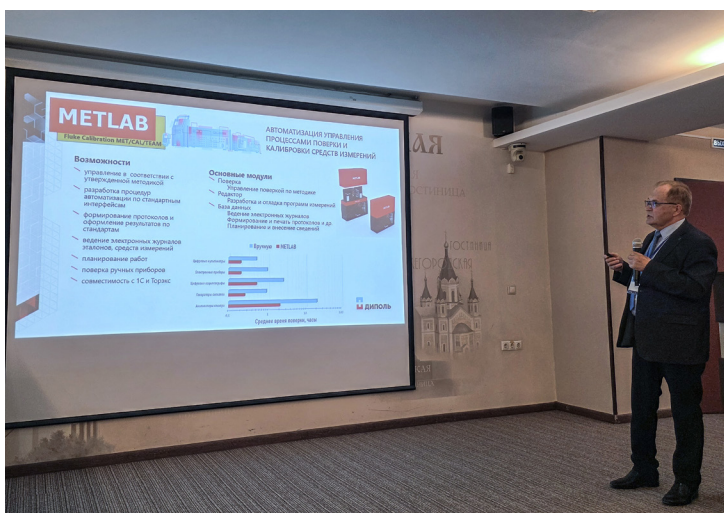
 — Максим Березовский

METLAB



Один пишем, два на ум пошло.

С 17 по 19 июня Нижний Новгород стал центром внимания для специалистов радиоэлектронной отрасли. Город принимал сразу два значимых события: XIV Всероссийскую научно-техническую конференцию «Метрология в радиоэлектронике» и семинар «Антистатическая защита и технологии современной электроники», организованный компанией «Диполь».



В программу Всероссийской конференции вошли выступления экспертов группы компаний «Диполь». Так, по теме «Современные тенденции развития радиотехнических и радиоэлектронных измерений» был представлен пленарный доклад профессора руководителя проектов по развитию Анатолия Кривова «Актуальные направления автоматизации прикладной метрологии в радиоэлектронике».

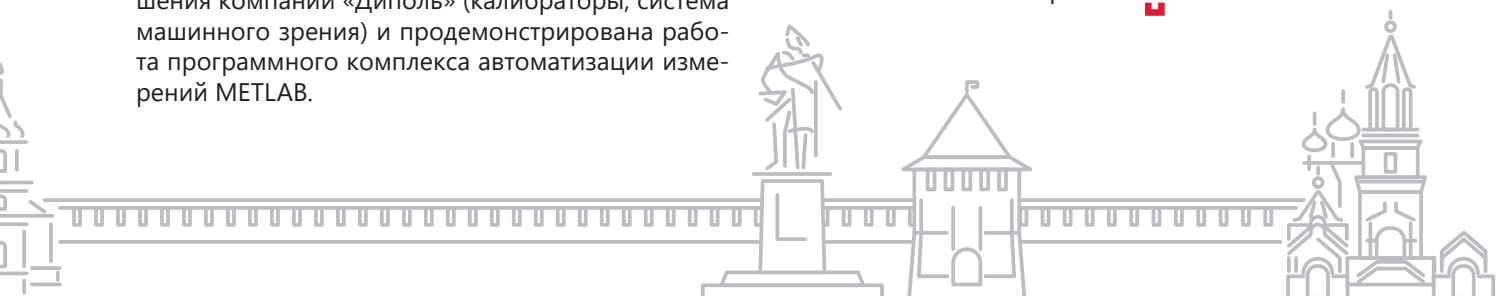
В направлении «Обеспечение единства радиотехнических и радиоэлектронных измерений» выступил д. т. н., руководитель направления Андрей Смирнов с секционным докладом «Проблемные вопросы адекватности нормируемых, регламентируемых и достигаемых метрологических характеристик измерительного оборудования (на примере сертификационных испытаний электромагнитной совместимости технических средств)».

Также на конференции в рамках выставочной программы были представлены собственные решения компании «Диполь» (калибраторы, система машинного зрения) и продемонстрирована работа программного комплекса автоматизации измерений METLAB.

В те же дни в Нижнем Новгороде «Диполь» совместно с Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии провели межрегиональный научно-практический семинар по электростатической защите электронных устройств и оснащению рабочих мест в электронных производствах — «Антистатическая защита и технологии современной электроники».

Основные цели семинара:

- ✗ предоставление информации специалистам предприятий электронной промышленности, приборостроения и смежных отраслей об общих требованиях к антистатической защите электронных изделий на новой компонентной базе;
- ✗ решение задач, связанных с адаптацией требований стандартов к практике электронных производств;
- ✗ информирование о современных решениях и тенденциях в области ручной пайки и технологических материалов. 



 — Сергей Лазаренко
 Анна Лозина
 Александр Кондратьев



Махнуть, НО — глядя

Сравнение технических характеристик
многофункциональных калибраторов
и подходы в подборе альтернативного
оборудования.



Александр Кондратьев,
руководитель проектов
KondratevAS@dipaul.ru

Столкнувшись с уходом с российского рынка ряда производителей, отечественные пользователи переходят на альтернативные решения. Важно, чтобы этот процесс отличался взвешенным подходом и системностью. Так, замена метрологического оборудования во многом основывается на инновационном графическом методе сравнения калибраторов, что позволяет наглядно оценить диапазоны воспроизведения электрических величин и их погрешности.

Введение

«Fluke — всё»

— примерно такой тревожной ноткой отозвалось общение как заказчиков, так и поставщиков измерительного оборудования в ответ на завершение работы в России именитого бренда. Особенно сильно перемены затронули метрологические лаборатории в области электрических, магнитных и радиотехнических измерений. Специалисты компании «Диполь» как эксперты по вопросам оснащения и автоматизации метрологических лабораторий на тот момент оценивали эталонное оборудование Fluke как наиболее популярное и, казалось, незаменимое.

Действовать пришлось стремительно, в поисках решения представители отрасли обменивались информацией, и результат этой работы постепенно начал обретать форму в виде подтвержденных приемов и алгоритмов.

В качестве примера таких наработок можно привести подходы к сравнению калибраторов Fluke 5522A (номер ГРСИ — 70345-18) с аналогом МК9023A (номер ГРСИ - 93219-24) и калибратора Fluke 5730A (номер ГРСИ — 60407-15) с КЭС5730 (на данный момент проходит процедуру по внесению в ГРСИ).

Выбор данных моделей был неслучаен. Многофункциональные калибраторы 5522A и 5730A — одни из наиболее востребованных в электрических и магнитных измерениях. Отличительная особенность 5522A — широкий выбор функций: воспроизведение силы и напряжения постоянного и переменного тока, электрического сопротивления, электрической емкости, электрической мощности, частоты, моделирование термодпар, термометров сопротивления, напряжения на нагрузках; формирование сигнала с малой длительностью фронта; генератор синусоидального напряжения, сигналов сложной формы и импульсов; измерение входного сопротивления и емкости осциллографов. Модель 5730A имеет меньше функций, но ее преимущество — в более широких диапазонах воспроизведения силы и напряжения тока и более высокой точности.

На практике сравнение технических характеристик калибраторов — задача нетривиальная. Во-первых, это связано с тем, что приборы способны работать в нескольких режимах, что отображено в их названии «многофункциональные». Во-вторых, погрешности воспроизведения/измерения физических величин, как правило, зависят от конкретного значения воспроизводимой величины и приведены в таблицах с большим объемом информации.



В качестве примера можно привести описание типа для калибраторов Fluke 5522A (табл. 1) и МК9023А (табл. 2).

Таблица 1. Метрологические характеристики в режиме воспроизведения напряжения постоянного тока

Диапазон	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при температуре окружающего воздуха ($t_{cal} \pm 5$) °C	Разрешение, мкВ	Максимальная нагрузка
Выход NORMAL			
от 0 до $\pm 329,9999$ мВ	$\pm(2 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1 \cdot 10^{-3})$ мВ	0,1	65 Ом
от 0 до $\pm 3,299999$ В	$\pm(1,1 \cdot 10^{-5} \cdot U + 2 \cdot 10^{-6})$ В	1	10 мА
от 0 до $\pm 32,99999$ В	$\pm(1,2 \cdot 10^{-5} \cdot U + 2 \cdot 10^{-5})$ В	10	10 мА
от ± 30 до $\pm 329,9999$ В	$\pm(1,8 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,5 \cdot 10^{-4})$ В	100	5 мА
от ± 100 до ± 1020 В	$\pm(1,8 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,5 \cdot 10^{-3})$ В	1000	5 мА
Дополнительный выход AUX (только в режиме одновременного вывода двух выходных сигналов)			
от 0 до $\pm 329,999$ мВ	$\pm(4 \cdot 10^{-4} \cdot U + 0,35)$ мВ	1	5 мА
от 0 до $\pm 3,29999$ В	$\pm(4 \cdot 10^{-4} \cdot U + 3,5 \cdot 10^{-4})$ В	10	5 мА
от $\pm 3,3$ до ± 7 В	$\pm(4 \cdot 10^{-4} \cdot U + 3,5 \cdot 10^{-4})$ В	100	5 мА
Моделирование и измерение сигнала термопары в линейном режиме 10 мкВ/°C и 1 мВ/°C			
от 0 до 329,9999 мВ	$\pm(5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 3 \cdot 10^{-3})$ мВ	0,1	10 Ом

Примечание. U — значение воспроизводимого напряжения, установленное на калибраторе.

Таблица 2. Метрологические характеристики калибраторов при воспроизведении напряжения постоянного электрического тока

Диапазон воспроизведения	Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности
от 0,00000 до 20,00000 мВ	$\pm(1 \cdot 10^{-4} \cdot U + 1 \cdot 10^{-2})$ мВ $\pm(3 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,5 \cdot 10^{-3})$ мВ
от 20,0001 до 200,0000 мВ	$\pm(1,5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1 \cdot 10^{-2})$ мВ $\pm(1,5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,5 \cdot 10^{-3})$ мВ
от 0,200001 до 2,000000 В	$\pm(1,2 \cdot 10^{-5} \cdot U + 5 \cdot 10^{-6})$ В
от 2,00001 до 20,00000 В	$\pm(1 \cdot 10^{-5} \cdot U + 3,5 \cdot 10^{-5})$ В
от 20,0001 до 100,0000 В	$\pm(1,5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 1,5 \cdot 10^{-4})$ В
от 100,0001 до 280,0000 В	$\pm(1,5 \cdot 10^{-5} \cdot U + 4 \cdot 10^{-4})$ В
от 280,001 до 1050,000 В	$\pm(2 \cdot 10^{-5} \cdot U + 3,5 \cdot 10^{-3})$ В

Примечание. U — значение воспроизводимого напряжения постоянного электрического тока (представленное в мВ) для диапазонов с верхней границей до 200 мВ включительно, (В) для диапазонов с верхней границей свыше 200 мВ.

Если сравнить диапазоны воспроизведения напряжения постоянного тока и их погрешности, то можно обнаружить, что это сделать не так уж просто по имеющимся таблицам. И это только один режим работы, причем для постоянного тока. В случае с переменным током диапазоны воспроизведения электрических величин будут зависеть и от частоты, что еще более усложняет задачу.

Соответственно, мы пришли к необходимости такого инструмента сравнения технических характеристик калибраторов между собой, обеспечивающего наглядный и быстрый результат. Для достижения этой цели разработано программное обеспечение DeviceCompare, которое строит графики по таблицам погрешностей и позволяет значительно сократить временные и трудовые затраты при сравнении диапазонов воспроизведения электрических величин и их погрешности.

Сравнение Fluke 5522A и МК9023A

Для начала сравним режимы работы приборов.

Таблица 3. Режимы работы калибраторов Fluke 5522A и МК9023A.

Режим	Fluke 5522A	МК9023A
Воспроизведение напряжения постоянного электрического тока	0–1020 В	0–1050 В
Воспроизведение напряжения переменного электрического тока	1 мВ — 1020 В 10 Гц — 500 кГц	1 мВ — 1050 В 15 Гц — 300 кГц
Воспроизведение силы постоянного электрического тока	0–20,5 А	0–30 А (1500 А с опцией 0950)
Воспроизведение силы переменного электрического тока	29 мкА — 20,5 А	10 мкА — 30 А (1500 А с опцией 0950)
Воспроизведение электрического сопротивления	Непрерывный режим: 0–1100 МОм Фиксированный режим: нет	Непрерывный режим: 0–1100 МОм Фиксированный режим: есть
Воспроизведение мощности постоянного тока	Опция PQ 33 мВ — 1020 В 0,33 мА — 20,5 А	0,2–1050 В 0,2 мА — 30 А
Воспроизведение мощности переменного тока	Опция PQ 33 мВ — 1020 В 3,3 мА — 20,5 А 10 Гц — 30 кГц	0,2–1050 В 0,2 мА — 30 А 15–1000 Гц
Воспроизведение электрической емкости	Непрерывный режим: 0,22 нФ — 110 мФ Фиксированный режим: нет	Непрерывный режим: 0,8 нФ — 120 мФ Фиксированный режим: есть
Воспроизведение частоты	0,01 Гц — 2 МГц 3 В	Нет
Режим моделирования термопар	Е, J, K, L, N, R, S, T, U	R, S, B, J, T, E, K, N, M
Режим моделирования термометров сопротивления	Pt385, Pt3926, Pt3916, PtNi385, Cu427	Pt100, Pt200, Pt500, Pt1000
Режим воспроизведения напряжения на нагрузках 50 Ом, 1 МОм	Опции SC600/SC1100	Опции ОСЦ1/ОСЦ2
Режим формирования сигналов с малой длительностью фронта	Опции SC600/SC1100	Опции ОСЦ1/ОСЦ2
Режим генератора синусоидального напряжения	Опция SC600 0,05–600 МГц 5 мВ — 5,5 В	Опция ОСЦ1 15 Гц — 400 МГц 1,4 мВ — 1,5 В
	Опция SC1100 0,05–1100 МГц 5 мВ — 3,5 В	Опция ОСЦ2 15 Гц — 1100 МГц 1,4 мВ — 1,5 В
Режим формирования временных маркеров	Опции SC600/SC1100	Опции ОСЦ1/ОСЦ2
Режим генератора сигналов сложной формы	Опции SC600/SC1100	Опции ОСЦ1/ОСЦ2
Режим генератора импульсов	Опции SC600/SC1100	Опции ОСЦ1/ОСЦ2
Режим измерения входного сопротивления осциллографа	Опции SC600/SC1100	Опции ОСЦ1/ОСЦ2
Воспроизведение гармонических составляющих	Нет	Есть
Измерение электрических сигналов с помощью встроенного мультиметра	Нет	Опция МУЛЬТИМЕТР



Измерение сигналов термопреобразователей сопротивления (ТС) с помощью встроенного мультиметра	Нет	Опция МУЛЬТИМЕТР
Измерение сигналов термоэлектрических преобразователей (термопар) с помощью встроенного мультиметра	Нет	Опция МУЛЬТИМЕТР
Токовая катушка	При том, что Fluke располагает токовыми катушками, совместимыми с калибратором 5522A, в описании типа они не указаны, поэтому в таблице эти данные игнорируются	Опция 0950 Номинальные значения коэффициентов трансформации силы переменного и постоянного тока: 10; 25; 50 Максимальное воспроизводимое значение силы тока: 1500 A
Воспроизведение электрического сопротивления постоянному току в режиме источника высокого сопротивления	Нет	Опция МЕГОМ 100 кОм — 100 ГОм
Программное обеспечение для автоматизации процессов поверки и калибровки	ПО MET/CAL/TEAM (продается отдельно)	ПО METLAB (поставляется в комплекте с калибратором МК9023A)

По таблице 3 понятно, что сложно сделать однозначный вывод, аналогичны эти калибраторы или один чем-то лучше другого. Например, Fluke 5522A может выдать напряжение и силу переменного тока в более широком диапазоне частот, но МК9023A обеспечивает более высокую силу тока. Также у МК9023A больше уникальных опций («МУЛЬТИМЕТР», «МЕГОМ»). Кроме того, с калибратором МК9023A в комплекте поставляется программное обеспечение METLAB — отчетственный аналог MET/CAL/TEAM.

Воспользуемся ранее упомянутой программой для построения графиков погрешностей и диапазонов воспроизведения электрических величин, чтобы детальней сравнить основные режимы работы калибраторов.

Важно отметить, что проводится сравнение режимов Normal и Aux, что отображено в легенде (рис. 1.1). При этом масштаб осей выбран логарифмический. Это неочевидное и очень удачное

решение, позволяющее одновременно сравнивать все пределы воспроизведения. Линейный масштаб был бы доступен только для обладателей суперзрения. Далее везде также будет использоваться логарифмический масштаб. Рис. 1.1 позволяет сделать вывод, что для режима Normal как диапазоны воспроизведения напряжения постоянного тока, так и погрешность воспроизведения сходны. В режиме Aux калибратор МК9023 достигает значительно большей точности, но имеет меньший диапазон воспроизведения.

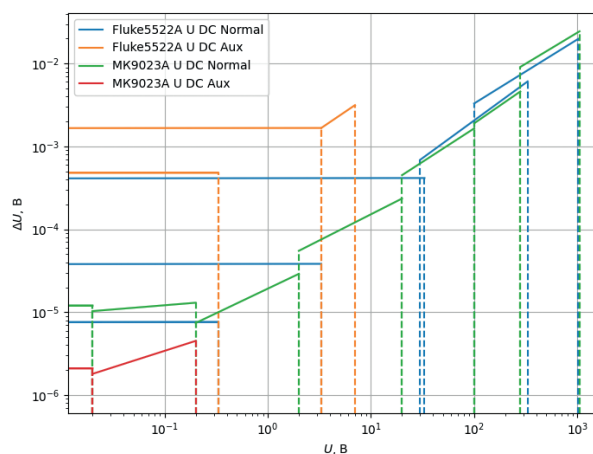


Рис. 1.1. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении напряжения постоянного электрического тока

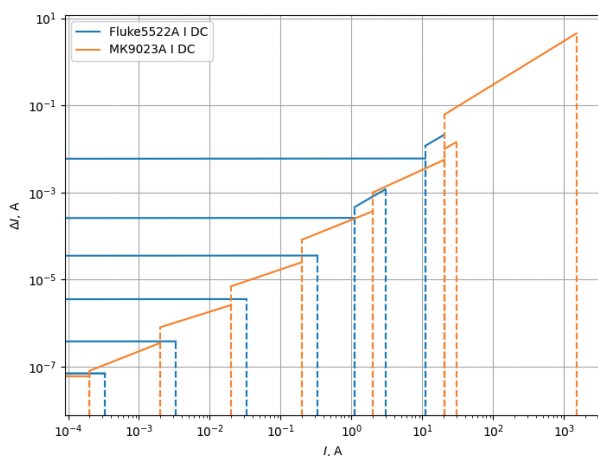


Рис. 1.2. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении силы постоянного электрического тока

Из рис. 1.2. можно сделать однозначный вывод: диапазон воспроизведения силы постоянного тока у МК9023А шире, а точность почти везде выше.

Пользователя не должно смущать, что для Fluke5522А одному и тому же значению силы воспроизводимого тока может соответствовать несколько значений погрешности, просто это погрешности для разных пределов силы тока. Естественно, на практике для достижения наибольшей точности используется наименьший предел (нижняя прямая из возможных).

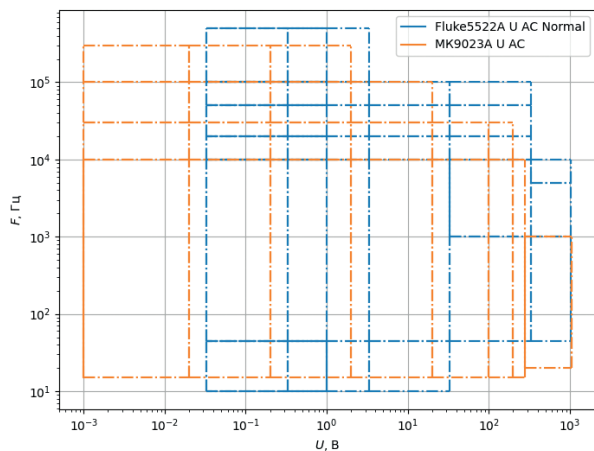


Рис. 1.3. Диапазоны воспроизведения напряжения переменного тока

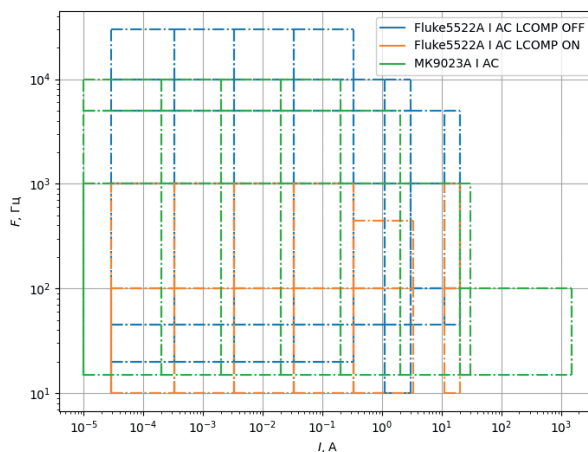


Рис. 1.4. Диапазоны воспроизведения силы переменного тока

На рис. 1.3, 1.4 изображены диапазоны воспроизведения напряжения и силы переменного тока, то есть калибратор может воспроизвести только те значения напряжения/тока для некоторой частоты, которые лежат внутри границ. Как правило, в кратких технических характеристиках приводят только лучшие показатели диапазонов воспроизведения напряжения/силы тока и частоты. Например, для Fluke 5522А в характеристиках воспроизведения напряжения переменного тока указано: «1 мВ — 1020 В, 10 Гц — 500 кГц», но из этого не следует, что максимальную частоту 500 кГц можно обеспечить для любого напряжения из диапазона 1 мВ — 1020 В. По графику видно, что данная частота достижима только для малых напряжений.

Для того чтобы изобразить на графике погрешность, необходимо добавить еще одну ось, так как погрешность воспроизведения напряжения или силы переменного тока является функцией двух переменных: частоты и напряжения или силы тока.

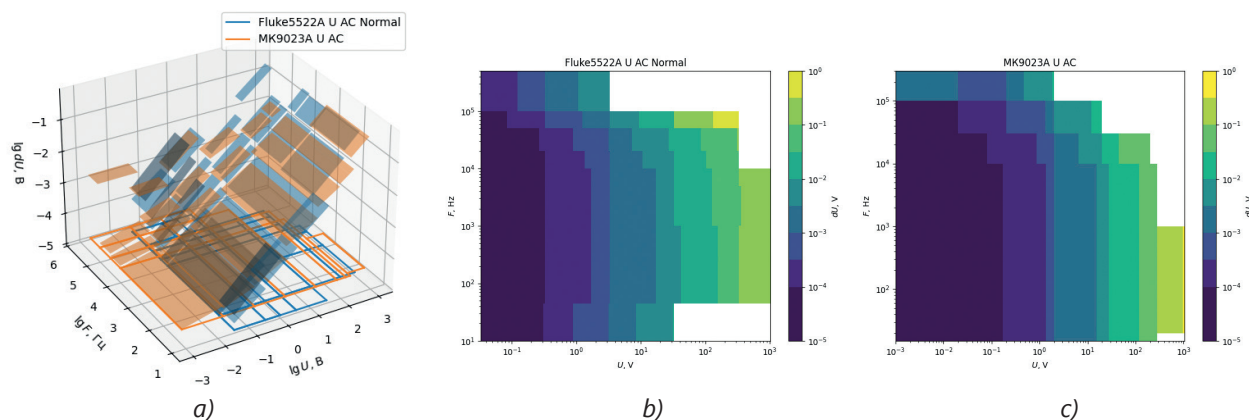


Рис. 1.5. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении напряжения переменного электрического тока; а) трехмерный график; б) контурный график для Fluke 5522A; в) контурный график для МК9023А

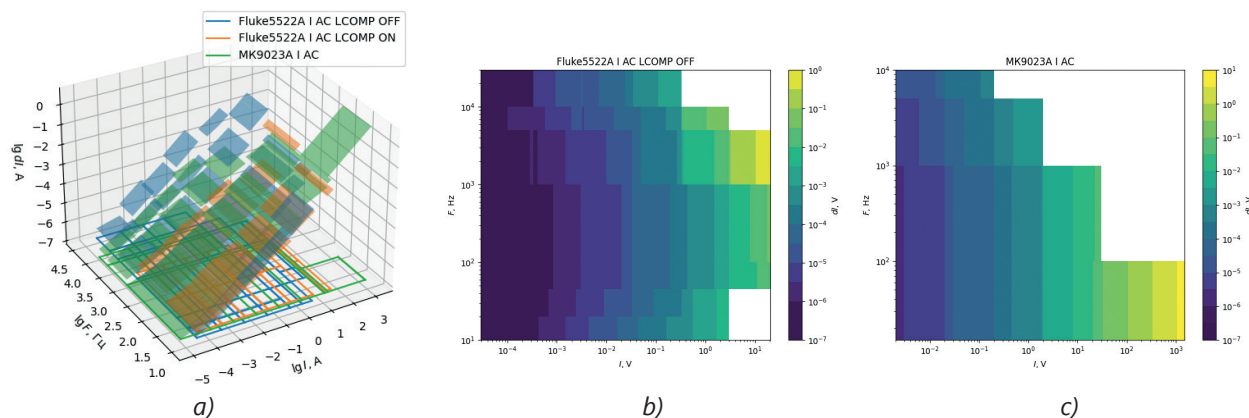


Рис. 1.6. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении силы переменного электрического тока; а) трехмерный график; б) контурный график для Fluke 5522A; в) контурный график для МК9023А

При всей сложности трехмерных графиков (рис. 1.5а и 1.6а) по ним все же можно сделать вывод, что погрешности обоих калибраторов имеют один порядок. Контурные графики на рис. 1.5б/в и 1.6б/в позволяют визуализировать погрешность как функцию двух переменных без построения

трехмерных графиков, что облегчает восприятие информации. Однако этот метод не позволяет построить несколько графиков в одних осях. Оба вида графиков могут быть полезны в разных задачах.

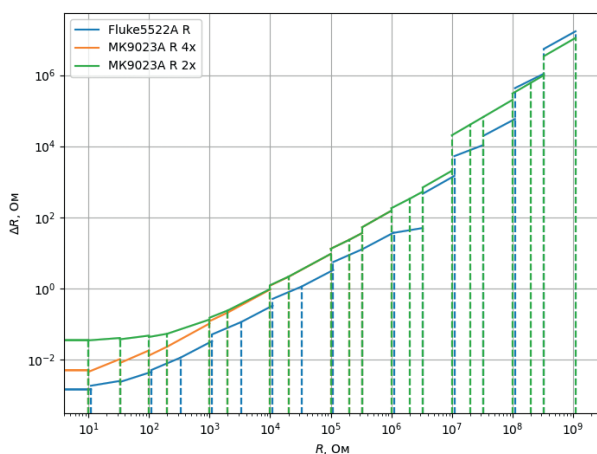


Рис. 1.7. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении электрического сопротивления постоянному электрическому току (2х — двухпроводная схема, 4х — четырехпроводная схема)

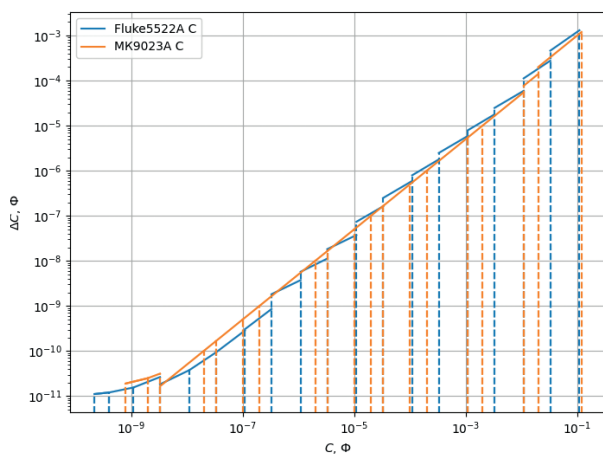


Рис. 1.8. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении электрической емкости

Графики 1.7, 1.8 дают полную информацию о режимах воспроизведения сопротивления и емкости рассматриваемых калибраторов и позволяют быстро сравнить их между собой.

Сравнение калибраторов Fluke 5730A и КЭС 5730

Теперь попробуем найти аналог для Fluke 5730A. В качестве претендента на эту роль рассмотрим калибратор эталонных сигналов КЭС 5730 из эксклюзивной линейки TNA, которую выводит на рынок группа компаний «Диполь».

Перед непосредственным сравнением обоих приборов заметим, что Fluke 5730A идет с усилителем 5725A, а у КЭС 5730 усилитель пока отсутствует, но в ближайшее время ожидается его выход.

Эти калибраторы обладают не таким большим набором функций, как рассмотренные ранее, но выигрывают по качеству, что тоже делает их незаменимыми в метрологических лабораториях.

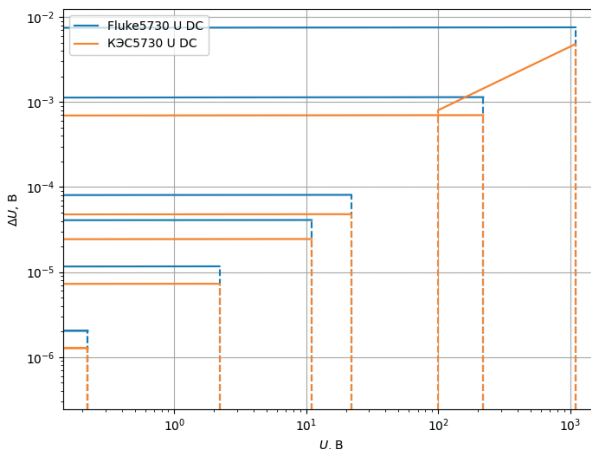


Рис. 2.1. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении напряжения постоянного электрического тока

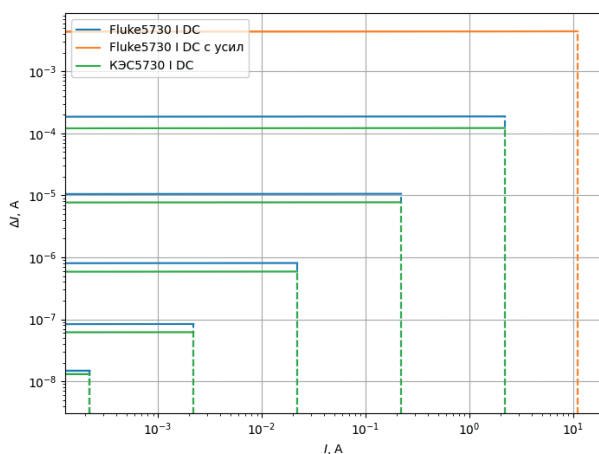


Рис. 2.2. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении силы постоянного электрического тока

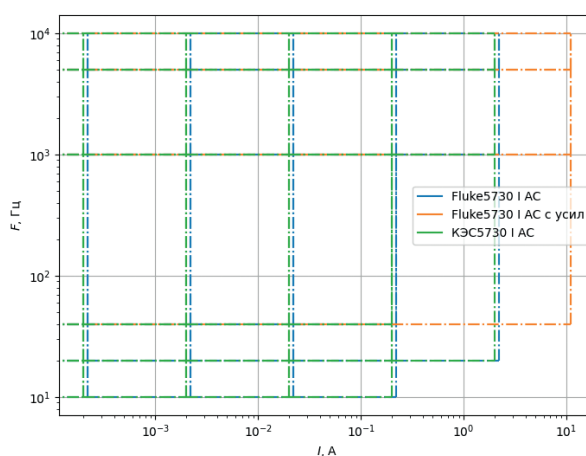


Рис. 2.4. Диапазоны воспроизведения силы переменного тока

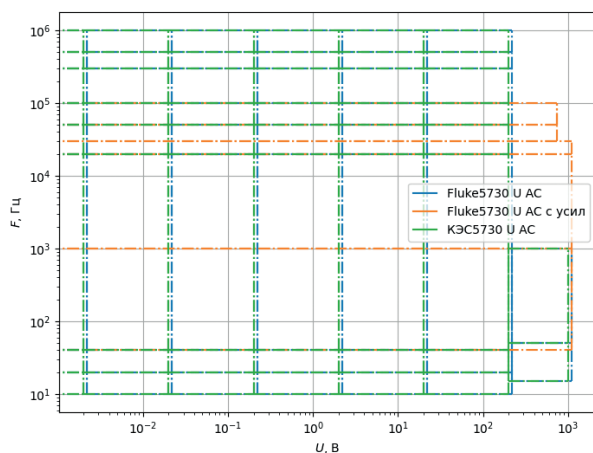


Рис. 2.3. Диапазоны воспроизведения напряжения переменного тока

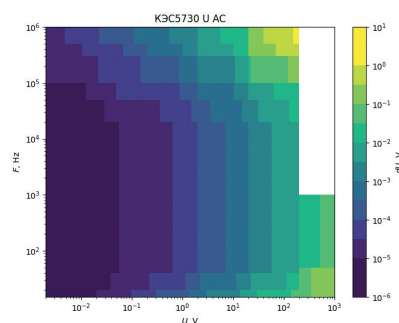
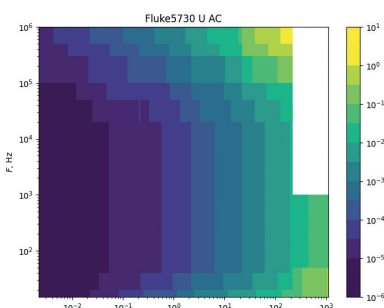
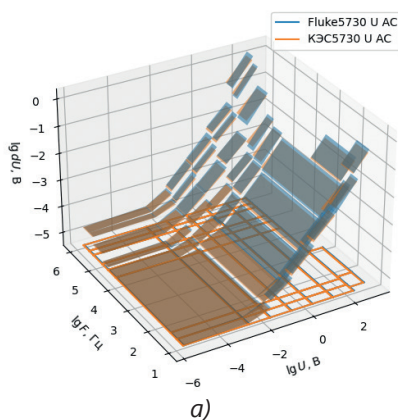


Рис. 2.5. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении напряжения переменного электрического тока; а) трехмерный график; б) контурный график для Fluke 5730A; в) контурный график для КЭС 5730

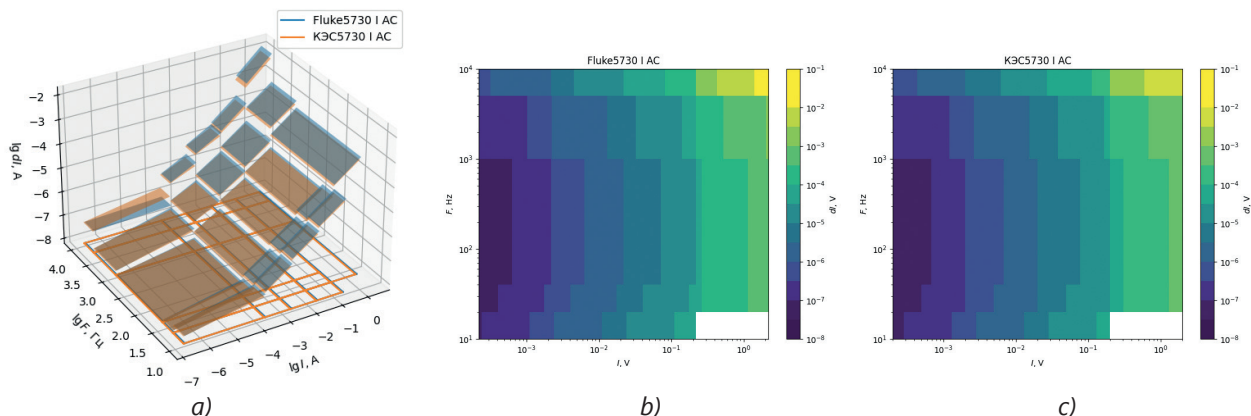


Рис. 2.6. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении силы переменного электрического тока; а) трехмерный график; б) контурный график для Fluke 5730A; с) контурный график для КЭС 5730

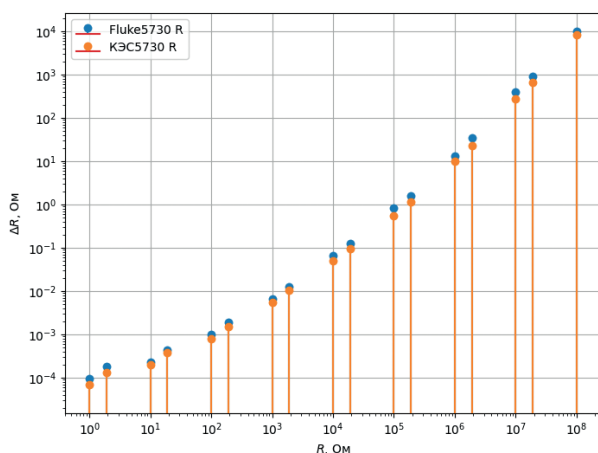


Рис. 2.7. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении электрического сопротивления постоянному электрическому току (фиксированный режим)

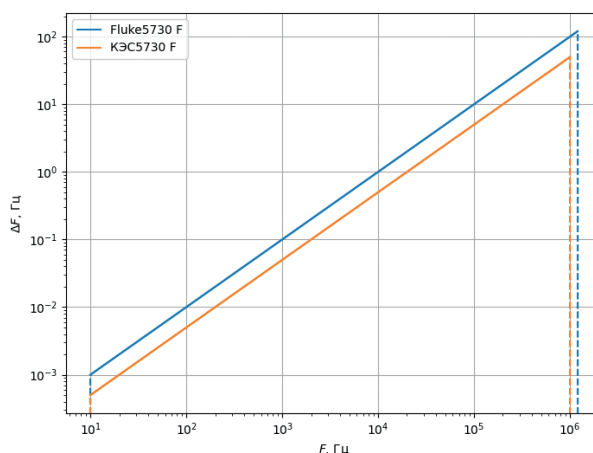
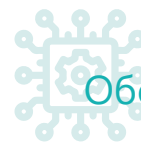


Рис. 2.8. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении частоты

Как видно на графиках, рассматриваемые калибраторы почти полностью аналогичны как по диапазонам воспроизведения, так и по точности. Как правило, у КЭС 5730 точность везде немного выше (за исключением некоторых диапазонов воспроизведения напряжения и силы переменного тока, но разница незначительная). На данный

момент главным преимуществом Fluke является наличие усилителя, который позволяет устанавливать высокие значения силы тока и более высокую частоту при воспроизведении высокого напряжения переменного тока. Но и это преимущество скоро будет нивелировано.



Поверяемые точки

Программа, с помощью которой сделаны графики для сравнения калибраторов, полезна и для анализа поверяемых точек, которые можно нанести на графики погрешностей и диапазонов воспроизведения электрических величин и быстро проверить, подойдет ли данный эталон для поверки определенного средства измерения.

Покажем, как может быть реализована такая проверка на примере вольтметра B7-78/1 (методика поверки ПР-17-2017МП). Данный прибор выбран неслучайно, так как подбор эталонов для его поверки — задача нетривиальная. При этом нюансы и с прописанным в методике поверки оборудованием — Fluke 5720 (предыдущая версия калибратора Fluke 5730). У Fluke 5730 характеристики не хуже, чем у 5720, что дает право использовать его для поверки, и, так как в предыдущей части это оборудование уже рассматривалось, выберем именно его в качестве эталона для поверки вольтметра B7-78/1.

Но прежде чем переходить к калибратору Fluke 5730 в контексте поверки вольтметра, следует проверить, может ли полностью закрыть поверку многофункциональный калибратор МК9023А или Fluke 5522А. Здравый смысл подсказывает, в наличии в лаборатории двух аналогичных калибраторов нет необходимости. При сравнении ограничимся режимами воспроизведения напряжения и силы постоянного и переменного тока.

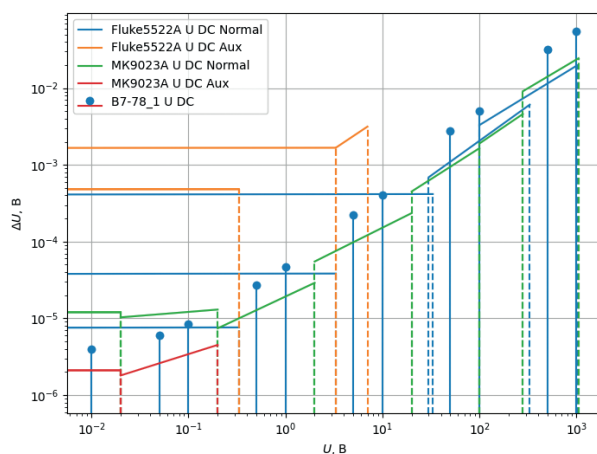


Рис. 3.1. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении напряжения постоянного электрического тока и поверяемые точки

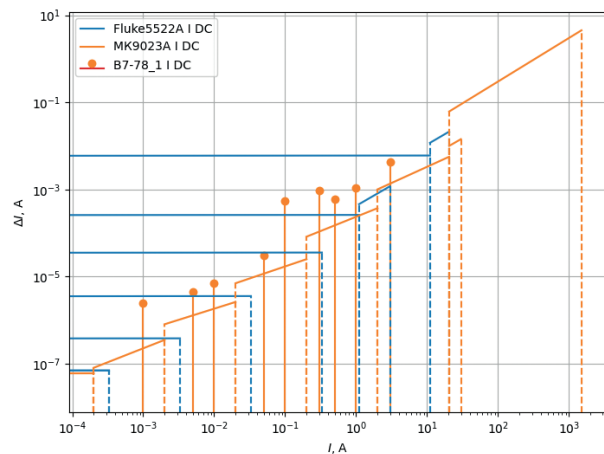


Рис. 3.2. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении силы постоянного электрического тока и поверяемые точки

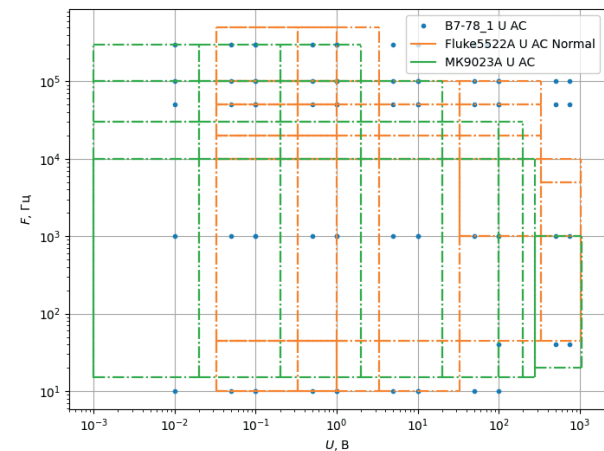


Рис. 3.3. Диапазоны воспроизведения напряжения переменного тока и поверяемые точки

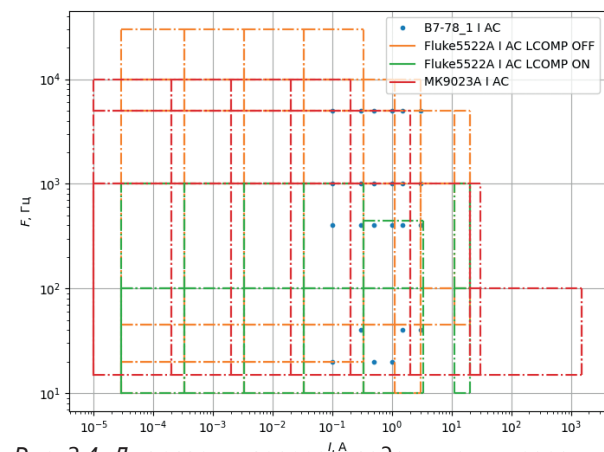


Рис. 3.4. Диапазоны воспроизведения силы переменного тока и поверяемые точки

Анализ графиков позволяет заключить, что для постоянного тока оборудование МК9023А как по точности, так и по диапазонам воспроизведения перекрывает все поверяемые точки, хотя по точности нет двукратного запаса, который требуется по поверочным схемам (но будет ясно далее, им иногда пренебрегают, когда прописывают эталоны в методиках поверки), а Fluke 5522А перекрывает все поверяемые точки по диапазонам воспроизведения, но не все точки по точности для постоянного тока.

Что касается напряжения переменного тока, ни один из этих калибраторов не перекрывает поверяемые точки по диапазонам воспроизведения. По силе переменного тока все поверяемые точки могут быть воспроизведены обоими калибраторами. Необходимости анализировать, достаточная ли у них точность воспроизведения для переменного тока, нет, поскольку уже можно сделать вывод, что ни один калибратор не подходит для поверки вольтметра В7-78/1.

Далее представлены результаты проверки калибраторов Fluke 5730А (с усилителем 5725А) и КЭС 5730.

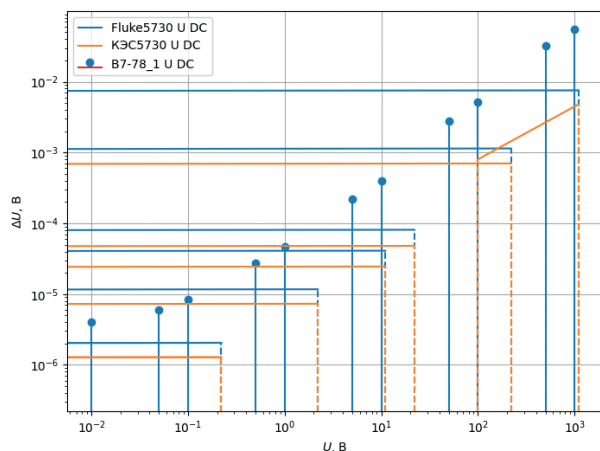


Рис. 3.5. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении напряжения постоянного электрического тока и поверяемые точки

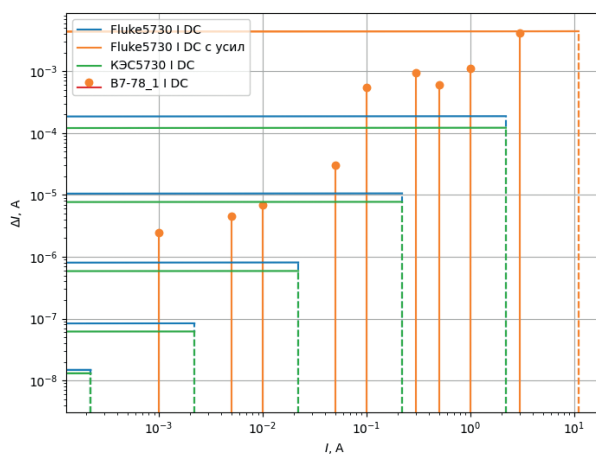


Рис. 3.6. Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности при воспроизведении силы постоянного электрического тока и поверяемые точки

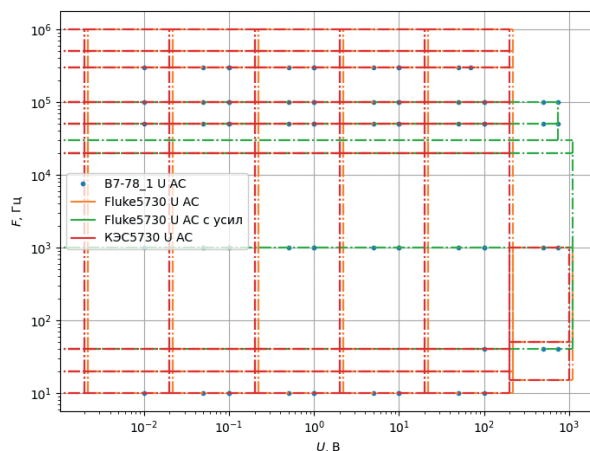


Рис. 3.7. Диапазоны воспроизведения напряжения переменного тока и поверяемые точки

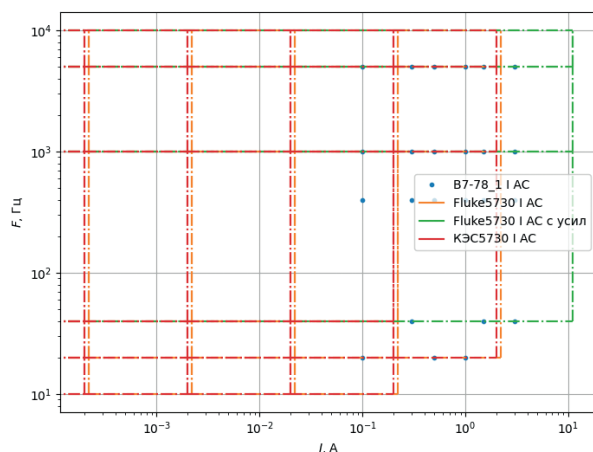


Рис. 3.8. Диапазоны воспроизведения напряжения переменного тока и поверяемые точки

Из рис. 3.5–3.8 можно заключить, что Fluke 5730A с усилителем 5725A перекрывает по диапазонам воспроизведения все поверяемые точки вольтметра B7-78/1, но для КЭС 5730 не хватает усилителя, чтобы добиться такого же результата. Что касается точности, которая оценивается только по воспроизведению напряжения и силы постоянного тока, ни о каком двукратном запасе не может идти и речи, а для некоторых точек, например 3 А, точность оказывается даже немного меньше, чем у поверяемого средства измерения. Конечно, то, что Fluke 5720A фигурирует в методике поверки как эталон, и то, что Fluke 5730A не хуже 5720, дает право использовать эти эталоны для поверки данного вольтметра, однако все равно важно помнить об указанных нюансах, ведь юридические нормы не могут изменить физических законов. Другими словами, даже если некий вольтметр прошел поверку, мы не можем гарантировать с одинаковой достоверной вероятностью, что погрешность измерения постоянного тока лежит в допустимых пределах при токе 1 мА и при токе 3 А.

Таким образом, в метрологической лаборатории не получится обойтись только одним из двух многофункциональных калибраторов. Калибраторы типа Fluke 5522A и МК9023A не всегда могут обеспечить необходимые диапазоны воспроизведения и точность для поверки некоторых СИ, а калибраторы типа Fluke 5522A и КЭС 5730 не обладают достаточно широким набором функций для поверки СИ во всех режимах работы.

Выводы

Уход компании Fluke с российского рынка потребовал срочного поиска аналогичных решений в области эталонного оборудования для метрологических лабораторий. Сравнение многофункциональных калибраторов Fluke 5522A, Fluke 5730A с доступными аналогами МК9023A и КЭС5730 показало, что каждый из рассмотренных приборов имеет свои уникальные преимущества и ограничения.

Разработанная программа визуализации технических характеристик позволяет существенно упростить процесс сравнения калибраторов, представив их метрологические параметры в наглядном графическом формате. Использование логарифмической шкалы и трехмерной визуализации дает возможность детального сравнения диапазонов воспроизведения электрических величин и их погрешности для различных режимов работы.

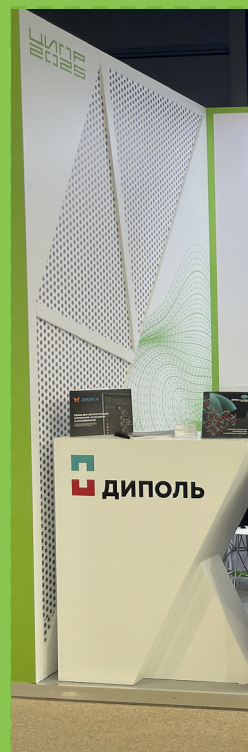
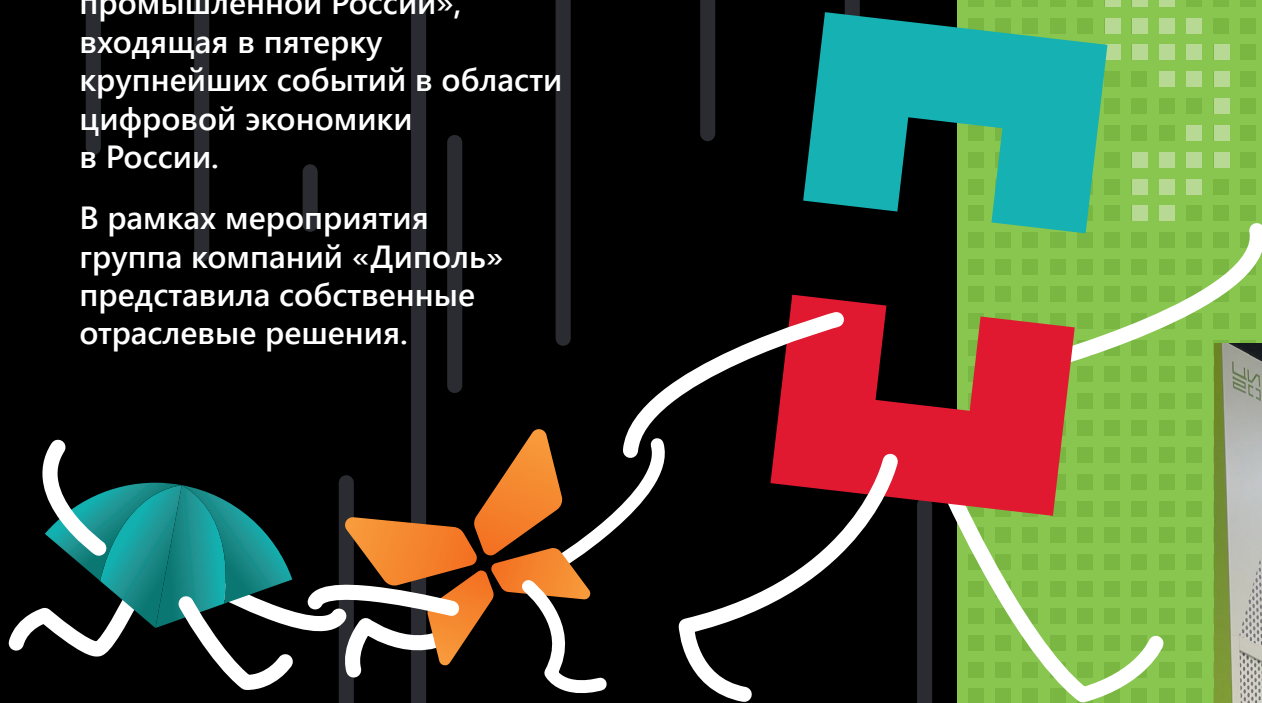
Ключевым результатом исследования является подтверждение того, что калибраторы МК9023A и КЭС5730 — достойная замена оборудованию Fluke (даже превосходя последний по точностным характеристикам), а МК9023A обладает большим набором функций, чем Fluke 5522A. Временным преимуществом Fluke 5730A перед КЭС5730 на данный момент является наличие усилителя 5725A.

Проведенный анализ также показывает, что при выборе эталонного оборудования необходимо тщательно сопоставлять не только общие технические характеристики, но и детально изучать возможности приборов в конкретных режимах работы, особенно при решении задач поверки средств измерений. Разработанный подход к визуальному сравнению может быть успешно применен для выбора эталонного оборудования при поверке средств измерений, что было показано в статье на примере вольтметра B7-78/1. 

Идем в «цифру»

С 2 по 8 июня в Нижнем Новгороде проходила конференция «Цифровая индустрия промышленной России», входящая в пятерку крупнейших событий в области цифровой экономики в России.

В рамках мероприятия группа компаний «Диполь» представила собственные отраслевые решения.



ЦИПР 2025

На протяжении многих лет ЦИПР — важная площадка для обсуждения цифровой трансформации общества и ключевых отраслей экономики.

Мероприятие объединяет ведущих акторов цифровой экономики со стороны крупного и среднего бизнеса, стартап-сообщества, науки и цифрового искусства. ЦИПР также является площадкой проведения хакатонов, питчинг-сессий, выставки NFT-искусства.

За 10 лет проведения конференции подтвердился ее статус как наиболее авторитетной дискуссионной площадки для диалога представителей бизнеса и власти по вопросам цифровой трансформации общества и быстро развивающихся отраслей, активно формирующих российскую экономику и способствующих развитию международного сотрудничества.

В рамках ЦИПР эксперты «Диполь» представили разработки компании:



ДИПОЛЬ КУПОЛ

- К.У.П.О.Л. (Комплекс Управления Производством и Организация Логистики) — комплекс программ и устройств, оптимизирующий каждый этап и участок производственной деятельности от целого предприятия до конкретного рабочего места. Применение системы позволяет обеспечить оптимальную загрузку оборудования и прозрачность процессов, сбор данных со сборочных линий, контроль за перемещением изделий.



ЭМИКА

- ЭМИКА — программное обеспечение для интуитивно понятного программирования без написания кода в области испытаний, измерений и контроля. Данное ПО позволяет создавать контрольные алгоритмы и измерительные процедуры в виде интуитивно понятных графических схем.



СДВГ ПО

**Амплифазометрический метод антенных измерений:
теория и практика.**



Сергей Наумов,
руководитель стратегических
проектов ГК «Диполь», к. т. н.
NaumovSV@dipaul.ru



Михаил Исаков,
к. ф.-м.н.

ФАЗЕ

В статье описаны физические основы и история развития амплифазометрического (устаревшее название — голографического, или радиоголографического) метода антенных измерений, примеры реализации амплифазометрических стендов — автоматизированных измерительно-вычислительных комплексов. Рассмотрены достоинства и недостатки комплексов, основанных на сканировании электромагнитного поля по каноническим (плоскость, цилиндр, сфера) и неканоническим поверхностям, распространение метода в практике измерений характеристик антенных устройств, вопросы метрологического обеспечения: источники погрешностей и особенности процедуры утверждения типов измерительно-вычислительных комплексов как средств измерений, а также тенденции развития амплифазометрических измерений.

Введение

Антенны возбуждают в пространстве два вида переменных электромагнитных полей: распространяющиеся и нераспространяющиеся. Распространяющиеся поля отбирают энергию от антенны и распространяют ее в пространство: среднее за период значение плотности потока мощности их всегда положительно, поэтому распространяющиеся поля называют полями излучения, электромагнитными волнами. Нераспространяющиеся переменные электрические и магнитные поля сосредоточены вблизи антенны, они обмениваются энергией друг с другом и с антенной, но не излучают энергию в пространство: среднее за период значение плотности потока мощности, переносимой этими полями, всегда равно нулю, поэтому нераспространяющиеся поля называют реактивными полями (полями индукции).

Пространство, в котором распространяется излученное антенной электромагнитное поле, условно разделяют на несколько областей (зон). Непосредственно примыкает к поверхности антенны область реактивных полей, которая называется так потому, что в этой области модули векторов напряженности электрического $\mathbf{E}_{\text{реакт}}$ и магнитного $\mathbf{H}_{\text{реакт}}$ реактивных полей значительно превышают модули векторов напряженности полей излучения, которые обозначим $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$. Напряженности реактивных полей по мере удаления от поверхности антенны быстро убывают, на некотором расстоянии от антенны реактивными полями можно пренебречь в сравнении с полями излучения. Это расстояние, составляющее порядка λ/π от раскрытия антенны, где λ — длина волны, есть характерная граница зоны реактивных полей.

Область пространства, включая зону реактивного поля, от раскрытия антенны до расстояний порядка $D(D/\lambda)^{0.5}/2$, где D — наибольшей линейный размер раскрытия антенны, называется ближней зоной (БЗ). Зона реактивного поля составляет малую часть от БЗ.

Область с условными границами от $D(D/\lambda)^{0.5}/2$ до $2D^2/\lambda$ называется промежуточной зоной (ПЗ), или зоной Френеля. В ПЗ начинается формирование углового распределения поля, но форма его определяется расстоянием от антенны, поскольку и амплитудные, и, что более важно, фазовые соотношения между полями от различных элементов антенны в этой области существенно зависят от расстояния.

При увеличении расстояния амплитудные и фазовые соотношения полей от различных элементов антенны асимптотически приближаются к фиксированным значениям, угловое распределение поля перестает зависеть от расстояния, остается зависимость только от углов: диаграмма направленности (ДН). ДН формируется в пределе, при устремлении расстояния к бесконечности, но на практике принято считать, что для апертурных антенн ДН формируется к расстоянию $2D^2/\lambda$. Область от этого расстояния до бесконечности называется дальней зоной (ДЗ), или зоной Фраунгофера.

В ДЗ амплитуда поля убывает с ростом расстояния обратно пропорционально первой степени расстояния, а мощность, соответственно, обратно пропорционально второй степени расстояния, поле в окрестности точки наблюдения является локально плоской волной, то есть пренебрежимо мало отличается от идеального простейшего решения уравнений Максвелла для свободного пространства, в котором векторы напряженности электрического $\mathbf{E}$ и магнитного $\mathbf{H}$ полей взаимно перпендикулярны, расположены в плоскости, поперечной к направлению распространения, зависят от времени и лишь одной пространственной координаты, отсчитываемой вдоль направления распространения волны, характеризуемого волновым вектором $\mathbf{k}$, или вектором Пойнтинга $\mathbf{S} = [\mathbf{E}, \mathbf{H}]$. Фазовый фронт (поверхность равной фазы) электромагнитной волны в ДЗ в пределах небольших телесных углов можно считать локально плоским, отсюда и название — «плоская волна». Иногда ДЗ называют также волновой зоной.

Внешние (радиотехнические) характеристики антенн определяются через рассмотрение электромагнитного поля в ДЗ излучения. Для антенных устройств с большими электрическими размерами (размерами, отнесенными к длине волны излучения), например для фазированных антенных решеток (ФАР) наземных радиолокационных станций (РЛС) характерные границы ДЗ начинаются с расстояний порядка сотен метров. Для проведения измерений в ДЗ требуются полигоны соответствующих размеров, в которых исследуемая (испытуемая) антенна (ИА) — в англоязычной терминологии Antenna Under Test (AUT) и вспомогательная антенна удалены друг относительно друга на сотни метров. Содержание таких открытых полигонов (охрана километров границ, вырубка леса, содержание территории) по мере развития альтернативных подходов стало экономически нецелесообразным.

Один из подходов, позволяющих уменьшить размер полигона, — создание измерительного комплекса, традиционно называемого компактным полигоном. Измерительный комплекс размещается внутри экранированной безэховой камеры (БЭК) и имеет в своем составе зеркало, обычно металлическое, — радиоколлиматор, что позволяет сформировать квазиплоские электромагнитные поля, то есть смоделировать условия ДЗ (иногда это называют псевдодалней зоной). Симметрия коллиматора (или системы из двух и более коллиматоров) выбирается таким образом, что в некоторой области пространства (рабочей зоне) отраженное от коллиматора или системы коллиматоров электромагнитное поле, направляемое на ИА, является локально плоской волной, что физически эквивалентно полю локально плоской волны в ДЗ. Это позволяет измерять характеристики антенных устройств и характеристики рассеяния объектов в закрытом помещении, вне зависимости от внешних помех и погодных условий.

На рис. 1 показана типичная конструкция компактного полигона из БЭК, коллиматора, позиционера для ИА, позиционера для облучателя коллиматора, антенны-облучателя коллиматора, измерительного оборудования.

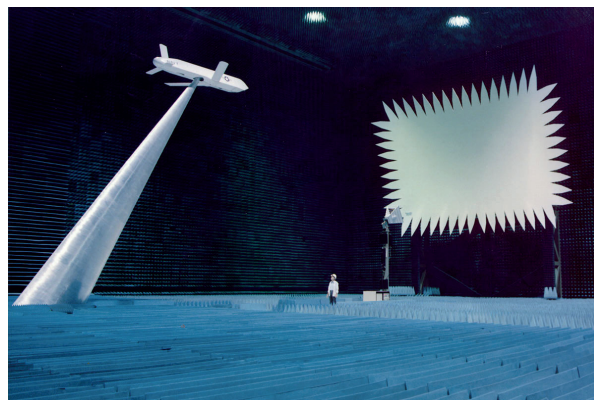


Рис. 1. Компактный полигон на основе радиоколлиматора: а) коллиматор и позиционер пилонного типа для измерения эффективной площади рассеяния объектов (изображение с сайта компании NSI-MI Technologies, США); б) коллиматор (изображение с сайта ООО «Радиолайн», Россия)

Зубцы по периметру коллиматоров на рис. 1 нужны для улучшения однородности поля в рабочей зоне. Существует проблема необходимости высокой точности изготовления зеркал радиоколлиматоров, однако некоторое время такой подход был экономически целесообразен. Подобного рода стенды могут быть настолько компактными, что имеют объем всего несколько кубических метров (рис. 2).



Рис. 2. Компактный полигон на основе радиоколлиматора: измерительное оборудование и малогабаритная БЭК с коллиматором и позиционерами для облучателя коллиматора и ИА (изображение с сайта компании NSI-MI Technologies)

Измерения характеристик направленности антенн в ДЗ или в псевдодальней зоне с использованием компактных полигонов осуществляются прямым методом: средства измерений (СИ) фиксируют значения мощности поля в зависимости от углов.

По мере прогресса СИ более дешевым подходом стало создание измерительных комплексов, в которых внешние характеристики антенн измеряются косвенным амплифазометрическим методом. В этом методе СИ фиксируют распределение электромагнитного поля в БЗ или в ПЗ, а внешние характеристики ИА в ДЗ получаются расчетным путем: преобразованием (пересчетом) электромагнитного поля из БЗ в ДЗ. Работающие таким образом измерительные комплексы правильнее называть измерительно-вычислительными: распространилось название «автоматизированные измерительно-вычислительные комплексы» (АИВК). Они используют в работе алгоритмы, называемые БЗ-ДЗ-алгоритмами преобразования электромагнитного поля (Near Field to Far Field Transformation, NF2FF). Эти алгоритмы математически близки подходам, используемым в ближнем радиовидении методом радиоголографии. По причине общности физических основ вычисление антенных характеристик из измеренного распределения поля называют восстановлением, подобно восстановлению изображений рассеивающих объектов из измерений радиоголограмм, а также реконструкцией, а сами амплифазометрические измерения — реконструктивными.

Физические основы амплифазометрического метода

Физические основы амплифазометрического метода базируются на уравнениях классической электродинамики: системе уравнений Максвелла, и состоят в утверждении о возможности вычислить поле в произвольной точке пространства, если знать любые две из шести существующих (по одной нормальной и по две тангенциальных) составляющих векторов напряженностей $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ на произвольного вида замкнутой поверхности, полностью охватывающей источники поля (заряды и токи).

Преобразования поля из БЗ или ПЗ в ДЗ базируются на идеях Гюйгенса и Френеля (принцип Гюйгенса — Френеля) о возможности представления электромагнитного поля в виде суперпозиции полей от некоторых элементарных источников. Благодаря трудам Кирхгофа, развившего теорию дифракции и придавшего принципу Гюйгенса — Френеля форму интегральной теоремы, решение уравнений Максвелла можно записать в виде так называемых интегралов Кирхгофа для векторов $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$: для произвольного распределения токов и зарядов в конечной области V свободного однородного изотропного пространства, при отсутствии волн, идущих из бесконечности, $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ вне области V представимы в виде интегралов от тангенциальных составляющих $\mathbf{E}$ и $\mathbf{H}$ на произвольной замкнутой поверхности S , полностью охватывающей объем V (в котором содержится ИА).

Интегралы Кирхгофа с учетом теоремы о единственности решений уравнений Максвелла есть математическое выражение принципиальной возможности осуществления преобразования поля из БЗ или ПЗ в ДЗ, то есть решения внешней задачи теории антенн в терминах тангенциальных компонент векторов поля.

Уравнения Максвелла и следующие из них соотношения записаны во временной области. Любая конечная периодическая во времени функция может быть разложена в ряд, в пределе — в интеграл Фурье, поэтому поле, произвольным образом меняющееся во времени, может быть построено из гармонических составляющих, что позволяет без потери общности определять внешние характеристики антенн на отдельных частотах, то есть проводить рассмотрение в частотной области (frequency domain). Во временную область (time domain) можно перейти при помощи обратного преобразования Фурье.

История развития амплифазометрического метода

Развитие метода базируется на решениях уравнений Максвелла, позволяющих осуществить преобразования поля из БЗ в ДЗ для трех так называемых канонических поверхностей: плоскости, цилиндра, сферы. Кроме проработанности теоретических представлений о разложении электромагнитного поля в спектры волн, а именно в спектр плоских волн, спектр векторных цилиндрических волн и спектр векторных сферических волн, это обусловлено удобством создания электромеханических устройств (сканеров), обеспечивающих перемещение вспомогательных антенн (зондов) по этим поверхностям.

История развития амплифазометрического метода в части теории является историей развития БЗ-ДЗ-алгоритмов, а в части практики — историей развития СИ и средств вычислительной техники. Идеи метода восходят к 1930-м годам, однако в период 1930–1980-х годов они носили характер, скорее, теоретический, нежели практический из-за недостаточного уровня развития СИ: проблемы с измерениями фаз приводили к тому, что результаты различных измерений амплитудно-фазового распределения (АФР) поля не согласовывались с приемлемой точностью.

Обзор развития БЗ-ДЗ-алгоритмов рассмотрим, следуя изложению в работе Анятина «Разработка метода измерений характеристик антенн путем сканирования по неканоническим поверхностям в ближней зоне» (Менделеево, 2022 г.).

В первых, называемых в настоящее время классическими, БЗ-ДЗ-алгоритмах, применявшихся для обработки результатов сканирования электромагнитного поля в БЗ на канонических поверхностях, интегральные преобразования сводятся к двумерному дискретному преобразованию Фурье (ДПФ), которое лишь после известной публикации Кули и Тьюки 1965 года начали вычислять методом быстрого преобразования Фурье.

Сведение вычисления интегралов к ДПФ оказалось возможным на канонических поверхностях сканирования путем разложения напряженности электрического или магнитного поля по собственным функциям векторного уравнения Гельмгольца, так называемым модам. Их вычислительная сложность аналогична точным решениям, например решению Ми.

Интегралы Кирхгофа можно вычислить непосредственным суммированием по поверхности сканирования. Такие БЗ-ДЗ-алгоритмы называют прямыми. Их вычислительная сложность аналогична методам вычислительной электродинамики, например методу физической оптики.

Из уравнений связи между антеннами можно составить систему интегральных уравнений относительно источников электромагнитного поля на некоторой поверхности. Алгоритмы, решающие такую систему уравнений, называют инверсными. Их вычислительная сложность аналогична строгим методам вычислительной электродинамики, например методу обобщенных моментов.

Основой классических БЗ-ДЗ-алгоритмов является модальное разложение для **E** или **H**, предложенное Хансеном в 1935 году. Разложение в спектр плоских волн является частным случаем модального разложения, оно было получено независимо от Хансена в 1950 году Букером и Клеммоу, его можно назвать классическим алгоритмом БЗ-ДЗ для преобразования поля из отсчетов АФР в БЗ на плоскости (планарного сканирования).

Расчетные формулы для классических БЗ-ДЗ-алгоритмов для случая преобразования поля из отсчетов АФР в БЗ на поверхности цилиндра (цилиндрического сканирования) с учетом коррекции по зондовой антенне были опубликованы Личем и Парисом в 1973 году.

Расчетные формулы для классических БЗ-ДЗ-алгоритмов для случая преобразования поля из отсчетов АФР в БЗ на поверхности сферы (сферического сканирования) были опубликованы Людвигом в 1971 году, позднее классический алгоритм для сферического сканирования обогатился математическим описанием сферических волновых функций из квантовой механики, что было сформулировано Ларсеном в 1984 году.

Прямой БЗ-ДЗ-алгоритм для случая сканирования на плоскости появился практически одновременно с классическим (Сильвер, 1949 год). В 1958 году Браун показал, что алгоритм Сильвера приводит к существенно большим погрешностям в сравнении с алгоритмом модального разложения Букера и Клеммоу при восстановлении дальних лепестков ДН. Существенные методические погрешности первых прямых БЗ-ДЗ-алгоритмов связаны с пренебрежением необходимостью коррекции измеряемого АФР с целью компенсации характеристик зондовой антенны.

Физической величиной, определяемой при амплифазометрических измерениях, является комплексный коэффициент передачи (КП) между ИА и вспомогательной антенной (антенной-зондом), помещаемой в заданное множество точек в БЗ или ПЗ ИА — этот процесс называется сканированием электромагнитного поля. Измеряемые значения КП зависят не только от свойств ИА, но и от свойств (характеристик направленности) антенны-зонда, поэтому измеренное пространственное распределение КП, строго говоря, не является АФР поля излучения ИА. Однако свойства антенны-зонда можно учесть и после проведения такой коррекции можно говорить о том, что было выполнено измерение отсчетов АФР поля в некотором множестве точек в пространстве вокруг ИА.

Большая методическая погрешность и большая вычислительная сложность обусловили приостановку развития прямых БЗ-ДЗ-алгоритмов за рубежом на несколько десятилетий. В Советском Союзе, напротив, развитие амплифазометрического метода пошло по этому пути, что определилось работами Бахраха, Курочкина и других, разработавших прямые БЗ-ДЗ-алгоритмы плоского, цилиндрического и сферического сканирования, опубликованные в 1976 году. Эти БЗ-ДЗ-алгоритмы сводились к ДПФ, что уравнивало их скорость с классическими БЗ-ДЗ-алгоритмами. Результаты работы коллектива под руководством Бахраха были оформлены в виде книги «Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне» (1985 г.), которая в России по сей день

является основным источником информации о БЗ-ДЗ-алгоритмах. Развитие прямых БЗ-ДЗ-алгоритмов продолжилось в XXI веке с опубликованием коллективом корейских авторов алгоритма БЗ-ДЗ для планарного сканирования, основывающегося на формулах Стреттона и Чу. Анютин, продолжая работы коллектива Бахраха, получил из формул Стреттона и Чу прямой алгоритм ДЗ-БЗ для сферического сканирования, а затем разработал метод приближенного вычисления интеграла Кирхгофа, отличающийся низкой вычислительной сложностью и пригодный для любых поверхностей, в том числе канонических.

Инверсные БЗ-ДЗ-алгоритмы предполагают значительно большую вычислительную сложность в сравнении с вычислением интеграла Кирхгофа или разложениями **Е** и **Н** в спектры плоских, цилиндрических или сферических волн. Первый инверсный алгоритм был описан в 1992 году. В настоящее время известны инверсные БЗ-ДЗ-алгоритмы для произвольных поверхностей. Инверсные БЗ-ДЗ-алгоритмы допускают сканирование электромагнитного поля в произвольном множестве точек вокруг ИА, даже не связанных какой-либо поверхностью.

Отдельного упоминания заслуживают алгоритмы преобразования поля из ПЗ в ДЗ. Приближение ПЗ позволяет существенным образом упростить БЗ-ДЗ-алгоритмы, что вместе с использованием систем спутникового позиционирования открывает возможности создания систем измерения характеристик крупноапертурных антенн с применением беспилотных летательных аппаратов.

История развития алгоритмов преобразования электромагнитного поля вместе с развитием СИ, в частности появлением векторных анализаторов цепей (ВАЦ), и развитием вычислительной техники привели к тому, что амплифазометрический метод стал основным способом измерений внешних характеристик антенн.

Измерения на канонических и неканонических поверхностях

При измерениях на плоскости достаточно знать распределение тангенциальной компоненты только одного из векторов E или H , в допущении, что тангенциальные составляющие E и H на плоскости измерений связаны как в плоской волне. Наиболее часто измеряется АФР двух ортогональных составляющих (горизонтальной E_x и вертикальной E_y) тангенциальной компоненты E на плоской эквидистантной прямоугольной или квадратной сетке с шагами Δx , Δy (рис. 3).

Поле E ИА в ДЗ при измерениях на плоскости представимо в виде спектра (суперпозиции) плоских волн: угловые составляющие векторов E в ДЗ выражаются в виде линейных комбинаций преобразований Фурье (дискретных аналогов интегральных соотношений) от ортогональных составляющих тангенциальной компоненты вектора E на плоскости измерений.

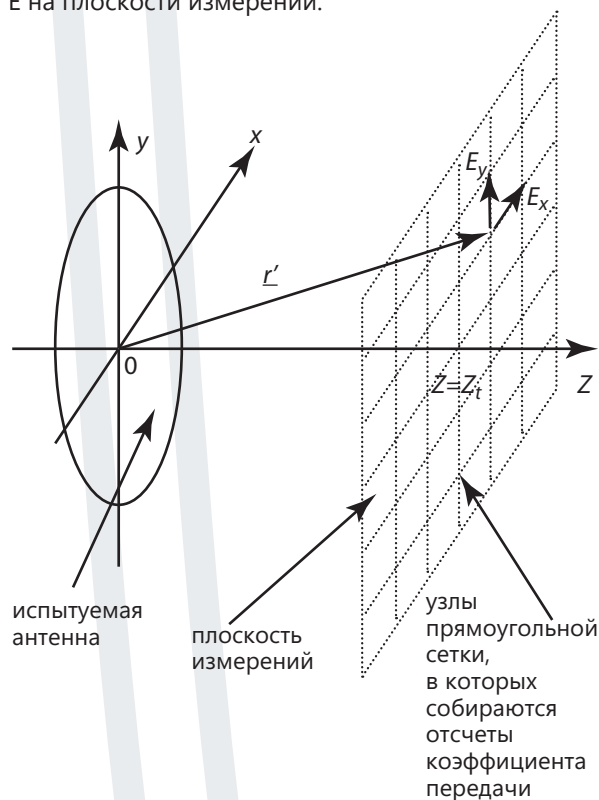


Рис. 3. Схема измерений АФР электромагнитного поля в БЗ на плоскости в узлах прямоугольной сетки с шагами Δx , Δy

Если известно, что поле ИА поляризовано линейно, необходимости в биортогональных измерениях нет, достаточно измерений одной компоненты, согласованной по поляризации, для чего достаточно ориентировать антенну так, чтобы поле на плоскости измерений имело одну составляющую, например E_y . В связи с ограничениями, вытекающими из теоремы В. А. Котельникова, Δx и Δy должны быть меньше $\lambda/2$, на практике обычно используется шаг $\Delta x = \Delta y = \lambda/3$.

Следует отметить, что прямоугольная или квадратная сетка не является единственным способом сбора отсчетов поля на плоскости. Есть примеры рассмотрения БЗ-ДЗ-преобразования для случаев измерений отсчетов поля на плоскости в узлах сетки, располагающихся на концентрических окружностях. В такой геометрии удобно работать в плоскости измерений не в прямоугольной декартовой (x, y) , а в полярной (ρ, ϕ) системе координат, параметрами сетки являются шаги по радиусу и по углу $\Delta \rho$, $\Delta \phi$ (рис. 4). Сканеры такого типа, их можно назвать циркулярными плоскими сканерами, не получили распространения, отсутствуют на мировом и российском рынке, возможно, из-за того, что плотность отсчетов неравномерна по площади области сканирования. Если зонд перемещать по радиусу непрерывно, он будет описывать спираль Архимеда, соответствующие БЗ-ДЗ-алгоритмы также описаны в литературе.

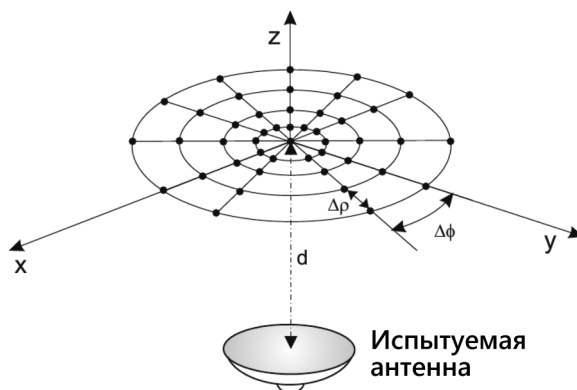


Рис. 4. Схема измерений АФР электромагнитного поля в БЗ на плоскости в узлах на концентрических окружностях с шагами по радиусу $\Delta \rho$ и по азимуту $\Delta \phi$

Рассмотрим измерения на цилиндрической поверхности. Пусть ось цилиндра направлена по оси Oz , подразумевается, что цилиндрическая поверхность полностью охватывает ИА (рис. 5).

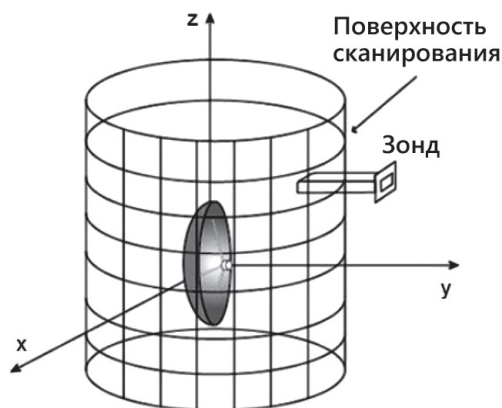


Рис. 5. Схема измерений АФР ортогональных составляющих E_z и E_φ тангенциальной составляющей E на цилиндрической поверхности

Исходными данными для восстановления поля в произвольной точке наблюдения в ДЗ при амплитазометрических измерениях на поверхности цилиндра являются ортогональные составляющие E_z и E_φ тангенциальной составляющей E . Поле в ДЗ представимо в виде спектра векторных цилиндрических волн, в коэффициентах ряда по векторным цилиндрическим волнам фигурируют функции Ханкеля второго рода.

Рассмотрим измерения на сферической поверхности. Исходными данными для определения поля в ДЗ при реализации амплитазометрического метода антенных измерений на сфере являются измеренные составляющие E_θ и E_φ на сфере некоторого радиуса a , полностью охватывающей ИА. На рис. 6 показаны непересекающиеся минимальные сферы, охватывающие ИА, антенну-зонд и системы координат, связанные с ИА (без штрихов) и с антенной-зондом (со штрихами).



Рис. 6. Схема измерений АФР ортогональных составляющих E_θ и E_φ тангенциальной составляющей E на сферической поверхности

Угол χ показывает поворот линейно-поляризованного зонда относительно своей оси, направленной в начало координат, так как для разложения E в спектр векторных сферических волн необходимо иметь в качестве исходных данных две ортогональные компоненты (например, θ и φ) тангенциальной (касательной к сфере) составляющей E (достаточно положения зонда $\chi = 0$ и $\chi = \pi/2$). Комплексную амплитуду касательного к сфере поля вне области, содержащей источники поля, в том числе в ДЗ, можно представить спектром ненормированных по мощности или нормированных по мощности векторных сферических волн, в определении которых фигурируют сферические функции Ханкеля 2-го рода, присоединенные полиномы Лежандра, их производные (вычисляемые обычно по рекуррентным формулам). Коэффициенты ряда выражаются при этом через интегралы от распределений E_θ и E_φ .

Измерения на каждой из канонических поверхностей имеют свои достоинства и недостатки.

Измерения на плоскости, строго говоря, в принципе не могут дать точного результата, так как область измерений конечных размеров (часть плоскости) не является замкнутой поверхностью. Преобразования Фурье от ортогональных составляющих напряженности поля E_x , E_y подразумевают интегрирование по бесконечным пределам, на практике приходится считать, что вне области измерения конечных размеров составляющие E равны нулю. Чтобы это не приводило к неприемлемо большим погрешностям измерений, эмпирическим критерием является выбор размеров области сканирования таким образом, чтобы к ее краям мощность сигнала спадала хотя бы до минус 40 дБ от максимума в области сканирования. Это нетрудно сделать для высоконаправленных антенн, с большим коэффициентом усиления (КУ), например, ФАР с большими электрическими размерами. Для слабонаправленных антенн с КУ менее 10–15 дБи либо слишком значительная часть излучения оказывается за пределами области измерений, либо размеры области измерений необходимо делать настолько большими, что это становится экономически нецелесообразным. Поэтому для антенн, направленность которых хотя бы в одном измерении менее 10–15 дБи, амплифазометрические измерения при помощи плоского сканера не позволяют восстанавливать дальние боковые лепестки с приемлемыми погрешностями. Необходимо сканирование по цилиндрической, сферической либо неканонической поверхности.

Измерения на цилиндрической поверхности целесообразны в случае, когда симметрия ДН антенны такова, что в одной плоскости она узкая, а в другой относительно широкая. Измерения на сферической поверхности представляют собой наиболее общий случай из канонических поверхностей, подходящий для антенн с любым видом ДН. Закономерности при этом сохраняются: чем более узкой является ДН антенны, тем меньшими могут быть размеры области измерений на сфере в зоне Френеля для восстановления ДН с приемлемыми погрешностями.

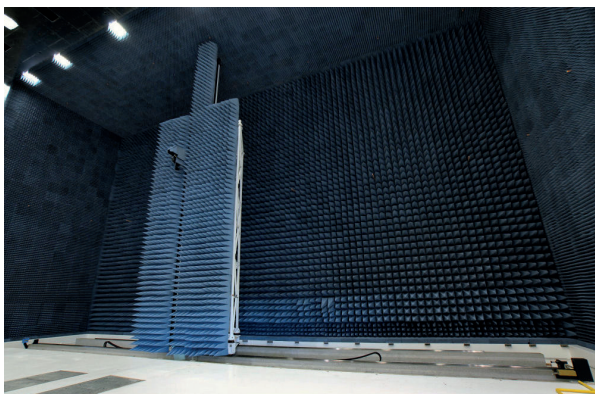
Измерения на неканонических поверхностях можно организовать при помощи плоского сканера, имеющего возможность перемещать зонд по нормали к плоскости сканирования, с достаточным запасом хода, чтобы описать желаемую поверхность, либо при помощи манипулятора, позволяющего перемещать антенну-зонд как по каноническим, так и по произвольной неканонической поверхности. Например, методика измерений внешних характеристик антенн путем сканирования электромагнитного поля по неканоническим поверхностям в БЗ излучения ИА и соответствующее специальное программное обеспечение были созданы во ФГУП «ВНИИФТРИ» (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ № 2018619915), они позволяют выполнять измерения с эквивалентным уровнем помех минус 35 дБ. АИВК БЗ на основе сканирования по неканоническим поверхностям имеют ряд преимуществ.

Примеры реализации амплифазометрических стендов

Крупногабаритные амплифазометрические стенды, содержащие в своем составе экранированные БЭК размерами десятки метров, являются СИ единичного изготовления, собираемыми на местах эксплуатации, и реализуются в соответствии с индивидуальными требованиями технических заданий заказчиков.

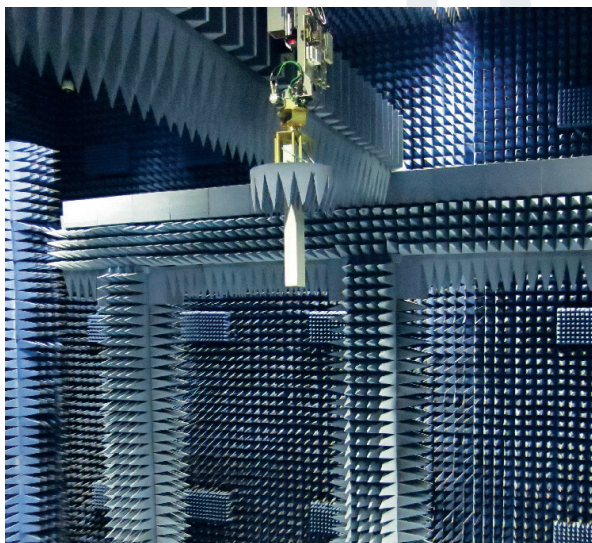
Таковы, например, АИВК компании NSI-MI Technologies, представленные на рис. 7.

Рис. 7. Примеры АИВК БЗ: а) на основе вертикального плоского сканера; б) на основе горизонтального плоского сканера; в) на основе цилиндрического сканера; г, д) на основе сферических сканеров арочного типа; е) на основе 8-осевого манипулятора (изображения с сайта компании NSI-MI Technologies)



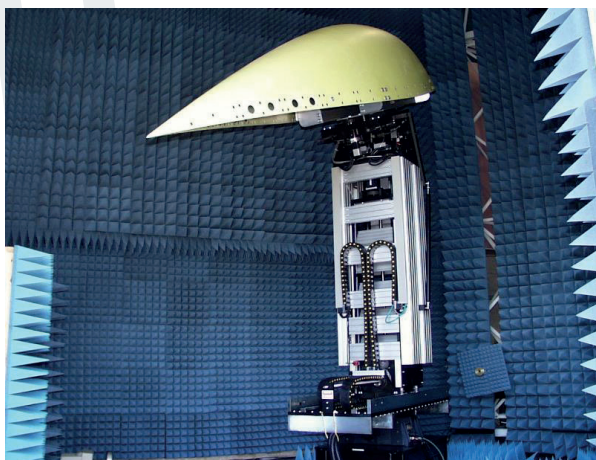
а)

На рис. 7а показан пример АИВК модели PNF-XYV на основе большого вертикального плоского сканера (Large Vertical Planar Near-Field System), размеры области сканирования до $32,9 \times 15,2 \text{ м}^2$ (у системы PNF-XYV — $32,9 \times 15,2$). Сканеры такого типа называют башенными Т-сканерами, имея в виду конструктив, похожий на перевернутую букву Т: башня перемещается по горизонтали на рельсах, вдоль башни по вертикали перемещается антенна-зонд (плоскость измерений вертикальна).



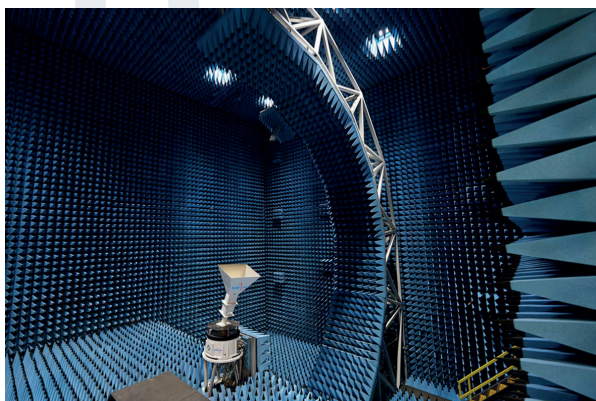
б)

На рис. 7б показан пример АИВК на основе большого горизонтального плоского сканера (Large Horizontal Planar Near-Field System), размеры области сканирования $14,0 \times 7,9 \text{ м}^2$. Сканеры такого типа называют порталными П-сканерами, из-за конструктива, похожего на букву П: балка перемещается по нормали к себе в горизонтальной плоскости на поднятых на высоту рельсах (в проекции выглядит как буква П), вдоль балки перемещается антенна-зонд (плоскость измерений горизонтальна).



в)

На рис. 7в показан пример АИВК на основе большого цилиндрического сканера (Large Cylindrical Near-Field Scanner System). Сканер представляет собой конструкцию, позволяющую антенне-зонду перемещаться по вертикали вдоль неподвижной башни. Перед башней установлено опорно-поворотное устройство (ОПУ), на котором размещается ИА. При вращении ОПУ и перемещении антенны-зонда вверх вниз в системе координат, связанной с ИА, антенна-зонд перемещается по поверхности цилиндра. Ход антенны-зонда по вертикали: 16 м, радиус цилиндра 5,5 м. Система может использоваться для измерений сечений ДН в ДЗ, для ИА, для которых на соответствующих частотах расстояние 5,5 м может считаться ДЗ.



г)

На рис. 7г показан пример АИВК на основе большого сферического сканера арочного типа.

Сканер представляет конструкцию, позволяющую осуществлять сканирование по азимуту (благодаря ОПУ, на котором размещается ИА) и дуге (Arch-over-Azimuth Scanner). При вращении ОПУ и перемещении антенны-зонда вдоль дуги арки в системе координат, связанной с ИА, антенна-зонд перемещается по поверхности сферы. Радиус сканирования у систем такого типа составляет 1–10 м, а длина дуги арки может соответствовать интервалам по углу места 90, 115, 135, 180°.



д)

На рис. 7д показан пример АИВК на основе аналогичного сферического сканера арочного типа, арка может вращаться со скоростью до 5 об/мин, зонд перемещается по арке в пределах 115°, ИА при этом неподвижна. Такие системы могут использоваться для измерений сечений ДН в ДЗ для ИА, для которых на соответствующих частотах соответствующие радиусы сфер могут считаться ДЗ.



е)

На рис. 7е показан пример АИВК на основе 8-осевого роботизированного манипулятора (8-Axis Robotic Antenna Measurement System), которая может перемещать антенну-зонд по плоской, цилиндрической, сферической или неканонической поверхности, ИА может быть как неподвижной, так и поворачиваться.

В России компактные полигоны с радиоколлиматорами и АИВК БЗ и ДЗ создаются несколькими компаниями, в том числе ООО «ННПП «ТРИМ — Сверхширокополосные измерительные системы» (Санкт-Петербург) и ООО «Радиолайн» (Москва).

В качестве примеров рассмотрим АИВК БЗ на основе плоских сканеров, созданные при непосредственном участии авторов настоящей статьи: АИВК от ООО «НПП «ТРИМ — Сверхширокополосные измерительные системы» на основе вертикального башенного сканера с возможностью наклона башни ТМСА 0.15 — 12.0 БЗ 083 (номер в государственном реестре СИ 66662-17) и два одинаковых (редкий случай) АИВК на основе горизонтальных порталных сканеров, созданных АО «ЦНИРТИ имени академика А. И. Берга» и предприятиями по кооперации ПМЖИ.411734.001 и ПМЖИ.411734.002 (номера в государственном реестре СИ 85857-22 и 85793-22, плоские горизонтальные сканеры в этих АИВК разработаны и изготовлены ООО «Радиолайн»).

АИВК ТМСА 0.15 — 12.0 БЗ 083 конструктивно состоит из:

- экранированной БЭК;
- прецизионного пятикоординатного плоского башенного Т-сканера, предназначенного для перемещения антенны-зонда по координатам (x, y, z, El, P) , где x, y, z — координаты декартовой системы координат (x, y — в плоскости измерений, z — по нормали к плоскости измерений), El — наклон башни, угловая координата в плоскости угла места (элевации) — башня сканера может отклоняться от вертикали до 32 градусов, P — угловая координата в плоскости поляризации антенны-зонда;
- ВАЦ для измерения отношения амплитуд и разности фаз опорного и зондирующего сигналов (комплексного КП системы «ИА — антенна-зонд»);
- комплекта антенн-зондов, имеющих линейную поляризацию (значение кросс-поляризационной развязки антенн-зондов лучше 20 дБ);
- комплекта СВЧ кабельных сборок;
- ЭВМ и программного обеспечения для управления измерениями и обработки результатов измерений;
- источников бесперебойного питания для обеспечения завершения работы АИВК при нештатном отключении электропитания и др.

Сканер АИВК ТМСА 0.15 — 12.0 БЗ 083 (рис. 8) имеет размеры области сканирования до $32 \times 13 \text{ м}^2$. Пределы относительной погрешности измерений амплитудного распределения поля, абсолютной погрешности измерений фазового распределения поля, соответствующие пределы относительной погрешности измерений относительных уровней ДН и другие метрологические и технические характеристики АИВК приведены в описании типа.

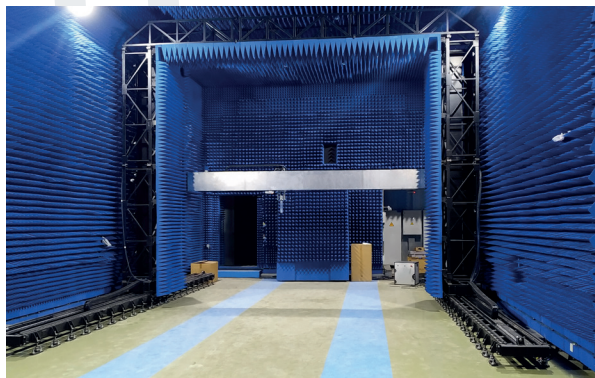


Рис. 8. Вертикальный башенный сканер с возможностью наклона башни: а) башня расположена вертикально; б) башня наклонена на 32° к вертикали

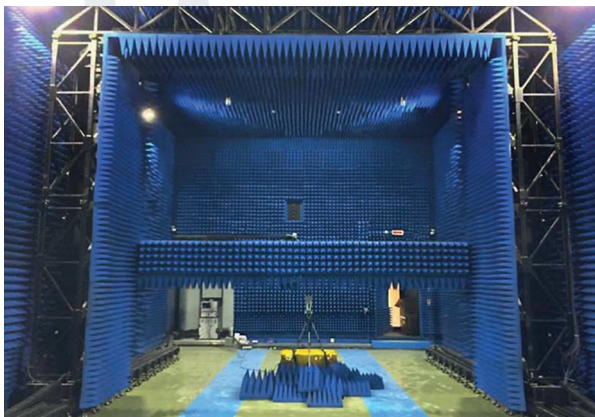
АИВК ПМЖИ.411734.001 и ПМЖИ.411734.002 каждый конструктивно состоит из экранированной БЭК, прецизионного четырехкоординатного плоского портального П-сканера, предназначенного для перемещения антенны-зонда по координатам (x, y, z, P), векторного анализатора цепей, комплекта антенн-зондов, комплекта СВЧ кабельных сборок, ЭВМ и программного обеспечения, и др.

Сканеры АИВК ПМЖИ.411734.001 и ПМЖИ.411734.002 (рис. 9) имеют размеры области сканирования до $7 \times 5 \text{ м}^2$. Пределы относительной погрешности измерений амплитудного распределения поля, абсолютной погрешности измерений фазового распределения поля, соответствующие пределы относительной погрешности измерений относительных уровней ДН и другие метрологические и технические характеристики АИВК приведены в описании типа.

Рис. 9. Горизонтальный порталный сканер:
а) вид по ходу движения подвижной части сканера; б) вид с установленной антенной под плоскостью сканирования ИА



а)



б)

Некоторые предприятия делают аналогичные стенды самостоятельно (номера в государственном реестре СИ 57219-14, 64746-16 и др.). АИВК меньших размеров, не содержащие в своем составе экранированных БЭК, могут представлять собой серийно производящиеся изделия: например, система измерения параметров антенн TS8991 (рис. 10) на основе сферического сканера маятникового типа от компании Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG (Германия) — номер в государственном реестре СИ 80843-20. В качестве зондов используются антенны Вивальди. Устройство позиционирования состоит из азимутального привода и угломестного привода (мачты). При повороте ИА и движении мачты с зондом зонд перемещается относительно ИА по сфере радиусом от 0,9 м (для модификации S) до 1,7 м (для модификации XL).



Рис. 10. Система TS8991: 1 — БАЦ; 2 — позиционер; 3 — антенна-зонд; 4 — эталонная антенна для калибровки или ИА; 5 — радиопоглощающий материал; 6 — ЭВМ; 7 — контроллер позиционера

Распространение метода в практике измерений характеристик антенн

Внедрение в практику амплифазометрического метода предприятиями оборонно-промышленного комплекса сталкивалось со сложностями, обусловленными невозможностью просто внести в действующие ТУ на антенные устройства измерения в БЗ вместо измерений в ДЗ. Требовались сравнительные испытания. Еще 10 лет назад (по состоянию на 2015 год) амплифазометрический метод практически не встречался в практике проведения приемо-сдаточных испытаний антенных устройств изделий военной техники. К настоящему времени произошел заметный прогресс: амплифазометрический метод стал основным методом испытаний ФАР антенных устройств изделий военной техники, хотя для более простых антенн за этот период в государственном реестре СИ появилось множество АИВК ДЗ и АИВК с использованием коллиматоров.

Измерения в БЗ, в отличие от измерений в ДЗ или в поле коллиматора, дают намного более полный массив данных для анализа. В случае ФАР следует упомянуть возможность преобразования поля с плоскости измерений не в ДЗ, а в обратном направлении, внутрь поверхности сканирования, на апертуру ФАР. Потребность в таком преобразовании возникает при решении задач диагностики антенн (контроля исправности фазовращателей в каналах ФАР). При разработке и эксплуатации ФАР возникает ряд эффектов, обусловленных симметрией взаимного расположения элементов, их взаимодействием, их характеристиками направленности, обычно не учитываемых при простейшем рассмотрении. В частности, таким эффектом является зависимость КУ от углов отклонения главного луча ДН, характеризуемая диаграммой сканирования, которая может содержать специфические области снижения КУ, обусловленного различными явлениями. Одно из таких явлений — появление в ДН ФАР при отклонении луча дополнительных интерференционных максимумов (дифракционных лепестков). Подобные многолучевые ДН удобно наблюдать при измерениях антенн в БЗ, получая подробную информацию о ФАР, например, изменении крутизны пеленгационной характеристики по причине неодновременности ослепления в суммарном и разностном каналах при переходе в режим многолучевой ДН, и других тонких эффектах.

Вопросы метрологического обеспечения

Реализация косвенного амплифазометрического метода измерений внешних характеристик антенн в БЗ-ДЗ-алгоритмах ставит сложные вопросы о достоверности получаемых результатов измерений. В настоящее время существуют эталоны и сличения по ним только для КУ. Точность измерений прочих внешних характеристик оценивается с помощью имитационных моделей измерений на АИВК БЗ.

Количество источников погрешностей, возникающих при амплифазометрических измерениях, весьма велико. Погрешности можно разделить на две группы: методические погрешности и погрешности СИ.

Основные методические погрешности:

- обусловленные ограничением пространственной области измерения;
- обусловленные погрешностями позиционирования зонда в заданных координатах (или определения координат при непрерывном движении зонда), в частности, для правильного измерения фазы очень важна точность позиционирования по нормали к поверхности измерений (в случае измерений на плоскости вводится такая характеристика сканера, как плоскостность плоскости измерений);
- обусловленные дискретизацией измерений (пространственные шаги между отсчетами поля не должны превышать $\lambda/2$, в практике обычно используется шаг $\lambda/3$, желательно делать его меньше, но это привело бы к слишком продолжительным временам измерений);
- обусловленные конечными размерами антенны-зонда (по сути, антенна-зонд измеряет поле не в точке, а интегрирует его по некоторой поверхности).

Основные погрешности СИ:

- погрешности измерения амплитуд и фаз (ВАЦ);
- погрешности, вносимые трактами опорного и измерительного каналов;
- погрешности, обусловленные переотражениями радиосигнала между ИА и антенной-зондом;
- погрешности, обусловленные отражениями от окружающих предметов (стен БЭК, в которой производятся измерения, элементов конструкции установки и т. д.), и др.

Самым важным источником погрешностей при амплифазометрических измерениях являются погрешности измерения фазового распределения.

Расстояние между ИА и поверхностью сканирования желательнее выбирать минимальным, однако при малых расстояниях зонд вносит искажения в поле ИА, что приводит к дополнительным погрешностям измерений. При измерениях на плоскости это расстояние обычно выбирается в пределах от двух до пяти длин волн.

Прямому переносу БЗ-ДЗ-алгоритмов из вычислительной электродинамики в практику препятствует то обстоятельство, что в практике измеряется (при двух поляризациях антенны-зонда) комплексный КП S21 при прохождении сигнала через систему «ИА — антенна-зонд», а не требуемые составляющие напряженности электрического и магнитного поля. АФР величины S21 не является АФР ортогональных составляющих тангенциальной компоненты поля. КП можно ассоциировать с компонентами напряженности только электрического поля для вибраторных зондовых антенн или только магнитного поля для рамочных зондовых антенн. Для произвольных зондовых антенн компоненты напряженности электрического и магнитного поля должны вычисляться из уравнения, связывающего их с КП. Эта операция называется коррекцией по зондовой антенне.

Развитие СИ привело к тому, что инструментальная погрешность стала меньше методической, таким образом, приобрела актуальность задача учета влияния характеристик зондовой антенны на результаты измерений. Первые решения этой задачи заключались во внесении эмпирических поправок, основанных на ДН антенны-зонда. В зарубежной литературе постепенно появился термин *probe correction*, который означает коррекцию по зондовой антенне.

Строгие методы коррекции по зондовой антенне продолжительное время отсутствовали. Для практики измерений на плоскости оказалось приемлемо упрощенное понимание следующего вида: при измерениях зондом в виде открытого конца волновода в **Е**-плоскости модуль поля плоской волны совпадает с тангенциальной компонентой, в **Н**-плоскости тангенциальная компонента поля плоской волны связана с ее модулем через $\cos\theta$, в связи с чем при вычислениях ДН из измеренных на сканере АФР КП S21 в одну из формул, описывающих преобразование поля из БЗ в ДЗ, в терминах напряженности поля

в сферической системе координат (θ, φ) необходимо «дописать» множитель $\cos\theta$, чтобы он присутствовал в обеих проекциях: и E_θ , и E_φ .

Впервые удобное для практики уравнение связи между антеннами было получено Бурштейном в 1958 году. Автор преследовал цель уменьшения методической погрешности измерений КУ, по-видимому, это не позволило осознать в полученном результате универсальный инструмент для коррекции по зондовой антенне в задачах измерений и преобразований электромагнитного поля. В 1960 году это же уравнение было получено Кернсом и Дэйхофом, в этом случае его судьба сложилась аналогично. Первый строгий метод коррекции по зондовой антенне был предложен Брауном и Джуллом в 1961 году для двумерной постановки задачи в полярной системе координат. В 1970 году Кернс опубликовал решение для трехмерной постановки задачи. Поскольку для современников не имелось альтернатив, теория Кернса стала общепризнанным стандартом для методов измерений внешних характеристик антенн в БЗ.

В следующие несколько лет появились строгие методы коррекции по зондовой антенне для классических БЗ-ДЗ-алгоритмов цилиндрического и сферического сканирования, при этом коррекция по зондовой антенне для случая разложения электромагнитного поля по сферическим модам осуществлялась только по одной моде, с этим связаны особые требования к зондовой антенне в классических БЗ-ДЗ-алгоритмах сферического сканирования. Сложилась ситуация, при которой для осуществления строгой коррекции по зондовой антенне необходимо разложить электромагнитное поле по модам, а сделать это возможно только на канонических поверхностях: плоской, цилиндрической и сферической.

Для прямых алгоритмов приближенный метод коррекции по зондовой антенне был предложен Анютиним в 2018 году. Для инверсных БЗ-ДЗ-алгоритмов приближенный метод коррекции по зондовой антенне был предложен Альварезом, Лас-Херасом и Пино в 2007 году. Развитие алгоритмов продолжается, но представляет уже, скорее, академический интерес. Для практики измерений на плоскости погрешности измерений оказываются приемлемо малыми уже при самых простых представлениях о коррекции с использованием главных сечений ДН антенны-зонда, как это и реализовано в АИВК БЗ на основе плоских сканеров, внесенных в государственный реестр СИ.

Заключение

Минимальные частоты, на которых применяется метод, составляют около 0,5 ГГц, а максимальные в настоящее время превышают 100 ГГц. Это стало возможным благодаря тренду последних лет: включения в состав АИВК БЗ кроме электро-механических сканеров СИ координат — лазерных трекеров. При обработке результатов измерений это новшество позволяет скомпенсировать погрешность, вносимую неидеальностью электро-механических сканеров, реализующих перемещение зондовых антенн не по идеальным плоской, цилиндрической или сферической поверхностям или задуманной неканонической поверхности, а по поверхностям с некоторыми отклонениями от идеальных (речь идет о коррекции измерений распределений фаз по этим поверхностям).

Кроме очевидного следствия, выражающегося в возможности развивать амплифазометрический метод антенных измерений в область частот выше 100 ГГц, обусловленного тем, что точность измерений координат лазерными трекерами на порядки выше точности позиционирования зондовых антенн электро-механическими позиционерами, возникла целая новая область дальнейшего развития АИВК благодаря появлению возможности не только проводить измерения на канонических поверхностях, но и иметь свободу в выборе множества точек сканирования электромагнитного поля.

Десятилетие исследований новых видов АИК БЗ завершилось их внедрением в практику измерений внешних характеристик антенн. Так, коллективом Эйберта, авторами самого продвинутого инверсного БЗ-ДЗ-алгоритма, создан АИК БЗ на базе мостового крана, что позволяет использовать оптимальную поверхность сканирования для широкоапертурных антенн. Новые подходы к реализации амплифазометрического метода, несомненно, в обозримом будущем будут получать все более широкое распространение в практике.

Научно-производственная фирма «Диполь» имеет возможность реализовать по техническому заданию заказчика АИК БЗ всех основных видов, в том числе на основе вертикальных и горизонтальных плоских сканеров, цилиндрических сканеров, арочных или маятниковых сферических сканеров, а также решить сопутствующие задачи, например проектирование, изготовление и ввод эксплуатацию безэховых экранированных камер, с учетом проведения сертификационных испытаний, в том числе и для решения задач в смежных областях, таких как обеспечение противодействия иностранным техническим разведкам (ПДИТР). 

И снова — добры дзень!

Группа компаний «Диполь»
продолжает цикл семинаров,
посвященных организации
производства электроники
в современных условиях.



Первый международный научно-практический семинар «Современные возможности в производстве электроники: технологии, оборудование, материалы» состоялся в Минске в 2023 году.

Убедившись в востребованности мероприятий такого формата, компания продолжила серию семинаров. В течение последних двух лет они проходили в Томске, Новосибирске, Казани, Екатеринбурге, Москве, Чебоксарах. Идя навстречу пожеланиям производителей, эксперты «Диполя» в июне 2025 года вновь посетили столицу Беларуси.

За прошедшее время тематика и содержание семинаров значительно актуализировались с учетом отраслевых запросов. В этом смогли убедиться гости очередной минской встречи, которая собрала почти в два раза больше участников.



Экономика Беларуси включает такие ключевые секторы, как машиностроение, химическая и пищевая промышленность, производство электроники (микроэлектроника («Интеграл»), бытовая техника («Горизонт»), телекоммуникационное оборудование («Агат»).

В последние годы объем промышленного производства составил около \$30 млрд, экспорт продукции достиг \$25 млрд. В промышленности занято более 1 млн человек.



На очередном семинаре в Минске были представлены современные технологические материалы, используемые для сборки РЭИ (паяльные пасты, припои, отмывочные жидкости и очистители), паяльное оборудование (в том числе дымоуловители ATTEN, оборудование для термозащитки проводов и микроскопы), разработанные компанией установки рентген-контроля СРК-1000 и отмывки печатных плат СМ 16PRO, мебель Viking, антистатическое оснащение.





В рамках мероприятия были рассмотрены вопросы оптимизации производственных процессов (лазерный реболлинг), инструменты повышения эффективности и снижения дефектов, собственная разработка компании «Диполь» — система управления производством К.У.П.О.Л, а также был проведен обзор оборудования SMT, доступного в условиях санкционного давления.

В программу вошло и обсуждение таких тем, как порядок проведения технологического аудита, особенности автоматизации мелкосерийных производств, борьба с контрафактом, современные мировые тенденции в производстве печатных плат.

НА ВОЛНЕ КОНВЕРГЕНЦИИ

Расширенный оптический контроль как способ улучшения гетерогенной интеграции.

*По материалам Koh Young Technology
Перевод: Артем Вахитов*



Оборудование

Конвергенция между технологиями корпусирования полупроводниковых компонентов и поверхностного монтажа произвела настоящую революцию в электронной промышленности с ее быстро меняющейся конъюнктурой. Это вызвало появление новаторского оборудования и программного обеспечения для автоматической сборки под оптическим контролем, которые играют важнейшую роль в обеспечении качества и надежности электронных устройств. Для достижения наилучших результатов важно знать и соблюдать основные требования к контролю при использовании этих передовых решений, чтобы производители могли с их помощью оптимизировать технологические процессы, сократить ошибки и в целом повысить качество продукции.

В 1975 году Гордон Мур, легендарный сооснователь корпорации Intel, провозгласил так называемый закон Мура, в соответствии с которым количество транзисторов в полупроводниковых микросхемах должно было удваиваться каждые два года. Примерно до 2020-х этот закон выполнялся неукоснительно, но лежащие в его основе производственные процессы уже выходят за пределы своих возможностей, и экономика производства начинает ломаться. Стоимость разработки полупроводникового компонента на базе 5-нм техпроцесса составляет 540 млн долларов США, что примерно в двадцать раз больше, чем при использовании 65-нм техпроцесса, и почти вдвое больше, чем по предыдущей технологической норме (7 нм). Строительство полупроводникового

производства также обойдется многократно дороже, чем для 65-нм техпроцесса: по сравнению с тем же 7-нм производством его стоимость может вырасти более чем в два раза (рис. 1). Такой рост себестоимости был бы потенциально приемлем, если бы можно было соответствующим образом повысить цену конечной продукции. Однако цены на полупроводниковые компоненты не следуют в прямой пропорции за ростом плотности транзисторов, а колеблются в зависимости от спроса и предложения. Поэтому компании не могут более полагаться на безусловное повышение плотности.

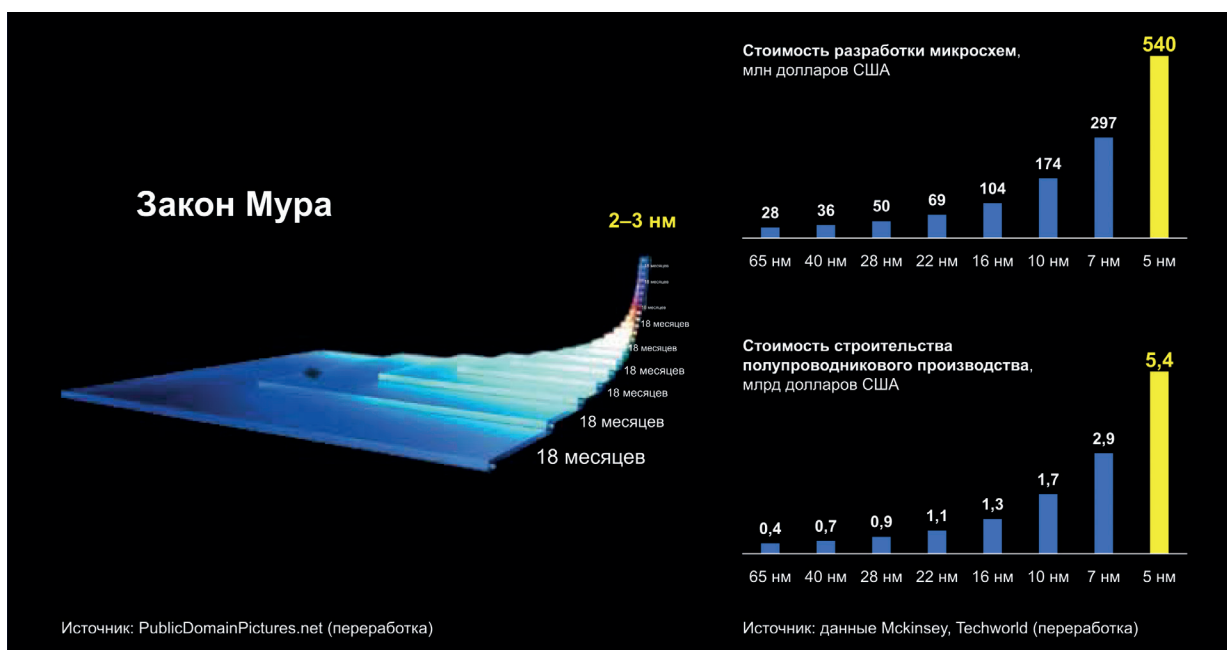
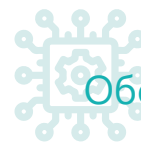


Рис. 1. Закон Мура применительно к стоимости разработки микросхем и строительства микроэлектронного производства



Технологические нормы новейших производственных процессов — 2–3 нм. Требуемая для них точность слишком высока, чтобы производить микросхемы с коммерчески жизнеспособным уровнем выхода готовой продукции (при имеющихся материалах и процессах). Кроме того, уже достигнут предел экономии от повышения плотности транзисторов. Поэтому многие компании ищут альтернативные решения проблемы. Разумеется, по-прежнему ведется разработка базовых полупроводниковых материалов, но значительное внимание сосредотачивается на технологиях корпусирования, позволяющих улучшить эксплуатационные характеристики полупроводниковых изделий, таких как EMIB (Embedded Multi-Die Interconnect Bridge — встроенный межсоединительный мост), чиплеты, FOWLP (Fan Out Wafer Level Package — корпусирование на уровне подложки), стекковый монтаж, SiP (system-in-package — система в корпусе, СвК) и т. д.

Внедрение передовых технологий корпусирования с гетерогенной интеграцией представляется неизбежным и чрезвычайно важным (рис. 2).

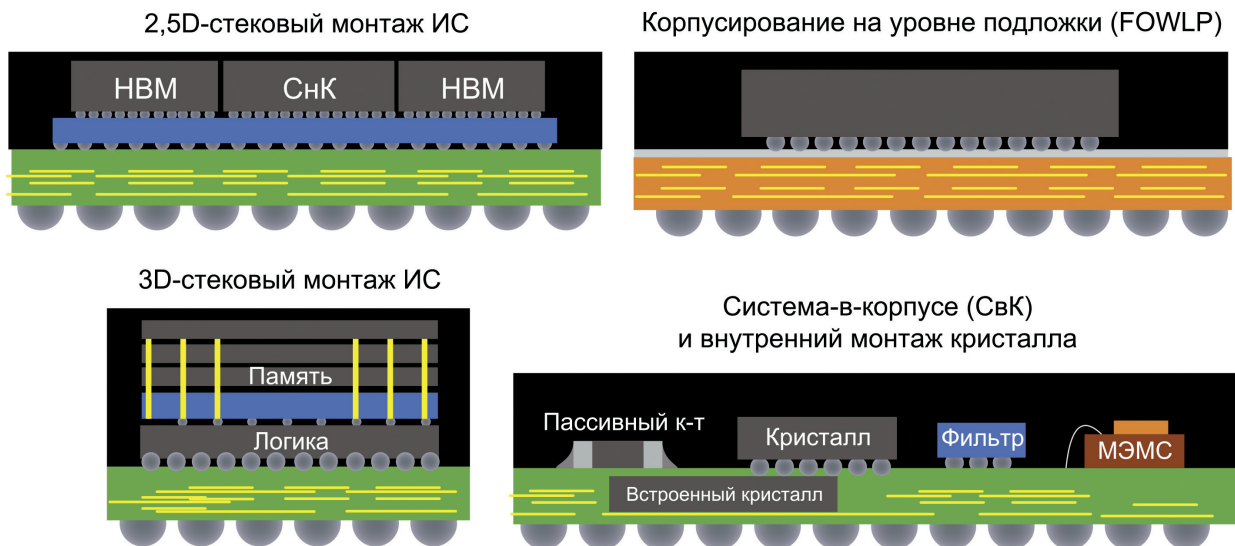


Рис. 2. Примеры технологий корпусирования, призванных улучшить характеристики технологических процессов

Эволюция технологических процессов

Исторически технологии сборки печатных плат и корпусирования развивались по-разному, но сейчас происходит крупный технологический переворот. В связи с тем, что закон Мура перестает выполняться, все больше внимания привлекают к себе альтернативные технологии корпусирования. Научно-исследовательские работы, направленные на совершенствование технологических процессов, затронули обе области, так как они нуждаются в технологиях, позволяющих уменьшить толщину элементов и повысить плотность их размещения. В области корпусирования полупроводниковых изделий предпринимаются многочисленные попытки перехода к корпусированию непосредственно на пластине, а в области сборки печатных плат возник спрос на технологии тонкого и плотного монтажа на уровне корпусного полупроводникового компонента. В зоне пересечения этих двух технологических областей сложились условия для конвергентной продукции — гетерогенных корпусных изделий (рис. 3).

Здесь приходится решать сложные задачи, например контроль всевозможных СвК, включая РЧ-модули, и кристаллов на платах-подложках (Substrate-like PCB, SLP). Кроме того (это касается технологических процессов корпусирования полупроводниковых изделий), производители массово внедряют SMT-процессы при изготовлении СвК на уровне пластины (Wafer Level SiP) и печатных плат со встроенными компонентами (Embedded PCB). Очевидно, что между двумя упомянутыми областями происходит конвергенция.

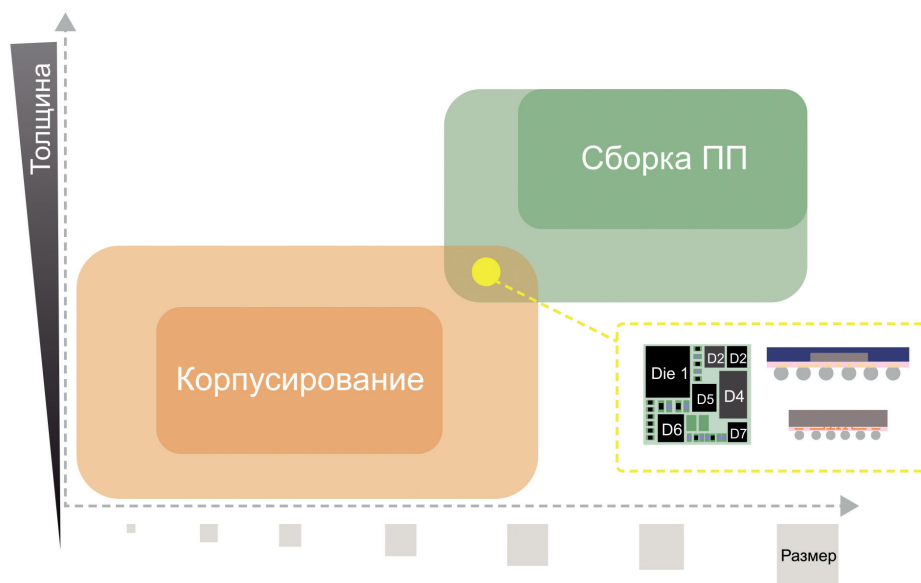


Рис. 3. Гетерогенные корпусные изделия как продукт конвергенции технологий корпусирования и сборки печатных плат



Конвергенция технологических процессов

Какие же основные требования следует рассматривать при выборе оборудования для контроля, учитывая сложившиеся тенденции? Например, если контролировать конвергентную продукцию с использованием существующих решений для контроля корпусных полупроводниковых изделий, потенциальной проблемой будут, скорее, не характеристики самой системы, а соотношение ее цены и характеристик. С другой стороны, если в тех же целях использовать оборудование для контроля поверхностного монтажа, его характеристики могут оказаться недостаточными для миниатюрных и высокоотражающих компонентов с мелким шагом монтажа, которые, как ожидается, станут тормозящим фактором в данной области применения.

Прежде чем определять, каким должно быть оптимальное решение для контроля конвергентной продукции, рассмотрим примерную последовательность этапов технологического процесса сборки корпусного изделия, начиная с изготовления полупроводниковых пластин и заканчивая сборкой печатных плат. Изготовление СвК (системы в корпусе) относится к технологическому процессу корпусирования полупроводниковых изделий, но также может рассматриваться как высокоточный поверхностный монтаж (например, SLP), учитывая, что различные компоненты изделия, включая кристалл, монтируются на плате-подложке (рис. 4). Если посмотреть на это таким образом, можно заключить, что для конвергентных (гибридных, гетерогенных) изделий границы между технологическими процессами корпусирования полупроводниковых компонентов и поверхностного монтажа размываются. Производителям нужна система контроля, которая бы закрывала потребности обеих технологий.

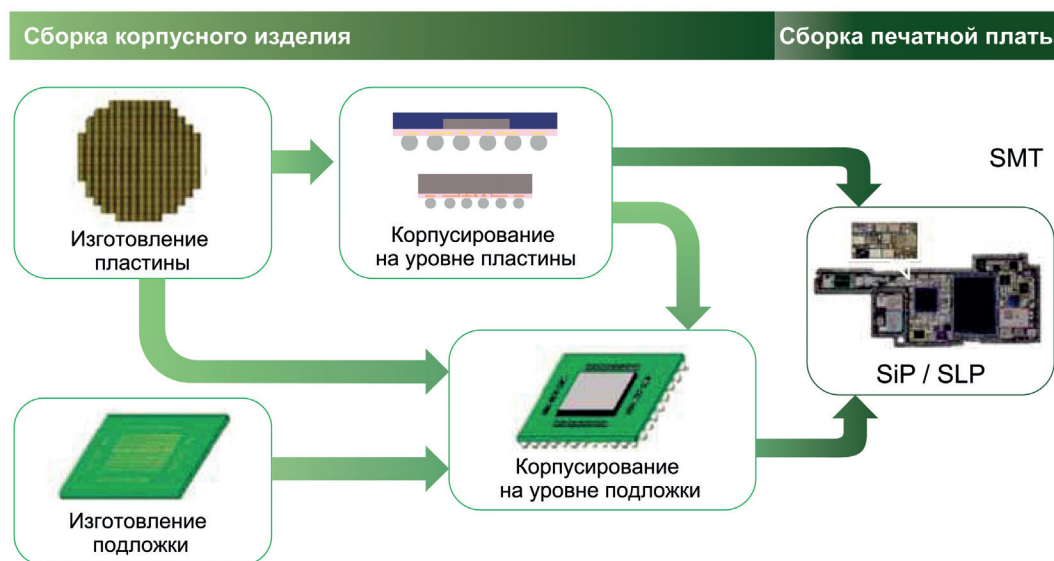


Рис. 4. Размытие границ между технологическими процессами на этапах от изготовления полупроводниковых пластин до сборки печатных плат

Рассмотрим, какие требования к контролю предъявляются в той и другой области сегодня, в эпоху конвергенции технологий, на примере компонентов BGA с перевернутым кристаллом (flip-chip BGA, FCBGA) и сложных плат, смонтированных на кристалле. Общие для обеих областей требования разделены на три категории. Первая категория — контроль кристалла и пассивных компонентов. Этим занимается система автоматизированного оптического контроля (AOI). Далее идет контроль нанесения тех или иных технологических составов, например контроль нанесения флюса и заливки компаундом области под кристаллом, смонтированным по технологии C4, или корпусом BGA. Третья и последняя категория — контроль пайки. Объектами контроля здесь могут быть бугорки припоя на стороне монтажа по технологии

C4, шариковые выводы компонента в корпусе FCBGA, FCCSP (корпус по размеру перевернутого кристалла) или WLCSP (корпус по размеру кристалла с корпусированием на уровне пластины) и паяльная паста, нанесенная методом трафаретной печати на обыкновенную печатную плату или полупроводниковую пластину. Эпоха конвергенции наступила (рис. 5).

В ответ на подобные разнообразные потребности в сфере контроля изделий компания Koh Young разработала четыре системы контроля, ориентированные на конкретные технологические процессы и области применения.

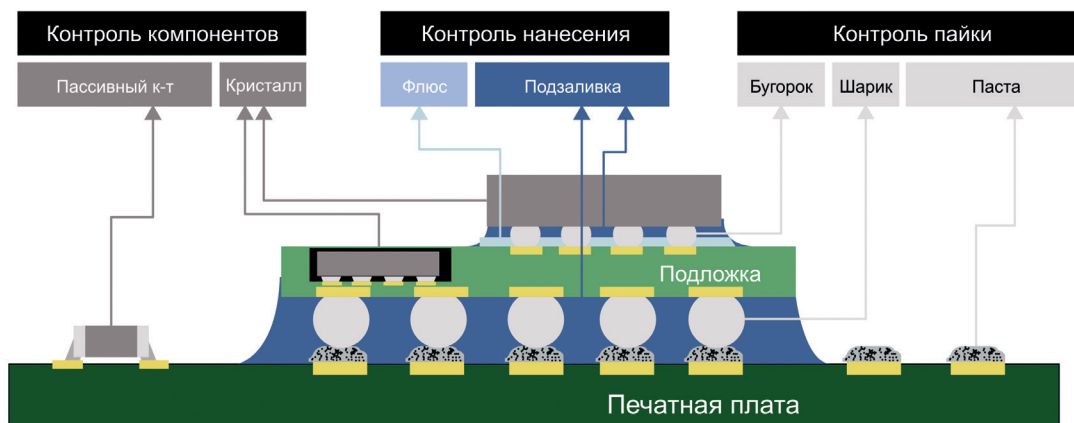


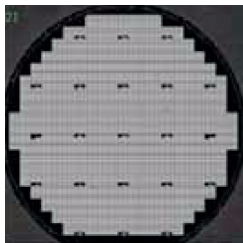
Рис. 5. Примеры конвергенции технологий со сходными требованиями к контролю



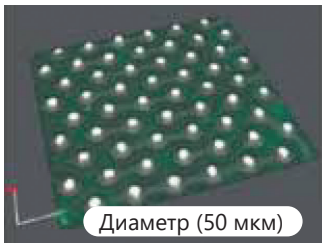
Контроль припоя и флюса

Во-первых, есть необходимость в контроле нанесенной по трафарету паяльной пасты, бугорков припоя, шариковых выводов BGA и флюса (рис. 6). Эти потребности возникают на этапах от корпусирования полупроводниковых компонентов до изготовления подложки и высокоточного поверхностного монтажа.

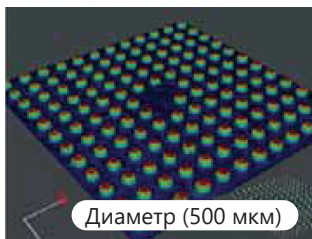
Припой на пластине



Бугорки припоя C4



Шарики припоя



Флюс

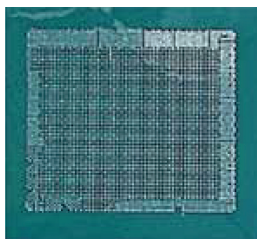


Рис. 6. Контроль припоя и флюса

Meister S (рис. 7) — высокоразвитая поточная система 3D-контроля тонких слоев паяльной пасты на микроуровне:

- высокоскоростная камера с разрешением 3,5 мкм/25 мегапикселей, пригодная для массового производства;
- контроль бугорков припоя диаметром 30 мкм с разрешением по оси Z 0,1 мкм;
- оптимизированные методы обработки изображений и передовые алгоритмы, рассчитанные на контроль до двух миллионов бугорков припоя;
- технология отслеживания Z-координат и привязка к контактным площадкам для коррекции пространственных искажений и компенсации прогиба;
- контроль прозрачного флюса с использованием фирменной оптической схемы и проприетарных алгоритмов.



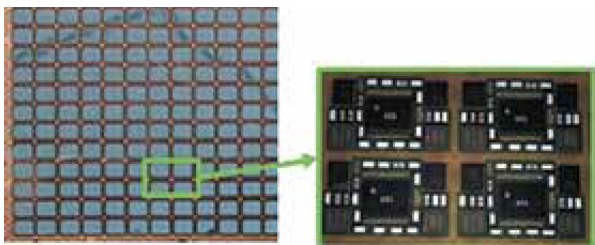
Рис. 7. Meister S

Для лучшего понимания необходимо отметить, что размеры бугорков припоя при монтаже по технологии C4 и слоев паяльной пасты на контактных площадках компонентов типа 0201M крайне малы. Поверхность бугорков сильно блестит, затрудняя получение стабильных результатов 3D-измерений. Тем не менее благодаря высокоскоростной камере с разрешением 3,5 мкм/25 мегапикселей и алгоритмам контроля на базе ИИ система Meister S способна успешно измерять геометрические параметры таких бугорков припоя и микрослоев паяльной пасты. Диаметр шариков припоя у компонентов BGA гораздо больше, чем у бугорков припоя в технологии C4, но они так же блестят, поэтому контроль с применением традиционных средств становится затруднительным. Система Koh Young Meister S обеспечивает надежное 3D-измерение таких объектов. С уменьшением размеров бугорков припоя и повышением плотности их расположения в некоторых технологических процессах формирования бугорков на стороне монтажа по технологии C4 заменяется нанесением флюса. Но и в этом случае Meister S способна помочь производителям контролировать качество нанесения флюса, чтобы обеспечить высокие показатели выхода готовой продукции и низкий уровень брака.

Контроль кристаллов и компонентов

Поговорим теперь о размещении кристаллов и компонентов (рис. 8). Здесь требуется надежный контроль компонентов типоразмера 0201M с очень мелким шагом, а также контроль кристаллов с зеркальной поверхностью. Порой необходима и возможность контролировать встроенные кристаллы, смонтированные в полостях на подложке.

Кристалл системы-в-корпусе (СвК)



Встроенный кристалл

Компонент 021M (008004 EIA)

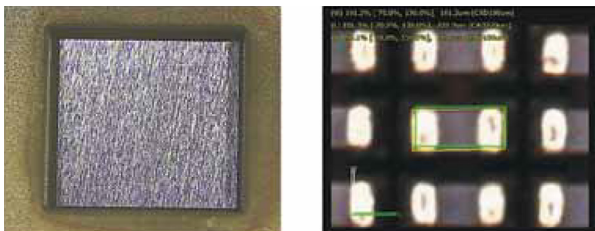


Рис. 8. Контроль кристаллов и компонентов

Системы Koh Young Meister D и Meister D+ (рис. 9) представляют собой решения для контроля компонентов поверхностного монтажа и полупроводниковых кристаллов. Серия Meister D, предназначенная для контроля плотно расположенных компонентов и кристаллов с высокой отражающей способностью, имеет следующие основные особенности:

- контроль кристаллов и компонентов малого размера (типоразмер 0201M/008004 EIA);
- превосходные характеристики контроля благодаря ИИ-алгоритмам, разработанным Koh Young Research America;
- полное 3D-измерение высоты и наклона при плотном расположении компонентов с зазором от 50 мкм;
- надежный контроль кристаллов, компонентов и светодиодных устройств.



Рис. 9. Meister D+

Рассмотрим оба процесса, обратившись вначале к контролю компонентов поверхностного монтажа. В серии Meister D реализовано несколько технологий проецирования, позволяющих решить проблему затенения и обеспечить надежное 3D-измерение. Благодаря этому можно измерять плотно расположенные компоненты с зазором от 50 мкм и компоненты, смонтированные между более высокими корпусами типа BGA — то, что способно вызывать затенение и создавать помехи применению традиционных методов контроля.

Кроме того, для системы не помеха кристаллы с высокой отражающей способностью, которые в ином случае делают 3D-контроль практически невозможным из-за трудностей с оптической триангуляцией. Для решения этой проблемы компания Koh Young разработала уникальное оптическое решение. Эта новая технология 3D-измерения помогает надежно контролировать кристаллы в 3D-режиме, даже если их поверхность почти зеркально отражает свет, и успешно справляется с контролем встроенных кристаллов, смонтированных в полостях.



Контроль заливки

После размещения кристалла некоторые производители заливают пространство под ним эпоксидным компаундом для лучшего крепления или повышения надежности BGA-соединений. В связи с этим необходимо контролировать толщину заливки, чтобы обеспечить надлежащее нанесение и отверждение компаунда. Однако 3D-измерение толщины слоя жидкого компаунда в поперечном сечении — нелегкая задача (рис. 10).

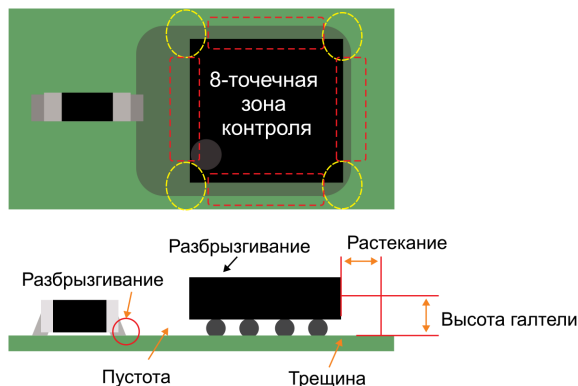
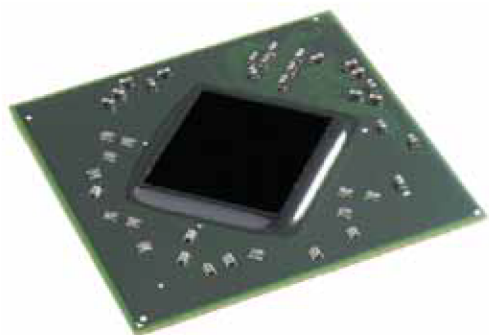
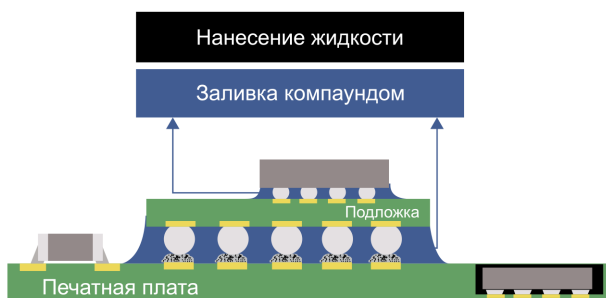


Рис. 10. Контроль заливки



Рис. 11. Meister C+

Система Koh Young Neptune C+ (рис. 11) — технологический прорыв в 3D-измерениях для контроля нанесения жидкостей. Она позволяет измерять профили толщины слоя нанесенной прозрачной жидкости, например эпоксидного компаунда и конформных покрытий. Система Neptune C+ имеет следующие основные особенности:

- истинное 3D-профилирование по всей площади со скоростью производственной линии;
- технология L.I.F.T. (лазерная интерферометрия для жидкостной томографии), обеспечивающая неразрушающий 3D-контроль для точного измерения геометрических параметров слоев жидких и отвержденных составов;
- простые, интуитивно понятные средства программирования и пользовательский интерфейс;
- точное измерение полноты покрытия, толщины и однородности с применением алгоритма машинного обучения и ИИ.

Контроль на уровне пластины

Современные электронные устройства становятся сложнее, функциональнее и совершеннее, а их компоненты при этом миниатюризируются и требуют все более плотного размещения. Корпусирование на уровне пластины (WLP) — технология, при которой кристалл корпусируется еще на том этапе, когда он находится в составе полупроводниковой пластины. WLP относят к новому поколению технологий корпусирования, она не только обеспечивает максимальный выход готовой продукции, но и снижает производственные затраты. Выявляя дефекты до разделения пластин при помощи точных методов контроля, производители могут повысить выход готовой продукции без дополнительных затрат.

Для реализации технологии WLP необходимо решение, которое позволяло бы работать с полупроводниковыми пластинами или кольцевыми держателями. Для этих целей компания Koh Young создала измерительную систему ZenStar (рис. 12), в которой сочетаются новаторские алгоритмы машинного зрения и оптика высокого разрешения для контроля бугорков, столбиков на пластинах и кристаллов с высокой отражающей способностью, а также компонентов поверхностного монтажа.

Для выполнения манипуляций с полупроводниковыми пластинами и кольцевыми держателями в чистом помещении, без прикосновений человека, систему оборудовали двухманипуляторным модулем сопряжения (Equipment Front End Module, EFEM) — стандартным средством автоматизации полупроводникового производства. Серия ZenStar имеет следующие особенности:

- проприетарная технология глубокого обучения для расширенного контроля трещин, повреждений от посторонних предметов, сколов и т. п.;
- самые широкие в отрасли возможности истинного 3D-измерения благодаря применению проприетарной технологии глубокого обучения;
- контроль бугорков на пластине диаметром от 10 мкм;
- истинное 3D-измерение высоты и наклона на кристаллах с высокой отражающей способностью;
- встроенный модуль сопряжения (EFEM) для пластин диаметром 300 мм.



Рис. 12. ZenStar



Совершенствование технологических процессов с помощью искусственного интеллекта

Путь к повышению выхода готовой продукции лежит не только через улучшение характеристик систем контроля. На службу этой цели компания Koh Young поставила программный пакет KPO (Koh Young Process Optimizer) (рис. 13). При контроле нанесения паяльной пасты (SPI) программа KPO Printer взаимодействует с устройством трафаретной печати, регулируя в реальном времени давление ракеля, скорость движения ракеля и скорость отделения трафарета для повышения качества печати. KPO Mounter анализирует, на какой контактной площадке или у какого сопла возникла проблема. Если сбой связан не с контактной площадкой или соплом, а с программной настройкой, его можно устранить коррекцией позиции монтажа. В программном пакете KPO реализована новаторская технология моделирования на базе машинного обучения, которая обеспечивает анализ данных для определения факторов, приведших к сбою, и корректировку этих факторов с применением автоматизированных механизмов обратной связи и оптимизированных настроек.

Эпоха конвергенции

В эпоху конвергенции между технологиями корпусирования полупроводниковых изделий и поверхностного монтажа важнейшую роль в обеспечении качества и надежности электронных устройств играют оборудование и программное обеспечение для автоматизированной сборки под оптическим контролем. Точный контроль кристаллов и компонентов, надежный контроль паяных соединений и бугорков или шариков припоя и мощные программные средства автоматизированного оптического контроля с применением ИИ — вот основополагающие требования, которым должно удовлетворять такое оборудование. Интеграция оборудования и программного обеспечения для автоматизированной сборки под оптическим контролем с производственными системами повышает общую эффективность, обеспечивает возможность мониторинга в реальном времени и предоставляет ценную информацию для непрерывного совершенствования.

По мере развития отрасли производителям следует внедрять новые достижения технического прогресса, в том числе ИИ, машинное обучение и аналитику больших данных для совершенствования методов контроля и оптимизации технологических процессов поверхностного монтажа, корпусирования и полупроводникового производства. Выполняя основные требования к контролю и внедряя перспективные инновации, производители смогут выпускать высококачественные устройства, отвечающие потребностям современного рынка, и оставаться в авангарде производственной отрасли.

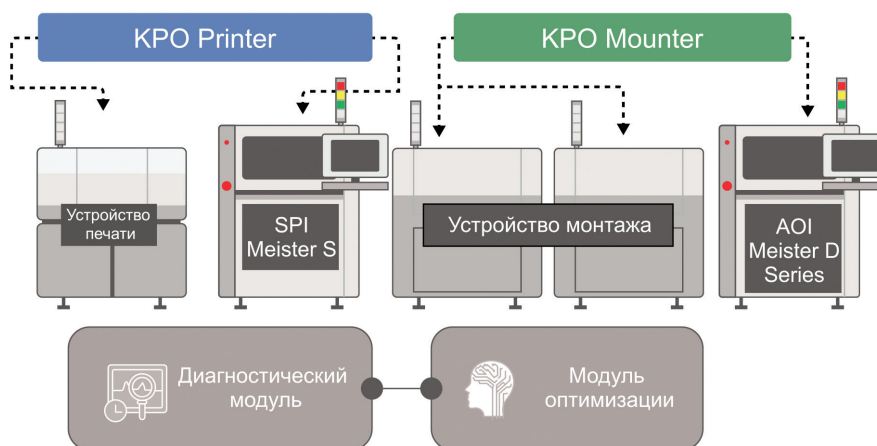


Рис. 13. Программный пакет Koh Young Process Optimizer

Комментарий специалиста



Кирилл Кремлёв,
руководитель направления
«Оборудование для
производства электроники»
kremlev@dipaul.ru

Повсеместное наличие электроники, которая насытила жизнь различными девайсами, стало привычным явлением.

Электроника доминирует во многих производственных сферах. Год от года устройства становятся эффективнее, умнее и миниатюрнее, а их количество неуклонно растёт.

При этом современная электроника по своим стандартам уже давно приблизилась к тому, что принято называть микроэлектроникой.

Например, компоненты в корпусе 01005 и микросхемы с малым шагом выводов — это уже обыденность для производителей электроники, осуществляющих SMD-монтаж.

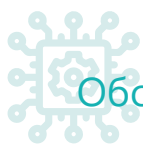
И здесь мы сталкиваемся с тем, что такие компоненты сложно разглядеть невооружённым глазом (например, размеры корпуса 01005 всего 0,2×0,4 мм).

Поверхностный монтаж (SMD-монтаж) — технология изготовления электронных изделий на печатных платах, а также связанные с ней методы конструирования печатных узлов.

И если сам процесс сборки сейчас уж налажен, то к контролю качества (тем более автоматизированному и в больших объёмах) остается много вопросов. Эти сложности требуют серьезного внимания, так как стоимость подобных изделий высока, а спектр применения разнообразен (в том числе в сферах, связанных с безопасностью человеческой жизни).

Отследить качество сборки таких изделий (неразрушающим методом) возможно или с помощью рентгена, или с помощью оптических инспекций.

Но для большинства производителей оптических инспекций малые размеры, блестящие, полупрозрачные и бликующие элементы — непосильные вводные.



К исключению из правил можно отнести компанию KohYoung — мирового лидера в производстве оптических систем для инспекции электроники. Ее специалисты тщательно проанализировали вызовы отрасли и подготовили набор современных комплексных решений для их реализации.

Результатом стали установки серии Meister и Neptune, а также новое ПО на основе ИИ.

Использование этих систем инспекции на этапах нанесения паяльной пасты, установки компонентов и герметизации (заливка на и под компонент, конформное покрытие) в автоматизированном процессе позволяют отследить наличие брака на ранних этапах, когда затраты на ремонт еще не столь высоки. Сбор и хранение данных по изделиям обеспечивают анализ производственных процессов и оперативное выявление причин отказов (в том числе в гарантийный период). 

ВХОДИТЕ В ФОРМУ

rosmould

В Москве, в МВЦ «Крокус Экспо», с 17 по 19 июня в двадцатый раз проходила Rosmould — международная выставка пресс-форм, штампов, инструмента и производственных технологий.

Это единственная специализированная выставка формообразующей оснастки в Восточной Европе проводится в России с 2006 года. Ежегодно в мероприятии принимают участие крупнейшие российские и зарубежные производители технологической оснастки (формы, пресс-формы, штампы, специальный инструмент и приспособления) для изготовления изделий, используемых в различных отраслях промышленности, а также поставщики оборудования и инженеринговые компании.



3D-TECH

by rosmould

Rosmould-2025 проходила одновременно с Международной специализированной выставкой оборудования и материалов для аддитивного производства 3D-TECH.



На экспозиционном стенде группы компаний «Диполь» специалисты Центра Аддитивных Технологий (ЦАТ) представили компетенции и возможности Центра и продемонстрировали современное промышленное оборудование, решения и разработки:

- 3D-принтер EP-M150 Pro;
- 3D-принтер Volgobot A3 PRO;
- образцы 3D-печати.

Посетители стенда имели возможность получить профессиональные консультации по особенностям различных технологий 3D-печати и сканирования, попрактиковаться в эксплуатации 3D-принтеров и сканеров, изучить функциональные образцы, напечатанные из различных материалов. 



 — Иван Боровлев

Атомное образование

Группа компаний «Диполь» включена в учебную программу Академии Росатома.



АНО ДПО «Техническая академия Росатома» разработаны и проведены учебные курсы на темы «Поверка и калибровка средств измерений электротехнических и магнитных величин», «Поверка и калибровка средств радиотехнических и радиоэлектронных измерений, средств измерений времени и частоты».



Частью учебной программы курсов стала демонстрация новинок оборудования и программного обеспечения, которую провели специалисты АО «НПФ Диполь». Слушателям была представлена продукция производителей Meatest, Sonel, ITCN, Rigol (калибраторы, магазины сопротивлений, магазины емкости, электронные нагрузки, источники питания), а также собственные разработки компании «Диполь» — калибратор МК9023А, специальное метрологическое программное обеспечение METLAB, система машинного зрения DigitMeterVision.

В ходе обсуждения проблем метрологического обеспечения и путей их решения в современных условиях эксперты «Диполь» поделились опытом применения оборудования и метрологического программного обеспечения в метрологической лаборатории компании и сервисе по ремонту средств измерений. 

На фото: Главный эксперт АНО ДПО «Техническая академия Росатома» **Александр Карпенко** и руководитель направления «Метрологическое оборудование» (ГК «Диполь») **Константин Бондин**

 — Антон Беляков

IEC 61340-2-1

IEC 61340-2-2

IEC 61340-2-3

Новый IEC 61340-2-4

**ВЗГЛЯД
на антистатические
материалы**

Система международных стандартов по антистатической защите электронных устройств пополнилась новым документом.

Участники технического комитета Международной электротехнической комиссии ТК101 «Электростатика» одобрили регламент испытаний для неметаллов, применяемых при работе с чувствительными к электростатическим разрядам компонентами.

Стандарт, получивший шифр **IEC TS 61340-2-4**, войдет в подгруппу документов серии **IEC 61340-2**, которые содержат технические требования и перечень методов испытаний антистатических свойств материалов, используемых при подготовке рабочих мест. Порядок применения и требования к таким материалам играют важнейшую роль при организации производства и работы с чувствительными компонентами.

Еще недавно в данный перечень входили только три стандарта:

- ✦ **IEC 61340-2-1** — требования к методам оценки способности материалов и изделий рассеивать электростатические заряды;
- ✦ **IEC 61340-2-2** — требования к методам оценки способности материалов накапливать электростатические заряды;
- ✦ **IEC 61340-2-3** — методы определения сопротивления и удельного сопротивления твердых материалов, используемых для предотвращения накопления электростатического заряда.

Эти стандарты позволяют заменить изолирующие полимеры и проводящие металлические поверхности на производственных участках статическими рассеивающими материалами, что сводит к минимуму риск повреждения от ЭСР. Для применения предпочтительны также слабо заряжающиеся материалы.

Новый документ описывает дополнительные методы определения динамических параметров электростатического разряда для неметаллических материалов, где распределение проводящих наполнителей может существенно влиять на проводимость при электростатическом разряде. Такие эффекты не обнаруживаются при измерении сопротивления постоянному току, поэтому в случаях, когда возникает проблема с характеристиками или формой волны электростатического тока, рекомендуется определять характеристики материала с использованием как постоянного тока, так и динамических методов испытаний.

Анализ необходимости разработки идентичного стандарта в Российской Федерации будет выполнен после публикации стандарта в МЭК и его рассмотрения экспертами и участниками национального технического комитета ТК072 «Электростатика».

Справка:

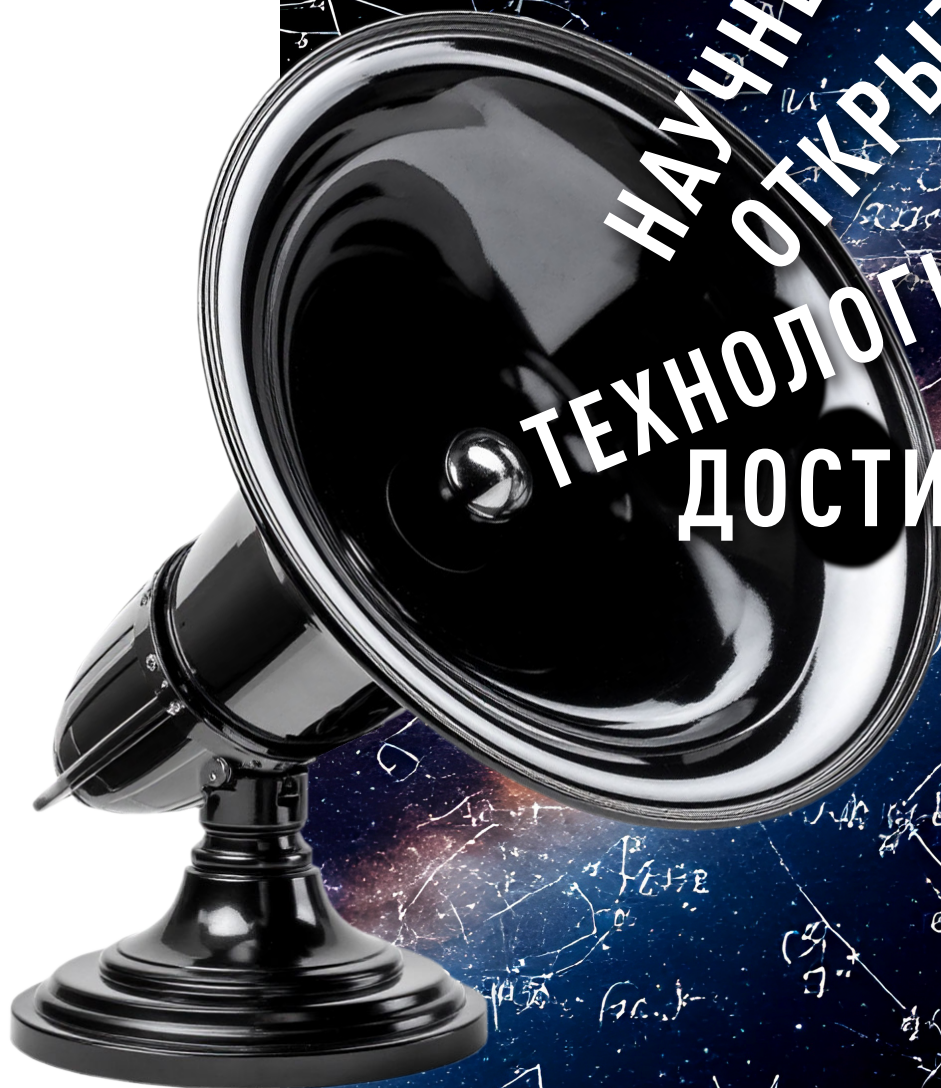
Разработкой международных стандартов в области электростатики занимается технический комитет МЭК 101 *Electrostatics*. В этой деятельности Россию представляют эксперты национального технического комитета по стандартизации ТК 072 «Электростатика», функционирующего на базе предприятий, входящих в ГК «Диполь».

Комитет является формой сотрудничества заинтересованных организаций и органов власти при проведении работ по национальной, межгосударственной и международной стандартизации в сфере электростатики.

В настоящее время основная цель деятельности ТК 072 в России — развитие и внедрение современных требований по антистатической защите для поддержания на высоком уровне качества выпускаемой и продаваемой продукции ЭКБ.

Ознакомиться с деятельностью технического комитета и перечнем стандартов можно на сайте antistatika.ru. 





НОВОСТИ НАУЧНЫХ ОТКРЫТИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДОСТИЖЕНИЙ

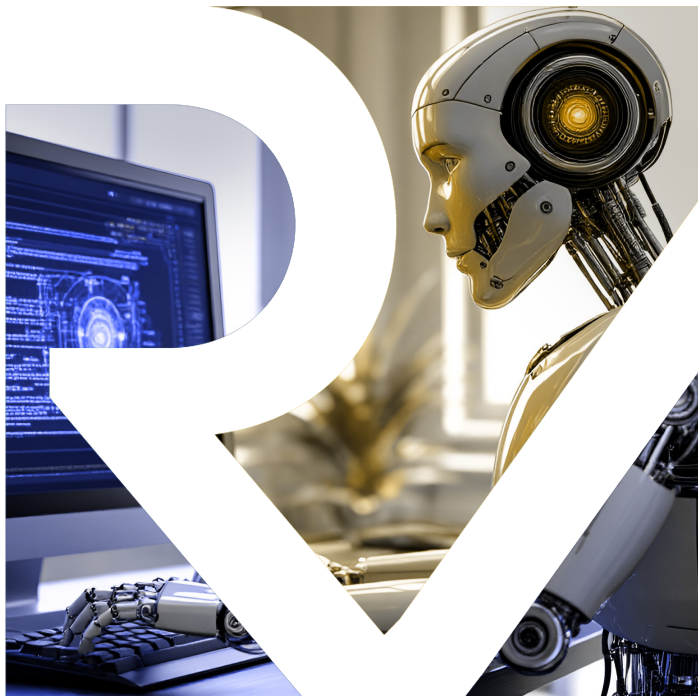
Наперегонки со временем

300 минут — столько времени понадобилось китайским пользователям технологий искусственного интеллекта для разработки нового компьютерного процессора на архитектуре RISC-V.

Этот результат демонстрирует огромный потенциал ИИ в разработке и совершенствовании технологий. Обычно создание процессоров требует значительных временных затрат даже при участии серьезных экспертов. Но искусственный

интеллект способен анализировать большие объемы данных, принимать решения и генерировать новые идеи, что делает его незаменимым инструментом в разработке и в разы ускоряет задачу.

Архитектура RISC-V становится все более популярной благодаря своей открытости и бесплатности, что позволяет разработчикам создавать собственные процессоры. Это открытие имеет большое значение для индустрии, так как увеличивает конкуренцию и стимулирует инновации. Специалисты получают возможность экспериментировать и создавать новые процессоры, что способствует разработке более эффективных и мощных устройств.



Справка:

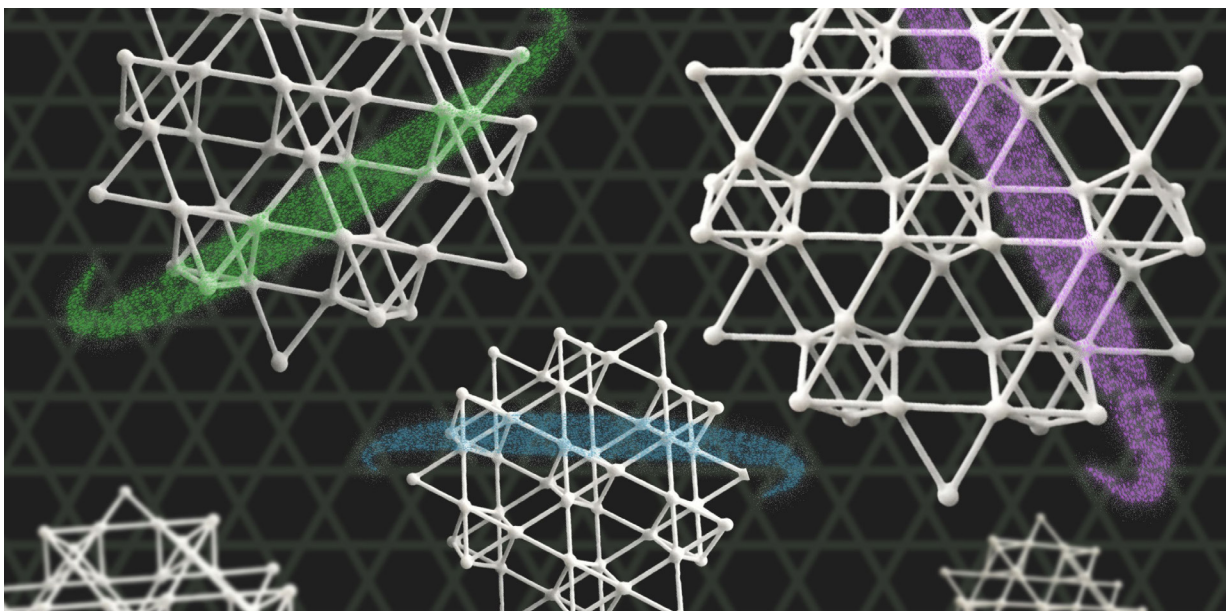
Архитектура RISC-V (Reduced Instruction Set Computing Version 5) — это архитектура набора команд (ISA), которая была разработана в 2010 году в Калифорнийском университете в Беркли. Она отличается простотой и гибкостью, что делает ее привлекательной для разработчиков процессоров. RISC-V поддерживает широкий спектр устройств, от микроконтроллеров до высокопроизводительных серверов. Благодаря

своей открытости архитектура RISC-V позволяет разработчикам создавать процессоры без необходимости лицензирования, таким образом снижая затраты и ускоряя процесс разработки. Это делает ее особенно популярной в академических кругах и среди стартапов, стремящихся к инновациям в области полупроводников.



И его посчитали

Международная исследовательская группа впервые преуспела в измерении спина электрона в материи, то есть искривления пространства, в котором живут и движутся электроны, в «металле кагомэ» — новом классе квантовых материалов.



Полученные результаты, опубликованные в журнале NaturePhysics, могут произвести революцию в способах изучения квантовых материалов в будущем, открыв дверь для новых разработок в области квантовых технологий с возможным применением в различных технологических областях, от возобновляемых источников энергии до биомедицины и создания квантовых компьютеров. Благодаря передовым экспериментальным методам, используя свет, генерируемый ускорителем частиц, синхротроном, и с помощью современных методов моделирования поведения материи ученые смогли впервые измерить вращение электрона.

На поведение электронов в материалах влияют определенные квантовые свойства, определяющие их вращение в материи, в которой они находятся. Хотя эта характеристика электронов известна уже много лет, до сих пор никому не удавалось непосредственно измерить спин электрона. Чтобы добиться этого, исследователи использовали особый эффект, известный как «круговой дихроизм» — это особая экспериментальная техника, применимая только по отношению к синхротронным источникам, которая использует способность материалов поглощать свет по-разному в зависимости от их поляризации.

В исследовании ученые особенно сосредоточились на «металлах кагомэ», классе квантовых материалов, обязанном своим названием их сходству с переплетением бамбуковых нитей, из которых состоит традиционная японская корзина (которая и называется «кагомэ»). Эти материалы произвели революцию в квантовой физике, и полученные результаты позволят узнать больше об их особых магнитных, топологических и сверхпроводящих свойствах.

Сделают в России

Ученые Соликамского магниевого завода (СМЗ), входящего в состав «Росатома», совершили прорыв в химической отрасли. Впервые на территории РФ началось производство метаниобата лития в промышленном масштабе. Основной потребитель такой продукции — сфера радиоэлектроники.

Литий — третий элемент таблицы Менделеева и самый легкий щелочной металл из существующих. Обладает наименьшей механической прочностью. При комнатной температуре его можно разрезать ножом. В чистом виде практически не встречается.

За последние 10 лет литий стал ключевым элементом в радиоэлектронике, металлургии и атомной энергетике. Лидером рынка являются литий-ионные аккумуляторы, внедряемые в электрокары. Например, для производства одной Tesla требуется 12 кг лития.

Объем российских литиевых месторождений залежей оценивается в 1 млн тонн. Многие из них до сих пор находятся лишь в стадии разработки, поэтому металл экспортируется из Китая и Южной Америки.

Ранее метаниобат лития никогда не производился в стране и был исключительно импортным продуктом. Сотрудники отдела перспективных направлений СМЗ создали технологию получения прессованного и закаленного метаниобата лития и метатанталата лития в форме таблеток. Их масса и объем выверены до идеальных пропорций.

В связи с этим разработка российских ученых и выход в масштабное производство метаниобата лития позволит стране не зависеть от импорта при выращивании ключевых компонентов при производстве полупроводников, чипов и литий-ионных аккумуляторов. Помимо этого, данные кристаллы будут использоваться в лазерных, электрооптических, пьезоэлектрических и других устройствах.





ДИПОЛЬ