

ДЕКАБРЬ | 2018 | № 4 (20)

# ЭКСПЕРТ+

ЗНАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ



## Доверяй, но проводимость проверь

Контроль типа проводимости кремниевых слитков и пластин

## Думы о шуме

Оптимизация измерений коэффициента шума на пластине

## Один — даже если очень важный...

Управление несколькими вибростендами для испытаний объектов большого размера





 ДИПОЛЬ



# От редакции



Константин Кабанов,  
директор Корпоративного  
учебного центра

**Возможность общения в едином информационном поле, схожие точки зрения по техническим вопросам позволяют быстрее достигнуть общего мнения и взаимовыгодных договоренностей**



Завершается 2018 год. Он был сложным, но интересным. В очередной раз многие из нас столкнулись с профессиональными вызовами и, преодолевая их, неизбежно получили новый опыт, полезную информацию.

Поддерживая профессиональный рост специалистов отрасли, компания «Диполь» сохраняет устойчивую позицию поставщика знаний. И в исполнении этой миссии мы опираемся на наши многочисленные проекты: обучающие мероприятия, практические семинары, показательные выступления на выставках, сотрудничество с учебными заведениями, выпуск научно-технического журнала «Эксперт +».

Индивидуальный подход, разнообразие тем, привлечение ведущих экспертов давно стали нашим конкурентным преимуществом и залогом как совершенствования профессиональной компетенции собственных сотрудников, так

и успеха образовательных программ для представителей заказчиков. Возможность общения в едином информационном поле, схожие точки зрения по техническим вопросам позволяют быстрее достигнуть общего мнения и взаимовыгодных договоренностей. При этом мы всегда считали, что обучение — одна из составляющих наших комплексных услуг, и потому такая деятельность не только наше право, но и обязанность.

За прошедший год в Омске, Уфе, Минске, Перми, Казани, Новосибирске, Екатеринбурге и многих других городах, не считая Санкт-Петербурга и Москвы, прошли десятки семинаров и конференций, организованных и проведенных компанией «Диполь». Их участниками стали более 1500 специалистов отрасли.

Я хочу поблагодарить всех за совместный труд в уходящем году и пожелать очередных достижений в году наступающем.

До новых встреч!



# Содержание



## 4. Оборудование

Доверяй, но проводимость  
проверяй

## 8. Новость

Эксклюзивные  
отношения

## 12.

### Рынок

3D - измерения

## 20.

### Технологии

Думы о шуме

## 42.

### Событие

Через прения к звездам?

## 54.

### Технологии

А теперь для протокола

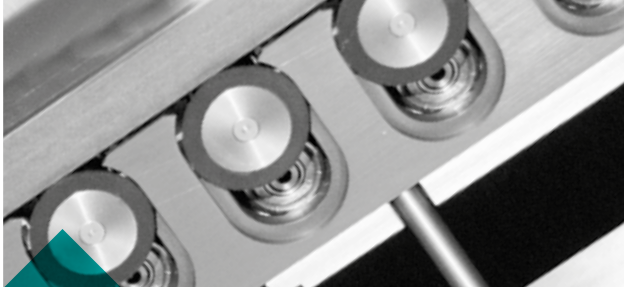
## 64.

### Оборудование

Подключение к мощности







Научно-технический журнал «Эксперт+» является корпоративным информационным изданием компании «Диполь». Журнал посвящен инновационным решениям для разработки, производства и испытаний электронной техники.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 — 58957 от 05 августа 2014 года.

Учредитель ЗАО «Диполь Технологии». Периодичность выхода — 4 раза в год. Тираж 2500 экз.

Распространяется бесплатно.

Подписка на журнал осуществляется запросом в произвольной форме на электронный адрес: [expert@dipaul.ru](mailto:expert@dipaul.ru)

Редакционный совет:  
Алексей СМЫШЛЯЕВ  
Константин КАБАНОВ  
Главный редактор:  
Алексей СМЫШЛЯЕВ  
Дизайн и верстка:  
Борис ГУБАРЕВ

Компания «Диполь»  
Санкт-Петербург  
(812) 702 12 66  
Москва  
(495) 645 20 02  
Нижний Новгород  
(831) 464 97 27  
Екатеринбург  
(343) 227 12 66  
Казань  
(843) 208 59 99  
Прага  
+420 2 5573 9633

[expert@dipaul.ru](mailto:expert@dipaul.ru)  
[www.dipaul.ru](http://www.dipaul.ru)



# 70.

## Оборудование

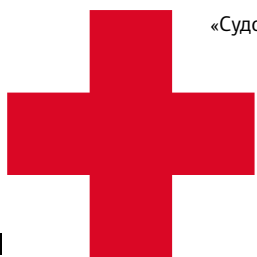
Один — даже если очень важный



# 90.

## Новость

«Судометрика-2018»



# 94.

## Образование

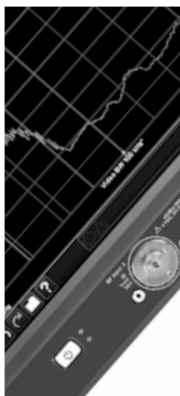
Не по-детски



# 106.

## Новость

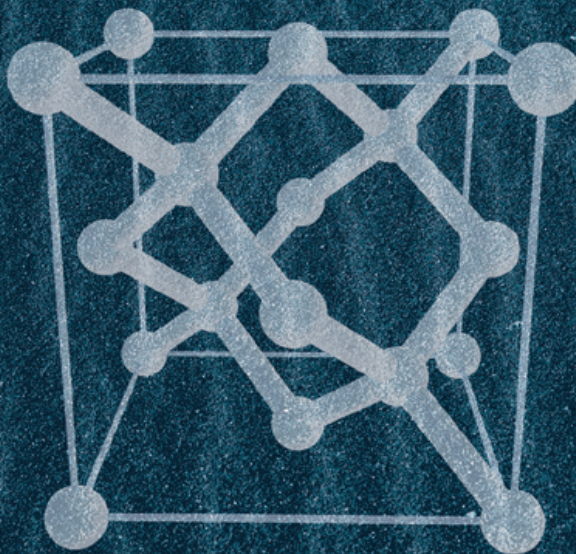
Физтеху — успехов



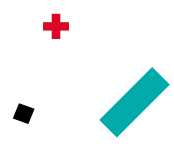


# Доверяй, но проводимость проверяй

Контроль типа проводимости  
кремниевых слитков и пластин







Илья Новожилов,  
руководитель проектов направления  
«Микроэлектроника»  
nia@dipaul.ru

Электрофизические свойства электронных изделий во многом зависят от свойств материала (Si, GaAs, GaN, SiC и т. д.), который используется для их создания, и определяют область применения — будь то бытовая электроника или изделия специального назначения. Кремний, как наиболее распространенный материал в микроэлектронике, характеризуется кристаллической структурой, кристаллографической ориентацией, удельным сопротивлением и типом проводимости. Также, в зависимости от проектных норм, могут предъявляться разные требования к количеству объемных микродефектов (например, для технологии 0,35 мкм не более 5000 дефектов/см<sup>2</sup>, а для технологии 0,13 мкм не более 100 дефектов/см<sup>2</sup>) и содержанию кислорода (измеряется в ppm). В статье рассмотрены способы контроля типа проводимости кремниевых слитков и пластины.



При производстве интегральных схем, солнечных панелей или в лабораторной практике необходимо средство для быстрого определения типа проводимости моно- (mono-Si) или поликристаллического (poly-Si) слитка кремния или пластины. Контроль проводимости необходим для четкого понимания свойств материала, который станет основой будущих электронных изделий, а также для качественного контроля технологической операции выращивания слитка кремния с нужной электронной или дырочной проводимостью. Сегодня самым распространенным для выполнения данной задачи является метод термозонда (горячего зонда), основанный на измерении милливольтметром полярности термоэлектродвижущей

силы (термо-ЭДС) на нагретом участке полупроводника. При измерениях для полупроводника p-типа стрелка милливольтметра отклоняется в сторону положительных значений, а для полупроводника n-типа — в сторону отрицательных значений. Наряду с простотой измерений метод горячего зонда обладает рядом существенных недостатков: механический контакт металлического зонда с рабочей поверхностью слитка/пластины, необходимость нагрева исследуемого образца, ложность измерений при температуре нагрева, близкой к собственной проводимости (концентрация электронов равна концентрации дырок) полупроводника.





Преимущественно для бесконтактного определения типа проводимости кремниевых mono/poly-слитков и пластин, а также пластин с тонкой оксидной пленкой был разработан метод поверхностного фотонапряжения (SPV — Surface Photovoltage). Физические основы метода схожи с термозондом, так как и здесь определяется полярность, но уже SPV-сигнала. Поверхностное фотонапряжение возникает в приповерхностной области полупроводника (на глубине ~3 мкм) за счет светового излучения, которое в большой концентрации генерирует в материале электронно-дырочные пары.



Рис. 1. Пример прибора с горячим зондом для определения типа проводимости

На практике для определения типа проводимости кремния метод SPV реализован в приборе PN-100, внешне напоминающем лазерную указку, на конце которой имеется высокочувствительный зонд. При нажатии на кнопку on/off на корпусе прибора PN-100 зонд анализирует поверхностный потенциальный барьер, периодически изменяющийся под воздействием света (используется светодиод с длиной волны 625 нм). Под воздействием светового излучения образец находится вблизи потенциала плоских энергетических зон. При отсутствии светового излучения образец имеет поверхностный потенциальный

барьер больше, чем под воздействием светового излучения. Сигнал определяет разницу между значениями поверхностного потенциала, измеренными во время светового воздействия, и значениями поверхностного потенциала без воздействия света. Положительный сигнал соответствует р-типу (загорается индикатор красного цвета); отрицательный — п-типу проводимости (загорается индикатор зеленого цвета). Для работы прибора PN-100 требуется обычная батарейка AAA. Контроль типа проводимости пластин может осуществляться даже через прозрачный транспортный

бюкс. Первые поставки в Россию этого современного прибора, разработанного компанией Semilab (Венгрия), уже осуществляет компания «Диполь», и PN-100 находит активное применение на кристалльном производстве отечественных компаний. Первым обладателем этого прибора в нашей стране в 2018 году стало предприятие АО «Протон» (г. Орел). Специалисты АО «Протон» по достоинству оценили возможности, простоту и удобство применения PN-100 для участка входного контроля пластин. Хочется отметить, что прибор не требует поверки и метрологической аттестации, и его можно отнести к классу индикаторов.



Рис. 2. Прибор PN-100 для бесконтактного определения типа проводимости кремниевых слитков и пластин

Большинство российских предприятий приобретает кремниевые пластины у отечественных или зарубежных компаний, полагаясь на 100%-ное соответствие параметров пластин требуемой спецификации, влияющей на дальнейшее создание функциональной части. Но бывают случаи, когда поставщик пластин по производственной ошибке или ввиду отсутствия надлежащего контроля качества путает тип проводимости конечной продукции. В итоге у конечного пользователя могут возникнуть дополнительные финансовые

и временные затраты из-за той самой несоответствующей спецификации партии пластин, вызвавшей создание заведомо непригодной схемы (например, когда n-канальный транзистор, который должен быть сформирован на подложке p-типа, выполняется на n-типе). Наличие прибора PN-100 на предприятии, выпускающем интегральные схемы (ИС) на кремнии, позволяет выявить данную ошибку на ранней стадии, избежав многомиллионных потерь.



# ЭКСКЛЮЗИВНЫЕ ОТНОШЕНИЯ

INVOICE

Date  
Invoice No. xx/xx/xx  
Customer ID 0000001  
223

Quantity	Amount
	248.53
	855.75
	594.67
	492.74
	356.40
	400.00
	68.00



Компании «Диполь» и Smart Equipment Technology (SET) подписали эксклюзивное соглашение о сотрудничестве. В рамках договоренностей «Диполь» будет осуществлять на территории России поставку, пусконаладку и сервисное обслуживание оборудования семейства Ассрга для прецизионного flip-chip-монтажа компонентов.

	2,568,790
	976,819
	869,870
	121,000
	421,045
	179,984
	690,144
erica	279,991
A01	98,420
A02	244,353
B01	75,380
B02	846,579
	237,689
	563,980
	45,000
	461,771
	182,790
Australia	278,981
Product A01	
Product B01	4,567,284
Total	

5	2016	%C
312	108,287	-
918	91,938	+
939	125,819	+
9,128	278,161	+7
0,283	11,827	+1



Компания SET, основанная во Франции в 1975 году, поставила первый flip-chip-установщик компонентов по заказу компании CEA-LETI в 1981 году. Сегодня SET — это мировой лидер в сегменте оборудования для прецизионного flip-chip-монтажа. Компания располагает производственной базой общей площадью более 2500м<sup>2</sup> и предлагает полную линейку самого точного в своем классе оборудования.



Рис. 1. AccuraM



Рис. 2. Accura100

Семейство машин Accura производства компании SET включает компактные и высокоточные машины для НИОКР и мелкосерийного производства в областях:


- микросборка (ВЧ-микросборка, 3D-гетерогенная интеграция кристаллов, МЭМС, НЭМС);
- оптоэлектроника (лазерные диоды, микро-LED-дисплеи, оптоволокно и др.);
- датчики изображений (в диапазонах ИК, УФ, X-ray и др.);
- квантовые компьютеры и другие передовые разработки.



Рис. 3. AccuraOpto

Важнейшим преимуществом оборудования SET является гарантированная точность монтажа: до  $\pm 0,1$  мкм (точность совмещения — align accuracy), до  $\pm 0,5$  мкм (точность после посадки и срачивания — post-bond accuracy). Следует отметить, что установки SET также подходят для точного монтажа кристалла на подложку рабочей стороной вверх (face-up die bonding).

Подробнее ознакомиться с оборудованием семейства Accura можно в специальном разделе каталога компании «Диполь»: [https://www.dipaul.ru/catalog/flip\\_chip/](https://www.dipaul.ru/catalog/flip_chip/).



# ИНЖИНИРИНГ

**Компания «Диполь» создает и реализует высокотехнологичные проекты для различных отраслей промышленности, выполняя весь комплекс работ по созданию современного производства «под ключ».**

Многофункциональные компактные испытательные системы серии NSG 4070B-X для тестирования устойчивости к кондуктивным и излучаемым электромагнитным помехам.

В рамках этой деятельности осуществляется:

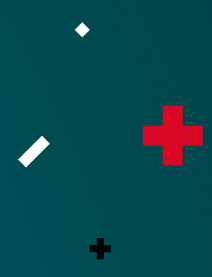
- ✔ проектирование объекта строительства, включая технологические и инженерные решения;
- ✔ строительство чистых производственных помещений и инженерной инфраструктуры любой степени сложности;
- ✔ комплексное строительство новых и реконструкция существующих промышленных предприятий;
- ✔ модернизация и переоснащение предприятий для соответствия актуальным технологическим требованиям;
- ✔ ввод в промышленную эксплуатацию предприятий.




# 3D-ИЗМЕРЕНИЯ

Секреты трехмерного бизнеса: реальный объем рынка 3D-принтеров может оказаться выше предполагаемого






Объем рынка 3D-принтеров в России в 2017 году составлял 2 млрд рублей. Эксперты уверены: реальные цифры гораздо больше, ведь значительная часть контрактов — секретные.



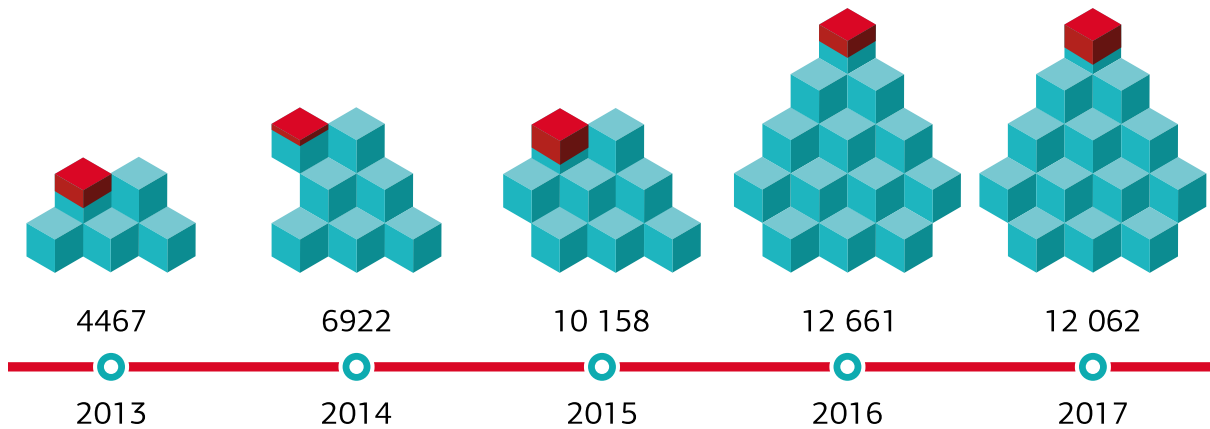
На российский рынок 3D-принтеры массово вышли примерно 4 года назад. Сейчас большая доля (70–80%) приходится на настольные устройства: простые и, как правило, недорогие, они рассчитаны на домашнее использование. Такие принтеры также закупаются и в образовательные учреждения. С помощью них школьников и студентов учат новым технологиям. Оставшуюся долю рынка — 30% — занимают профессиональные машины для создания сложных объектов, макетов или мастер-моделей — прототипов для дальнейшего крупносерийного производства. Такие принтеры стоят гораздо дороже настольных, и в денежном выражении их сегмент куда более весом. По словам Дмитрия Синьгаева, специалиста по аддитивным технологиям компании «Диполь» (дистрибьютор 3D-принтеров), минимальная стоимость заказа промышленного принтера составляет 1 млн рублей; максимальная исчисляется в сотнях миллионов.

Применение аддитивных технологий возможно в любой сфере промышленности, однако чаще всего в России за 3D-печатью обращаются ювелирные предприятия, стоматологические клиники и медучреждения, а также предприятия ВПК. Так, в мае АО «Обуховский завод» заявило о разработке собственного 3D-принтера для изготовления орудий. Как отмечают и поставщики, и заказчики 3D-принтеров, трехмерная печать удешевляет и ускоряет производство в 3–5 и более раз.





**Объем рынка настольных 3D-принтеров в России, шт.**

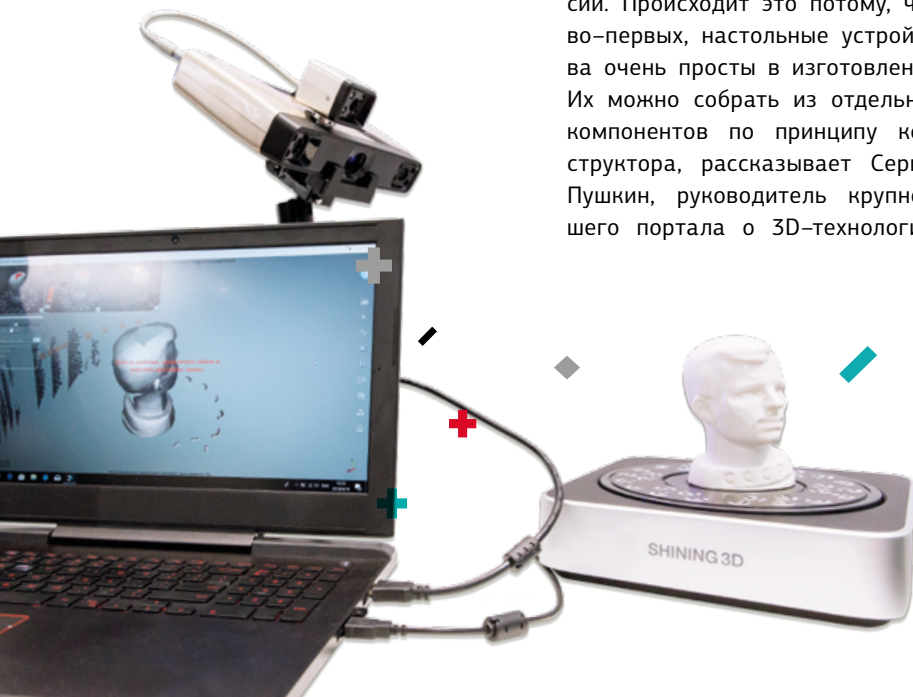


**Без конкретики**

Направление 3D в России быстрорастущее, в промышленности аддитивные технологии применяются недавно, поэтому и полноценной аналитики по российскому рынку практически не существует, рассказывает Дмитрий Синьгаев. На долю российского рынка 3D-продукции приходится не более 1,5% от общемирового объ-

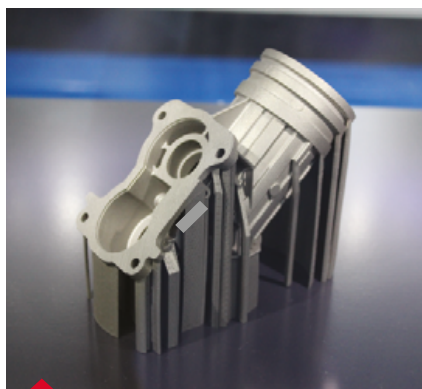
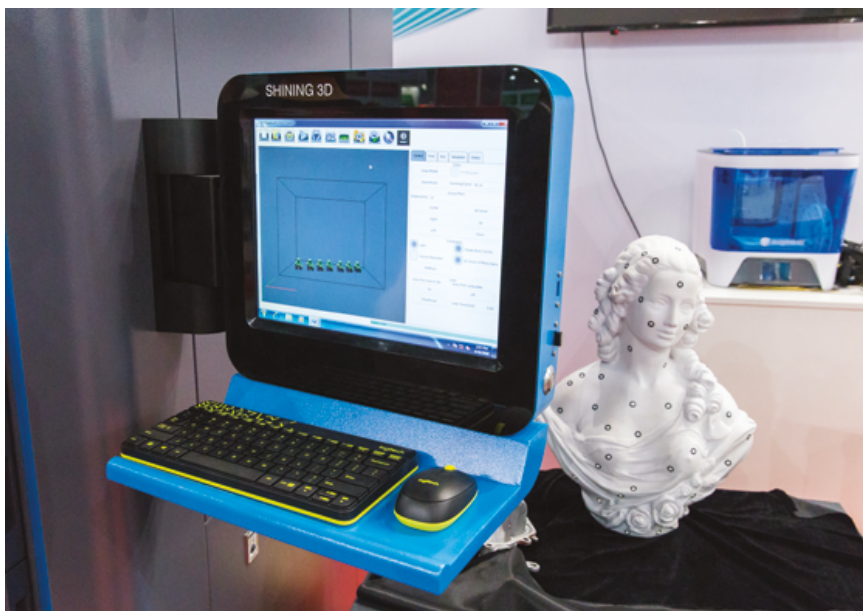
ема. Но конкретные цифры привести практически невозможно, поскольку нельзя отследить все закупки 3D-принтеров в России. Происходит это потому, что, во-первых, настольные устройства очень просты в изготовлении. Их можно собрать из отдельных компонентов по принципу конструктора, рассказывает Сергей Пушкин, руководитель крупнейшего портала о 3D-технологиях

3DToday. Поэтому часть принтеров изготавливается буквально «на дому», а другая часть закупается через интернет-площадки вроде Aliexpress. А во-вторых, невозможность точных подсчетов рынка 3D-устройств объясняется закрытостью информации — большая доля покупателей (среди которых предприятия ВПК и авиапрома) не разглашает цифры, скрывая их под грифом секретности.



## Законом не предусмотрено

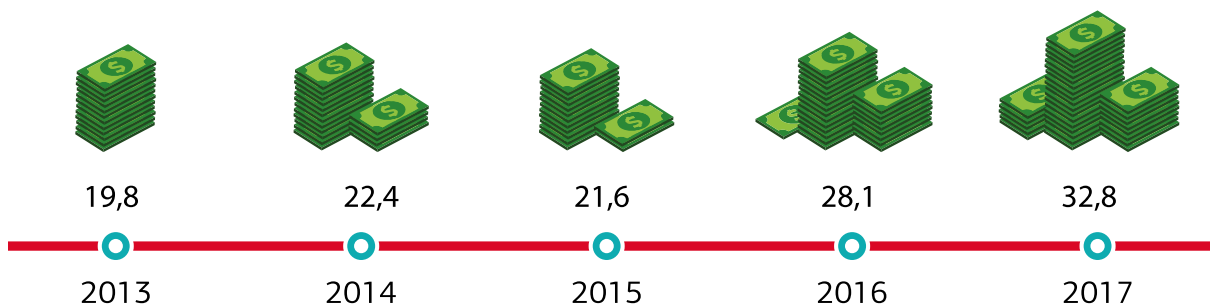
Применение аддитивных технологий в отечественной промышленности могло бы увеличиться в разы, если бы не отсутствие законодательной базы для продажи 3D-товаров. Иными словами, сертификация на напечатанные изделия в стране пока не разработана.



«На данный момент работа по техрегламентам для аддитивных технологий, можно сказать, только начинается», — комментирует ситуацию Сергей Пушкин. С этой целью в 2015 году по приказу Росстандарта был сформирован технический комитет № 182 «Аддитивные технологии», однако никаких результатов его работа пока не дала. А это значит, что на сегодняшний день многие предприятия не могут использовать изготовленные с помощью трехмерной печати изделия.



## Объем рынка 3D-принтеров в России, \$ млн

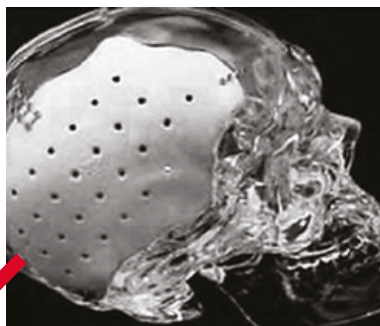


Тем не менее в некоторых медицинских клиниках 3D-технологии регулярно применяются для печати имплантов. По факту деятельность никак не регламентируется законом,



Пример 3D-печати.  
Образец нейса для эндопротезирования

а некоторые эксперты и вовсе называют ее незаконной. Но аддитивные технологии позволяют быстро, в течение нескольких часов, изготовить имплант для срочной операции.

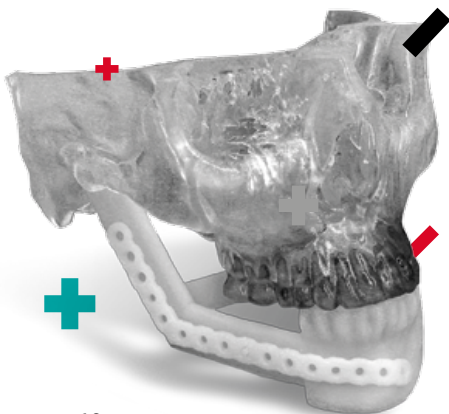


Пример 3D-печати из полимерного материала.  
Вставка в череп

Поэтому введение сертификации могло бы сильно помочь отечественной хирургии и снизить смертность. Эксперты полагают, что процесс займет еще 3–7 лет.

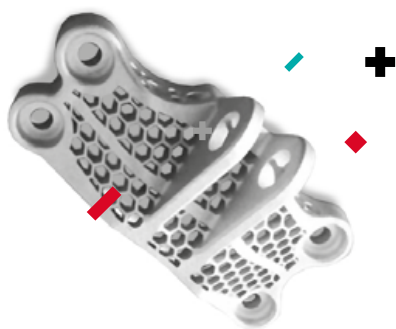


Пример 3D-печати.  
Имплантат из отечественного титана BT6



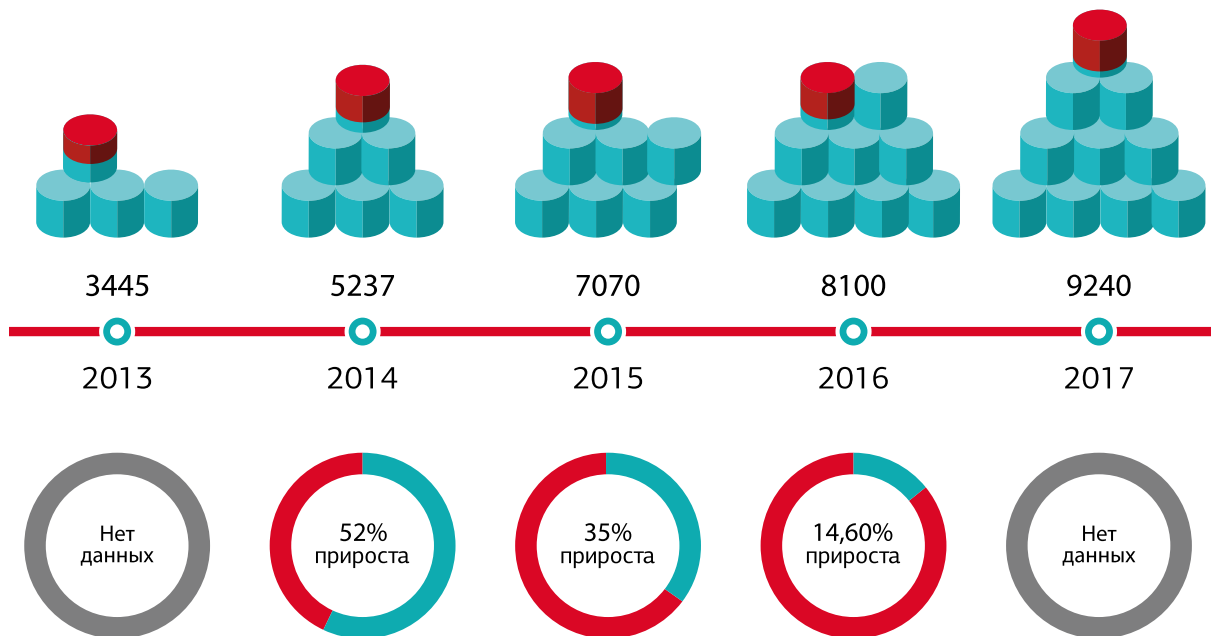
## Перспективы

После введения национальных стандартов на 3D-продукцию скачок в спросе на промышленные принтеры составит сотни процентов, считают в компании «Диполь». С технической же точки зрения никакой революции в аддитивных технологиях сейчас не происходит.



Развитие отрасли перешло в режим постепенного удешевления техники и расходных материалов для 3D-принтеров. Кроме того, осваиваются новые направления трехмерной печати: керамика, бетон и даже печать одежды.

## Объем производства настольных 3D-принтеров в России, шт.







## Мнение

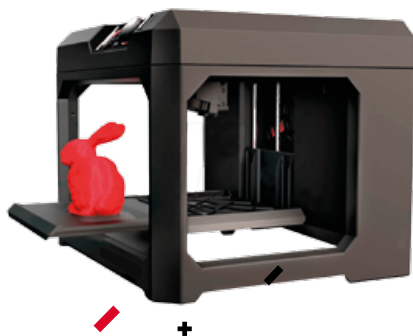
Андрей Шорохов,  
генеральный директор  
ООО «Протокон»




Покупатель не всегда полностью представляет весь спектр возможностей 3D-печати. В общественном понимании укоренился образ 3D-принтера как небольшого домашнего устройства для изготовления простых фигурок или сувениров. На самом деле сфера применения аддитивных технологий гораздо шире, и 3D-печать применима не только для развлечения, но и для выполнения серьезных промышленных задач. Отчасти из-за этого искаженного представления нам поначалу приходилось самим обращаться к потенциальным клиентам и убеждать их в том, что им нужны такие технологии, что это значительно экономит их время и средства.



Сергей Варламов,  
директор  
Центра прототипирования  
технопарка Санкт-Петербурга



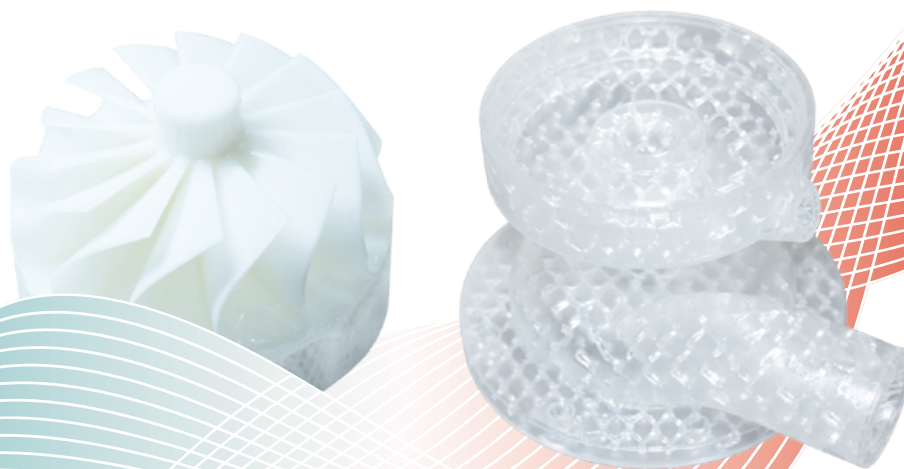
Важно понимать, что при всей своей популярности и высокотехнологичности у аддитивных технологий тоже есть ограничения. 3D-печать эффективна для создания мастер-модели, которую можно без лишних издержек довести до идеальных параметров, чтобы по ней дальше производить продукт на обычных станках. Также 3D-технологии отлично подходят для мелкосерийного производства сложных деталей. Например, сейчас за считанные часы можно выполнить внутреннюю резьбу, которая ранее достигалась только очень сложной фрезеровкой либо была вовсе невыполнима. А вот для крупносерийного производства 3D-принтеры не подойдут. 



По материалам издания «Деловой Петербург»

## ДИПОЛЬ представляет уникальный 3D-принтер SLA650 производства компании SHINING3D.

В основе технологического процесса 3D-печати установки заложен метод стереолитографии (Stereolithography – SLA) – отверждение жидкого фото полимера под воздействием лазерного излучения ультрафиолетового спектра. 3D-принтер ориентирован на промышленное применение и позволяет печатать изделия габаритами до 650 мм из широкого спектра различных пластиков. Основной сферой применения 3D-принтера SLA650 является низкосерийное и высокономенклатурное производство в области приборостроения – изготовление корпусных и крепежных элементов, быстрое прототипирование, а также литьевое производство – создание выжигаемых моделей под литье металла.



Объединяют в своем составе:

- ✦ Максимальный размер — построения 650X600X400мм (полная ванна);
- ✦ Максимальный — вес модели 10 кг;
- ✦ Точность —  $\pm 0.1\text{мм}$  (размер  $< 100\text{мм}$ ) /  $\pm 0.1\%$  (размер 100мм) (Точность может варьироваться в зависимости от параметров модели, геометрии и размеров детали, ориентации детали, и последующей обработки);
- ✦ Лазер — Твердотельный с тройной частотой Nd: YVO<sub>4</sub>;
- ✦ Длина волны — 355 nm;
- ✦ Размер пятна лазера — номинальный диаметр 0.08 - 0.12 мм;
- ✦ Скорость сканирования — 10м/с (макс); 6-10м/с (мин);
- ✦ ПО для подготовки — Materialise Magics; ✦ Толщина слоя — 0.05мм (мин) - 0.25мм (макс);
- ✦ Габариты машины — 1220X1400X2000мм; ✦ Вес — 1300 кг.



# Думы о шуме

Оптимизация измерений коэффициента шума на пластине в диапазоне частот до 67 ГГц







Михаил Бежко,  
специалист по анализу цепей  
«Микроэлектроника» и компонентов  
Keysight Technologies

Измерения коэффициента шума часто являются существенной частью определения параметров устройства на этапе НИОКР и контроля производства. Не всегда бывает просто получить точные результаты измерения коэффициента шума на пластине: итог зависит от методики измерения и конфигурации измерительного оборудования.

В большинстве случаев для определения коэффициента шума используется два метода: метод Y-фактора и метод холодного источника. Метод Y-фактора, или метод горячего/холодного источника, наиболее часто реализуется в анализаторах коэффициента шума и технических решениях на базе анализаторов спектра. Метод холодного источника обычно выполняется с помощью векторных анализаторов цепей, которые обеспечивают данные и по амплитуде, и по фазе. В результате метод холодного источника при измерениях коэффициента шума позволяет достичь значительно более высокой точности.

В статье описано техническое решение, использующее метод холодного источника, на базе анализатора цепей серии PNA-X компании Agilent, работающее в микроволновом диапазоне. Оборудованный опцией измерения коэффициента шума с полной коррекцией (опция 029), анализатор цепей серии PNA-X поддерживает исключительную точность. Обновленные аппаратные средства прибора обеспечивают удобство измерений в диапазоне частот до 50 ГГц. Теперь дополнительные внешние аппаратные средства требуются только при проведении измерений в диапазоне частот 50–67 ГГц. Анализатор цепей серии PNA-X также позволяет экономить время, поскольку предусматривает возможность проведения комплекса измерений (коэффициент шума, S-параметры, компрессия коэффициента усиления и интермодуляционные искажения), используя лишь один набор подключений к испытываемому устройству (ИУ).



## Обзор: коэффициент шума

Фактор шума, измеряемый в линейных единицах, и коэффициент шума, измеряемый в логарифмических единицах, — весьма полезные и широко признанные показатели качества, которые характеризуют, сколько шума усилитель или преобразователь частоты добавляет к проходящим через него сигналам. Определение обоих терминов является простым и наглядным. Например, фактор шума (F) какой-либо

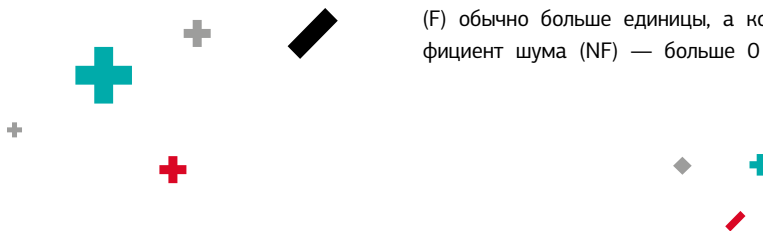
цепи определяется как отношение сигнал/шум на входе цепи к отношению сигнал/шум на выходе цепи:

$$F = \left( \frac{S_i}{N_i} \right) / \left( \frac{S_o}{N_o} \right)$$

Коэффициент шума (NF) — это фактор шума, выраженный в децибелах:

$$NF = 10 \times \log(F)$$

В идеальном усилителе уровень шума на выходе будет равен уровню шума на входе, умноженному на коэффициент усиления усилителя. Следствием этого является одно и то же значение отношения сигнал/шум как на входе, так и на выходе усилителя. Однако в реальном мире уровень шума на выходе больше, чем уровень шума на входе, умноженный на коэффициент усиления, поскольку само это устройство добавляет собственный шум. В результате отношение сигнал/шум на выходе будет меньше, чем на входе. Это приводит к тому, что фактор шума (F) обычно больше единицы, а коэффициент шума (NF) — больше 0 дБ.



## Измерение коэффициента шума

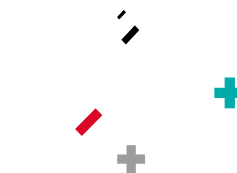
Для измерения коэффициента шума обычно используются два метода: метод Y-фактора и метод холодного источника. Метод Y-фактора, или метод горячего/холодного источника, использует калиброванный источник шума, состоящий из оптимизированного по шуму лавинного диода, который может быть включен или выключен, и следующего за ним аттенуатора для обеспечения хорошего согласования по выходу.

Когда диод находится в выключенном состоянии (то есть ток смещения отсутствует), источник шума генерирует такой же уровень шума, как согласованная нагрузка при комнатной температуре. Когда к диоду прикладывается напряжение обратного смещения, он переходит в состояние лавинного пробоя, в результате создается значительный уровень электрического шума вдобавок к уровню шума, формиру-

емому согласованной нагрузкой при комнатной температуре. Этот уровень дополнительного шума определяется как «избыточный коэффициент шума», или ИКШ. Типовыми значениями ИКШ являются 5 или 15 дБ. Коэффициент передачи и коэффициент шума ИУ можно определить по результатам отдельных измерений уровня выходной мощности при «холодной» и «горячей» согласованной нагрузке на входе.

Метод холодного источника, также иногда называемый методом прямого измерения шума, основан на использовании только одной «холодной» (обычно при комнатной температуре) согласованной нагрузки на входе ИУ. При реализации с векторными анализаторами цепей этот метод имеет важное преимущество, позволяющее

экономить время, поскольку обеспечивает проведение комплекса измерений (коэффициент шума и S-параметры), используя только один набор подключений к ИУ. Это особенно важно при тестировании устройств на пластине, поскольку повторяющиеся контактные измерения могут повредить тестируемый элемент.



Кроме того, векторный анализатор цепей способен обеспечить измерение амплитудных и фазовых характеристик как измерительной системы, так и ИУ, следствием чего является исключительно высокая точность в сравнении с другими методами измерений. Подобные преимущества распространяются на широкий диапазон ИУ: усилители, преобразователи частоты и многие другие приборы.

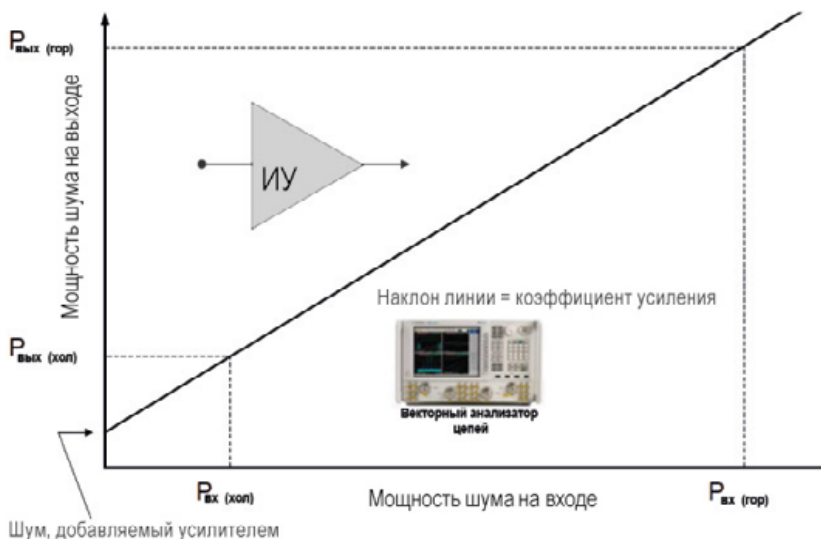


Рис. 1. График зависимости мощности шума на выходе от мощности шума на входе отображает информацию о коэффициенте усиления, линейности характеристики и внутреннем шуме усилителя



Пока усилитель находится в линейном режиме, график зависимости мощности шума на выходе от мощности шума на входе будет представлять прямую линию (рис. 1). Линейность характеристики является хорошим допущением для малошумящих усилителей (МШУ), поскольку их назначение — усиление сигналов низкого уровня, находящихся далеко от области компрессии усилителя.



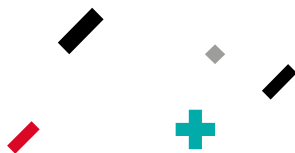
Даже если источник шума на входе отсутствует, все равно будет присутствовать некоторый уровень шума на выходе усилителя вследствие процессов генерации шума активными цепями данного устройства. Это тот шум, чьи характеристики мы определяем при измерении коэффициента шума.

Графически легко продемонстрировать, почему два измерения мощности шума на выходе можно использовать для определения как коэффициента усиления (наклон линии), так и коэф-

фициента шума (получаемого из точки пересечения с осью  $Y$ ). В то же время, если коэффициент усиления (наклон линии) можно определить с помощью других методов, например посредством возбуждения синусоидальным сигналом и измерений, обеспечиваемых векторным анализатором цепей, то потребуется только одно измерение мощности шума для вычисления точки пересечения с осью  $Y$  и, соответственно, коэффициента шума ИУ (это основа метода холодного источника).

## Проблема: ухудшение точности измерений

Одно из основных допущений, лежащих в основе метода  $Y$ -фактора, заключается в том, что источник шума представляет для ИУ стабильное 50-омное согласование. Любое отклонение от значения 50 Ом может существенно ухудшить точность измерения. Степень ухудшения зависит от сценария измерения. Например, если источник шума подключен непосредственно к входу тестируемого усилителя, точность измерения коэффициента шума будет достаточно хорошей. Это особенно справедливо в случае использования источников шума с низким ИКШ, которые обычно обеспечивают лучшее согласование, чем источники шума с большим ИКШ.



При измерениях на пластине (рис. 2) между источником шума и ИУ имеются различные электрические цепи, вызывающие снижение точности измерений из-за ухудшения согласования в источнике. Это остается справедливым даже в случае полной компенсации потерь, вносимых кабелями, переключателями и пробниками зондовых станций. Причина в том, что компенсация потерь не может устранить ни эффекты рассогласования, ни эффекты, вносимые шумовыми параметрами. Такие эффекты добавляют пульсации и неопределенность в результаты измерения коэффициента шума.

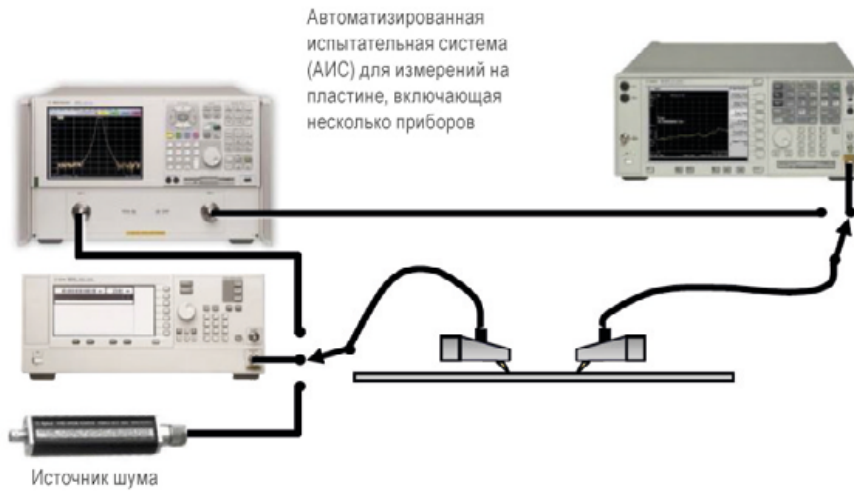


Рис. 2. Чем длиннее и сложнее становится линия передачи шумового сигнала от ГШ до тестируемого устройства, тем в большей степени может пострадать точность измерения из-за ухудшения согласования в источнике

## Общее решение: измерение с помощью анализатора цепей серии PNA-X

Анализатор цепей серии PNA-X СВЧ-диапазона позволяет при одном подключении измерять S-параметры, компрессию коэффициента усиления и фазы, гармоники и интермодуляционные искажения. Опция 029, обеспечивающая измерение коэффициента шума с коррекцией неполного согласования в источнике, включает измерение коэффициента шума в список возможных измерений путем добавления аппаратных средств и встроенного программного обеспечения к PNA-X.

Что касается аппаратных средств, данная опция добавляет малошумящие приемники с тем же диапазоном частот, в котором работает и сам прибор, но с ограничением до 50 ГГц.

Измерения коэффициента шума могут быть расширены до 67 ГГц с помощью одного из стандартных приемников PNA-X, нередко с добавлением внешнего предусилителя и фильтра для удаления внеполосного шума. Данная опция также расширяет встроенное программное обеспечение прибора возможностями реализации специализированных измерений и алгоритмов калибровки.

Полная векторная коррекция ошибок может быть достигнута при использовании встроенного тюнера импеданса, доступного в моделях с диапазоном частот до 43, 5, 50 и 67 ГГц, или внешнего модуля электронной калибровки (ECal) с диапа-

зоном частот до 13,5 или 26,5 ГГц, сконфигурированного в качестве тюнера импеданса. В сочетании со стандартными измерениями коэффициента усиления (передачи) и параметров согласования с применением векторной коррекции ошибок, тюнер импеданса помогает устранить эффекты, связанные с неполным согласованием в источнике системы, что значительно повышает точность измерения.

Метод коррекции согласования в источнике уникален для PNA-X. Диаграмма Смита, показанная на рис. 3, иллюстрирует реализацию данного метода. Квадрат в центре диаграммы указывает точку, в которой мы хотели бы измерить коэффициент шума ИУ.



Это соответствует идеальному 50-омному согласованию в источнике. С другой стороны, нам известно, что испытательная система не обеспечивает идеального согласования во всем диапазоне частот.

Для устранения подобного недостатка анализатор цепей серии PNA-X с опцией 029 использует от четырех

до семи прецизионных импедансов, которые отличаются от значения 50 Ом. Они указаны в виде четырех кружков на рис. 3. При каждом значении импеданса PNA-X измеряет мощность шума, поступающего от ИУ. Значения импедансов этих четырех состояний измеряются во время калибровки системы, а значения мощности

шума измеряются с ИУ, установленным на своем месте. Пары значений импеданс/мощность шума затем применяются для решения уравнения шумовых параметров, что, в свою очередь, обеспечивает очень точное вычисление коэффициента шума, соответствующего 50-омному согласованию в источнике (квадрату в центре).

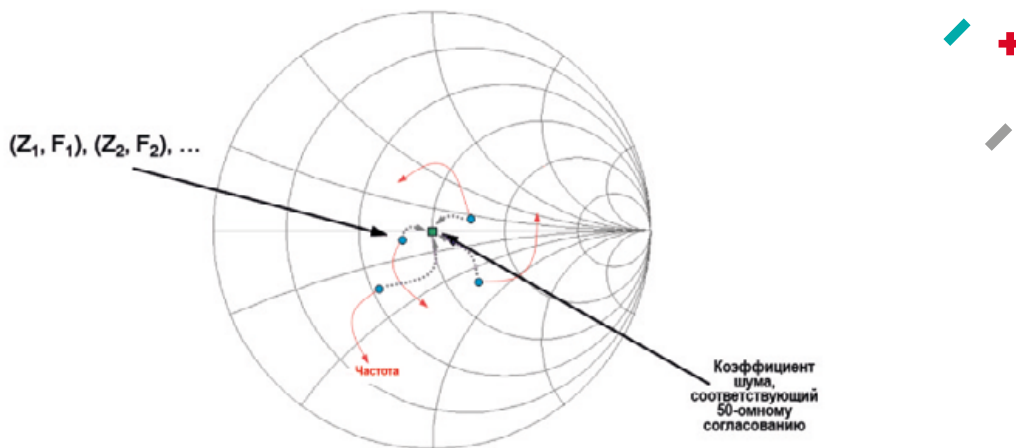


Рис. 3. Анализатор цепей серии PNA-X может использовать от четырех до семи состояний импеданса, которые отличаются от 50 Ом, чтобы обеспечить точное вычисление коэффициента шума, соответствующего 50-омному согласованию в источнике, для ИУ

Точно так же, как векторная коррекция ошибок используется для значительного улучшения нескорректированного согласования в источнике и нагрузке векторного анализатора цепей при измерении S-параметров, метод коррекции согласования в источнике представляет неполное согласование в источнике PNA-X таким, как если бы оно выглядело вполне допустимым для измерений коэффициента шума. Во время реального измерения ИУ проводится свипирование частоты для каждого состояния импеданса. Это более эффективно, чем изменение импеданса в каждой частотной точке.

Помимо четырех, пяти или семи циклов свипирования, необходимых для измерения мощности шума, выполняются два традиционных цикла свипирования для измерения S-параметров (в прямом и обратном направлениях) с помощью стандартных приемников. Два цикла свипирования необходимы для обеспечения точного измерения коэффициента усиления усилителя и четыре цикла свипирования — для измерения усиления (преобразования) преобразователя частоты.

На рис. 4 показан пример сравнения методов Y-фактора и PNA-X.

В обоих случаях были проведены широкополосные измерения коэффициента шума несогласованного маломощного транзистора в корпусе, использующие 401 точку. Для метода Y-фактора применен источник шума 346С компании Agilent с ИКШ = 14 дБ.



График результатов измерения PNA-X имеет гладкий характер и соответствует среднему значению графика результатов измерений, полученных методом Y-фактора, имеющих вид пульсаций. Пульсации при измерениях методом Y-фактора нечасто видны по двум причинам. Первая причина заключается в том, что многие устрой-



ства являются узкополосными, и поэтому используемая полоса частот измерения бывает слишком узка, чтобы отобразить присущие данному методу пульсации. При узкополосных измерениях с центральной частотой ниже 15 ГГц метод Y-фактора может представить рабочие характеристики МШУ либо гораздо лучше, либо гораздо хуже, чем на самом деле.

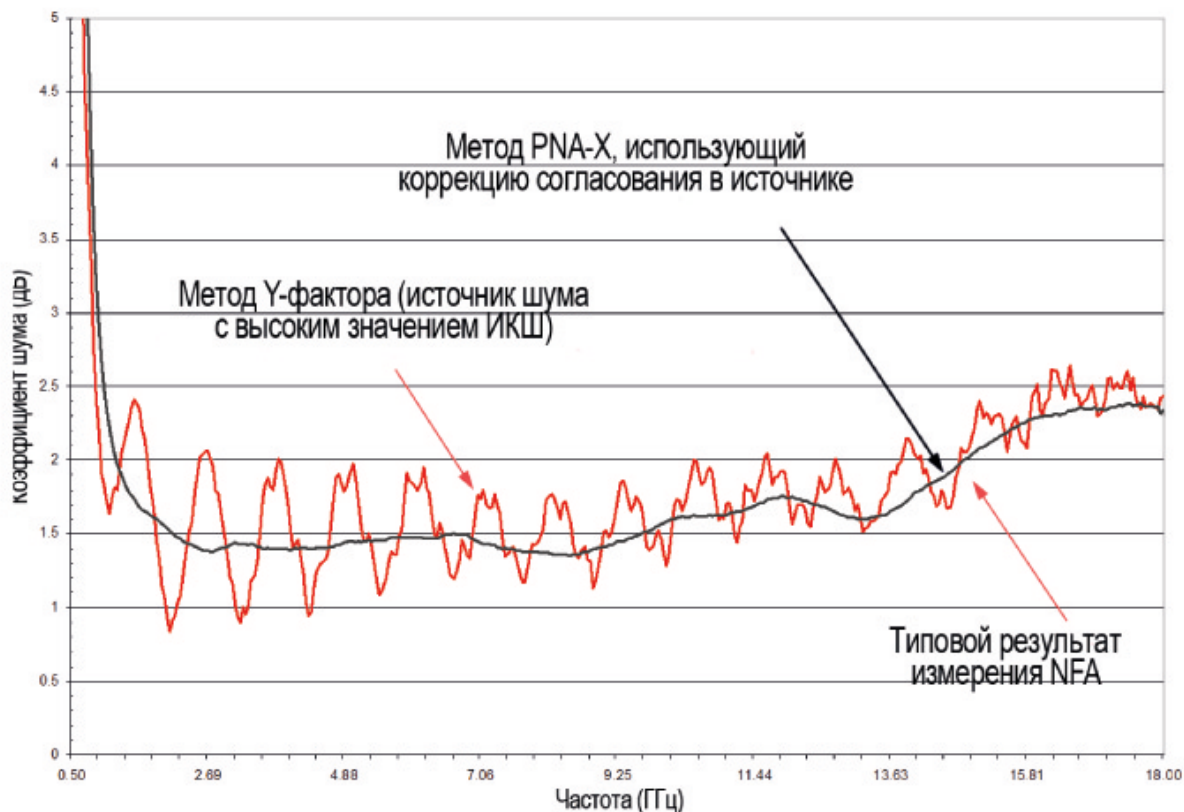


Рис. 4. Используя метод коррекции согласования в источнике, анализатор цепей серии PNA-X обеспечивает более точное представление коэффициента шума ИУ по сравнению с применением метода Y-фактора и анализатора коэффициента шума серии NFA



Вторая причина состоит в том, что даже при широкополосных измерениях невысокая скорость измерений, обеспечиваемая методом Y-фактора, вынуждает применять небольшое число точек измерения. За счет этого представление реальных рабочих характеристик устройства формируется в условиях недостаточного шага по частоте или с наложением мешающего сигнала, как показано пунктирной линией на рис. 4. В данном случае было только 11 точек измерения.

Это значение обычно используется в специализированных анализаторах коэффициента шума серии NFA.

Очевидно, что при измерении, использующем 401 точку, анализатор цепей серии PNA-X обеспечивает меньший уровень пульсаций и за счет этого — более высокую точность измерений и более достоверное отображение коэффициента шума ИУ.



## Общее решение: определение характеристик приемника шума

Измерение коэффициента шума любого ИУ с коррекцией на пластине и в других случаях требует, чтобы мы определили мощность шума, вносимую внутренними приемниками шума измерительного прибора, и вычли ее из необработанного (нескорректированного) результата измерения. На результат измерения мощности шума влияют коэффициент усиления, полоса пропускания и коэффициент шума приемника. Например, чем больше коэффициент усиления, тем выше измеренный уровень мощности. Мощность шума приемника зависит и от его полосы пропускания. Таким образом, общая мощность шума, вносимая приемниками шума, пропорциональна произведению коэффициента усиления и полосы пропускания приемника (рис. 5).

Коэффициент усиления и полосу пропускания можно измерить отдельно или вместе в виде одного произведения. Для таких методов, как метод Y-фактора, который использует источник шума, характеристики приемника шума определяются измерением произведения коэффициента усиления и полосы пропускания при непосредственной подаче известной величины избыточного шума.

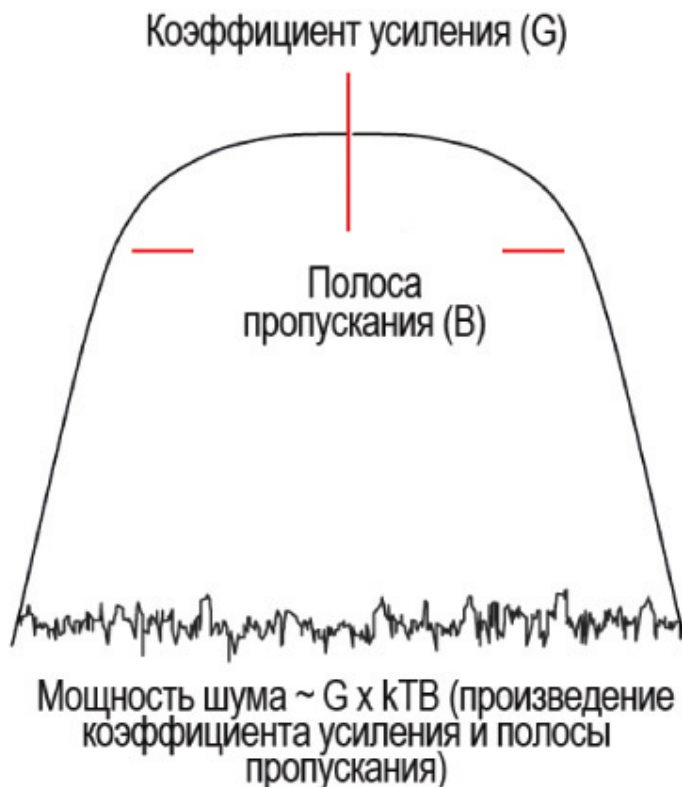



Рис. 5. Определение произведения коэффициента усиления и полосы пропускания приемника шума помогает измерить мощность шума, вносимую внутренними приемниками шума, которая используется в качестве поправочного коэффициента для обеспечения калиброванных измерений



Анализатор цепей серии PNA-X предлагает альтернативный подход, где в качестве калибровочной меры присутствует измеритель мощности и преобразователь мощности вместо источника шума. Этот метод основан на отдельных измерениях коэффициента усиления и полосы пропускания. Одним из преимуществ подобного подхода является практичность: в диапазоне частот до 50 ГГц преобразователи мощности более распространены, чем источники шума.

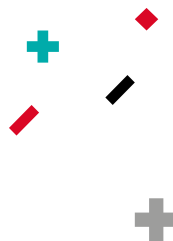
Этот подход предусматривает три этапа. Сначала измеритель и преобразователь мощности используются для калибровки PЧ-источника анализатора цепей серии PNA-X в заданном диапазоне частот. Затем откалиброванный источник предназначается для калибровки коэффициента усиления приемника шума. После него с помощью свипирования фильтра шумовой полосы пропускания измеряется АЧХ

фильтра ПЧ приемника шума в каждой частотной точке в пределах требуемого измерения. АЧХ фильтра ПЧ затем интегрируется для вычисления эффективной полосы пропускания шума приемника шума. Значения коэффициента усиления и полосы пропускания комбинируются в каждой частотной точке для получения характеристики произведения коэффициента усиления и полосы пропускания приемника.

Подход с использованием измерителя мощности имеет еще одно преимущество: в данном случае не происходит ухудшения джиттера измерения на частотах выше 45 ГГц из-за типового спада АЧХ избыточного коэффициента шума (ИКШ) источника шума. В результате погрешность измерения в случае подхода с измерителем мощности будет, вероятно, немного лучше по сравнению с погрешностью, полученной при использовании стандартного источника шума.

## **Конкретное техническое решение и результаты: распространение точности измерений до наконечников пробников**

При измерении коэффициента шума на пластине, выполненного анализатором цепей серии PNA-X, хорошие результаты гарантируют два типа калибровки: можно использовать мастер калибровки Calibration Wizard или Cal All Wizard, который включает 2-портовую калибровку на пластине, либо применить коаксиальные калибровочные меры и исключение цепей пробников (зондов) зондовой станции, используя данные их S-параметров. Хотя оба подхода обеспечивают превосходную точность измерений, ограничением, которому часто не придается должного значения, становится качество кабелей, имеющих в испытательной установке. Рассмотрим подробнее каждый из этих факторов.



### Использование мастера калибровки Cal Wizard

При работе с любым мастером калибровки, Cal Wizard или Cal All Wizard, используется комбинация шагов калибровки коаксиального тракта и на пластине. В данном примере показана калибровка на пластине посредством мастера калибровки Cal Wizard.

Этот процесс, включающий три шага, показан на рис. 6. В данном примере источник шума подсоединяется

к концу кабеля, предназначенного для подключения измерительного пробника (зонда), а не к измерительному порту 2 анализатора (шаг 1). Хотя лучше подсоединить источник шума непосредственно к порту 2, подключение его к концу кабеля будет более удобным, если анализатор цепей установлен в приборной стойке позади зондовой станции. Если непосредственное подключение невозможно, кабель, подключаемый к порту 2, должен

иметь минимально возможные потери. Любые потери вычитаются из ИКШ источника шума, что приводит к увеличению джиттера. Если потери в кабеле, подключенном к порту 2, слишком велики, это может стать препятствием для использования источника шума из-за отсутствия избыточного шума на частотах выше 45 ГГц. В таком случае следует провести калибровку на базе измерителя мощности.



Рис. 6. Мастер калибровки коэффициента шума автоматически встраивает потери, вносимые пробником (зондом) в данные шумовых параметров, чтобы переместить опорную плоскость калибровки к опорной плоскости 2-портовой калибровки

Для подключения источника шума к испытательной системе необходим переход «розетка-розетка». После завершения измерения шумовых параметров проводится 1-портовая калибровка (переход остается на своем месте), чтобы установить опорную плоскость калибровки шума (шаг 2). По окончании 1-портовой калибровки переход должен быть удален, чтобы снова подсоединить пробник (зонд).

Последним шагом является 2-портовая TRL-калибровка на пластине. Если в шаге 1 был использован измеритель мощности или если в шаге 2 не был применен модуль ECal, требуется два дополнительных импеданса для точных измерений с изменением импеданса источника на входе приемника шума в шаге 3. В качестве дополнительных мер обычно используются короткозамкнутая нагрузка (КЗ) или

нагрузка холостого хода (ХХ) и несогласованная линия передачи. При этом необходимо, чтобы ни одна из этих мер не была частью TRL-калибровки. По окончании всех трех шагов встроенное программное обеспечение калибровки шума использует корректное математическое встраивание цепей для перемещения опорной плоскости калибровки шума к опорной плоскости 2-портовой калибровки (даже если переход «розетка-розетка» был удален).



В случае применения анализатора цепей серии PNA-X важным шагом при проведении калибровки коэффициента шума становится измерение шумовых параметров малошумящего приемника. Это гарантирует, что из всех результатов измерений ИУ будет вычитаться правильная величина шума, вносимого приемником, обеспечивая измерение шума только от ИУ.

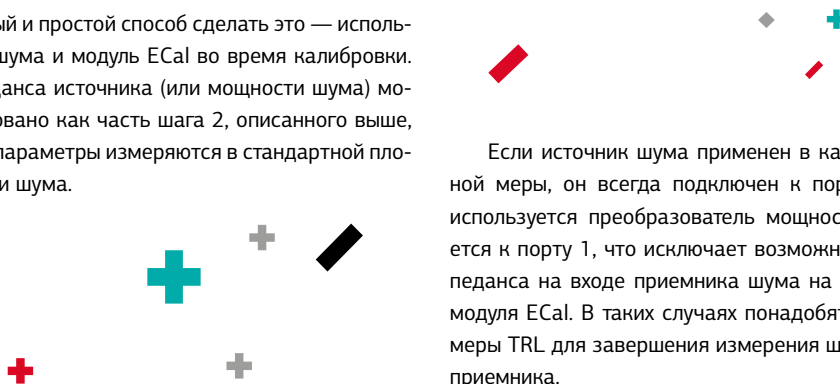
Величина шума, добавляемого приемником, зависит от согласования на выходе (S22) ИУ которое легко измеряется векторным анализатором цепей. Это согласование для приемника является согласованием в источнике. В соответствии с теорией шумовых параметров коэффициент шума усилителя или приемника зависит от согласования в источнике, подсоединенного

к входу. Шумовые параметры приемника измеряются точно так же, как и шумовые параметры ИУ: для приемника (на порте 2) воспроизводится набор известных импедансов, и мощность шума измеряется при каждом состоянии импеданса.



Рис. 7. Исключение цепей пробников зондовой станции представляет собой другой способ получения калиброванных результатов измерений

Самый быстрый и простой способ сделать это — использовать источник шума и модуль ECal во время калибровки. Изменение импеданса источника (или мощности шума) может быть реализовано как часть шага 2, описанного выше, если 1-портовые параметры измеряются в стандартной плоскости калибровки шума.



Если источник шума применен в качестве калибровочной меры, он всегда подключен к порту 2. Однако если используется преобразователь мощности, он подсоединяется к порту 1, что исключает возможность изменения импеданса на входе приемника шума на порте 2 с помощью модуля ECal. В таких случаях понадобятся дополнительные меры TRL для завершения измерения шумовых параметров приемника.

### Использование функции исключения цепей

В данном примере калибровка коэффициента шума производится исключительно с помощью коаксиальных мер, а цепи пробников (зондов) зондовой станции математически исключаются из результатов последующих измерений с использованием функции моделирования устройства подключения анализатора цепей серии PNA-X. На рис. 7, который иллюстрирует данный процесс, состоящий из трех шагов, показан источник шума; однако вместо него можно использовать преобразователь мощности.

Шаг 1 данного процесса заключается в получении S-параметров пробников зондовой станции. Это можно сделать, если

сначала выполнить калибровку на конце коаксиального кабеля, а затем добавить пробник и провести калибровку на пластине. Используя оба набора калибровочных коэффициентов, можно определить S-параметры пробника. Этот шаг выполняется только один раз для каждого пробника.

Затем осуществляется калибровка шума в коаксиальном тракте. Фактическое число шагов зависит от выбранного калибровочного набора и типов соединителей. При измерениях ИУ используется функция моделирования устройства подключения для математического исключения цепей на каждом измерительном порте. Вам потребуется определить файлы s2p, соответствующие пробникам зондовой станции, используемым на каждом порте.

### Сравнение реальных результатов, полученных с помощью мастера калибровки Cal Wizard

Два примера, приведенные ниже, покажут, как эти методы улучшают точность измерений на пластине. В первом примере был употреблен анализатор цепей N5245A серии PNA-X с диапазоном частот до 50 ГГц и автоматиче-

ская зондовая станция для измерения параметров одного несогласованного полевого транзистора. На рис. 8а и b показаны два набора графиков: на верхних графиках использовалась скалярная калибровка шума, а на нижних — векторная калибровка шума и встроенный тюнер.

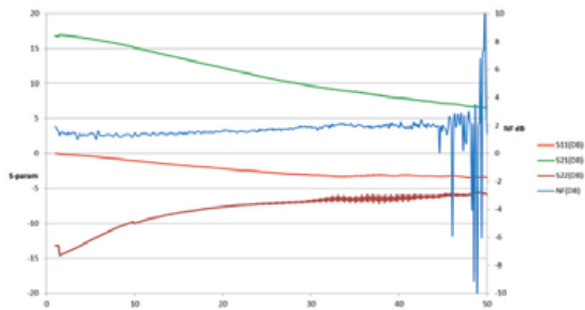
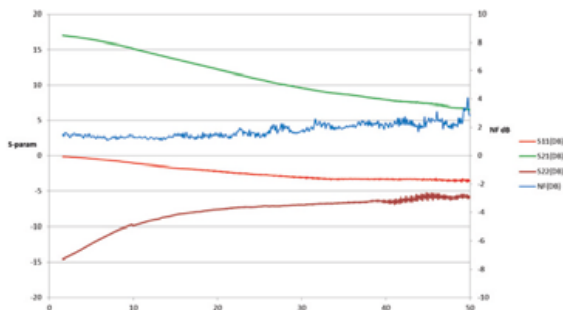


Рис. 8а, б. В сравнении со скалярной калибровкой шума (вверху) векторная калибровка шума снижает неравномерность характеристики, имеющей вид пульсаций, при измерениях коэффициента шума (NF) (графики синего цвета)

При использовании скалярной калибровки наблюдается некоторая неравномерность измеренной характеристики коэффициента шума, имеющая вид пульсаций, из-за неполного согласования в источнике. При использовании векторной калибровки пульсации снижаются примерно до 45 ГГц, но затем резко увеличиваются в диапазоне частот 45–50 ГГц. В данной конфигурации испытательной системы применялись недорогие кабели, и наиболее вероятно, что именно они привели к тем проблемам, которые проявились в результатах измерения

коэффициента шума (NF) (график синего цвета) и параметра S11 (график красного цвета).

Те же самые измерения были сделаны на другой установке зондового контроля, оснащенной анализатором цепей N5247A серии PNA-X с диапазоном частот до 67 ГГц, которая имеет коэффициент шума на частоте 50 ГГц на 2 дБ лучше, чем N5245A. Между анализатором цепей серии PNA-X и пробниками зондовой станции использовались более короткие и качественные кабели. Такое сочетание улучшения коэффициента шума, сни-

жения потерь и повышения стабильности характеристик кабелей приводит к превосходным результатам с использованием векторной калибровки шума и встроенного тюнера, как показано на рис. 9 справа. Как и в предыдущем случае, графики, расположенные слева, были получены посредством скалярной калибровки шума, и поэтому график измерения коэффициента шума содержит пульсации; графики, находящиеся справа, получены с использованием векторной калибровки шума, и пульсации были устранены.

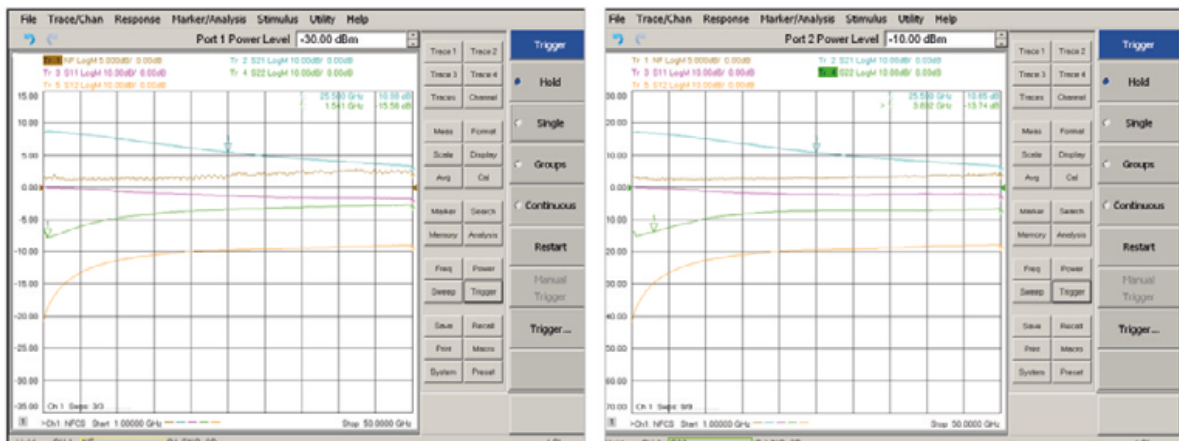


Рис. 9. Использование высококачественных кабелей и векторного анализатора цепей с лучшим коэффициентом шума позволяет получить точные, без пульсаций, результаты измерений с помощью векторной калибровки шума (графики, расположенные справа)



### Использование внешнего тюнера

Измерения на пластине обычно проводятся на несогласованных устройствах, которые очень чувствительны к согласованию в источнике. Хотя векторная калибровка шума способна преодолеть эту проблему, дополнительные потери, вносимые кабелями и пробниками на порте 1, могут расширить диапазон значений импедансов, воспроизводимых для ИУ. Это может стать причиной выбросов там, где алгоритм векторной калибровки шума не может найти правильное решение для коэффициента шума при 50-омном согласовании.

Данную проблему можно исправить, используя более качественные кабели на измерительном порте. Если в данной конфигурации уже предусмотрены кабели хорошего качества, то для исключения выбросов предпочтительны более сложные конфигурации установок зондового контроля.

В установке, приведенной в следующем примере, встроенный тюнер анализатора цепей заменен внешним тюнером. Конфигурация, показанная на рис. 10, использует внешние цепи подачи смещения и заменяет встроенный тюнер внешним модулем ECal, который помещается как мож-

но ближе к ИУ, чтобы снизить потери в кабеле. Поскольку данная установка воспроизводит более широкий диапазон значений импедансов для ИУ, она обеспечивает более эффективную векторную калибровку шума; однако потери в тракте прямой передачи модуля ECal ухудшают нескорректированные характеристики направленности на порте 1 при измерениях S-параметров, делая результаты калибровки менее стабильными с течением времени.

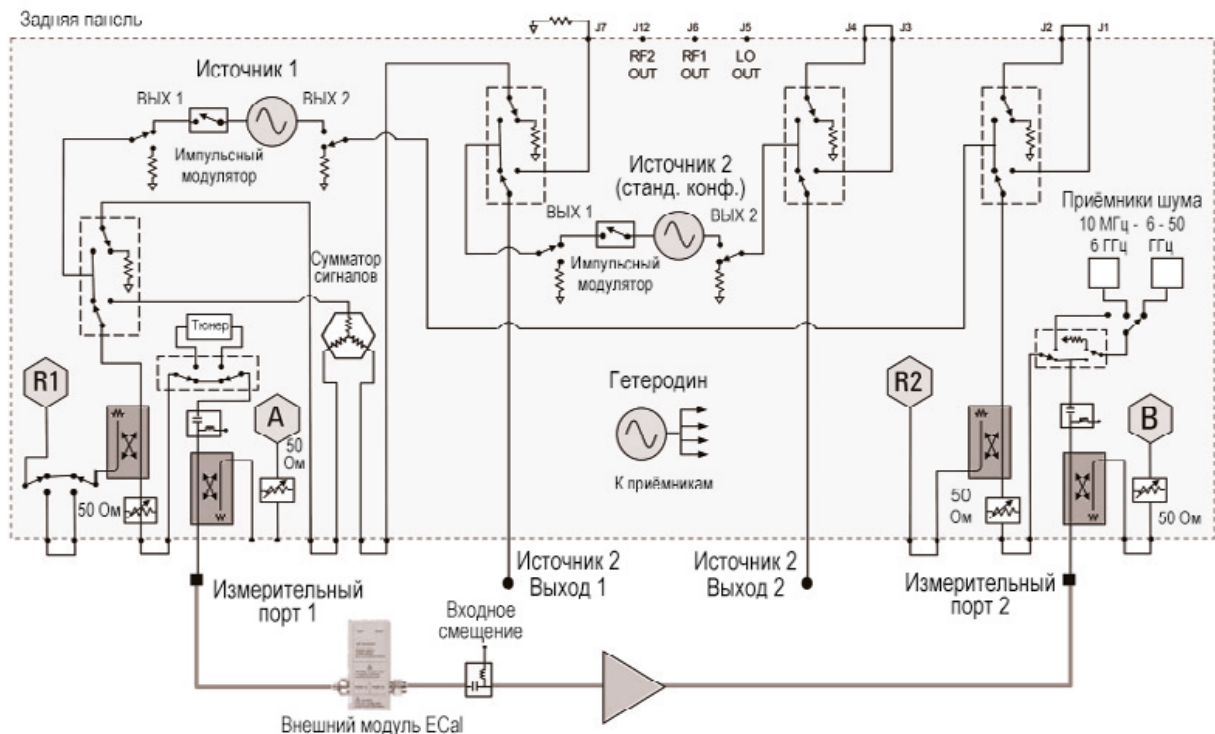


Рис. 10. Данная конфигурация с внешним тюнером и цепью подачи смещения помогает решить проблемы, связанные с потерями в кабелях, и позволяет провести более эффективную векторную калибровку шума

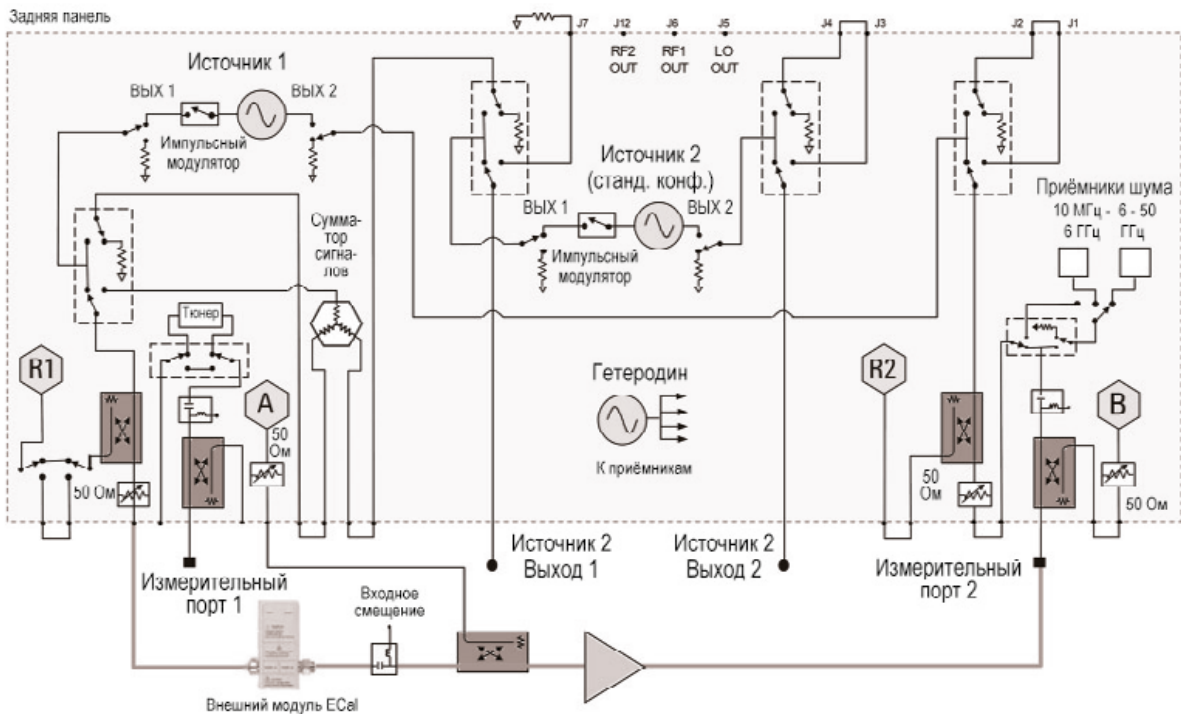


Рис. 11. Для компенсации влияния потерь в тракте на направленность системы можно добавить внешний направленный ответвитель после тюнера перед ИУ, что помогает сохранить высокую точность калибровки и измерения S-параметров

Альтернативный подход представлен на рис. 11. Помимо внешнего тюнера импеданса (его роль выполняет модуль ECal) и цепи подачи смещения,

данная установка включает направленный ответвитель, расположенный вблизи ИУ. Эта конфигурация решает проблемы, связанные с потерями

в кабелях, и расширяет диапазон значений импедансов, представляемых тюнером, без ухудшения характеристик направленности.

### Сравнение реальных результатов, полученных с использованием внешнего тюнера

Два метода для улучшения результатов измерения коэффициента шума, описанные выше, использовались в ранее упомянутых установках зондового контроля. В первой установке добавление внешних компонентов помогло уменьшить, но не исключить полностью выбросы, показанные на рис. 8b.

Оба набора графиков, изображенные на рис. 12, получены при помощи векторной калибровки шума. Верхние графики получены с использованием конфигурации, включающей внешний тюнер и цепь подачи смещения, как показано на рис. 10; нижние графики — с применением конфигурации, включающей тюнер, цепь подачи смещения и направленный ответвитель, как видно на рис. 11. Дополнительную выгоду можно было бы получить путем большего усреднения шума, но за счет увеличения времени измерения. Как и в случае, который обсуждался ранее, более качественные кабели должны еще в большей степени улучшить результаты.





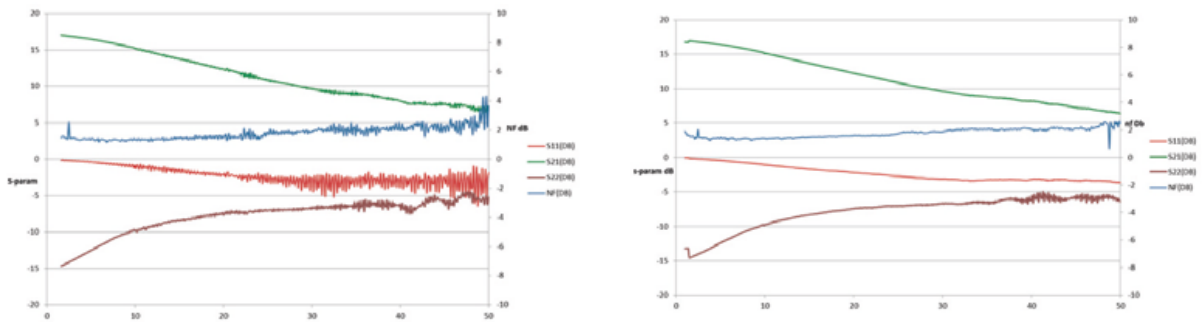


Рис. 12а, б. По сравнению с результатами, приведенными на рис. 8в, данные графики, полученные на установке зондового контроля 1, показывают улучшения при измерении S-параметров и коэффициента шума

Для установки зондового контроля 2 обе конфигурации с внешним тюнером также улучшают результаты измерения коэффициента шума (рис. 13); однако, поскольку характеристики измерительной системы были очень хорошими, эти улучшения не настолько существенны, как в случае

с установкой зондового контроля 1. Как показано на рис. 13, сочетание векторной коррекции шума и одной из конфигураций с внешними компонентами позволяет получить графики с меньшей неравномерностью, чем в случае со встроенным тюнером и скалярной калибровкой шума (гра-

фик синего цвета) или векторной калибровкой шума (график красного цвета). Результаты, полученные с использованием внешнего направленного ответвителя (график оранжевого цвета), показывают самую меньшую величину джиттера и пульсаций в диапазоне частот 45–50 ГГц.

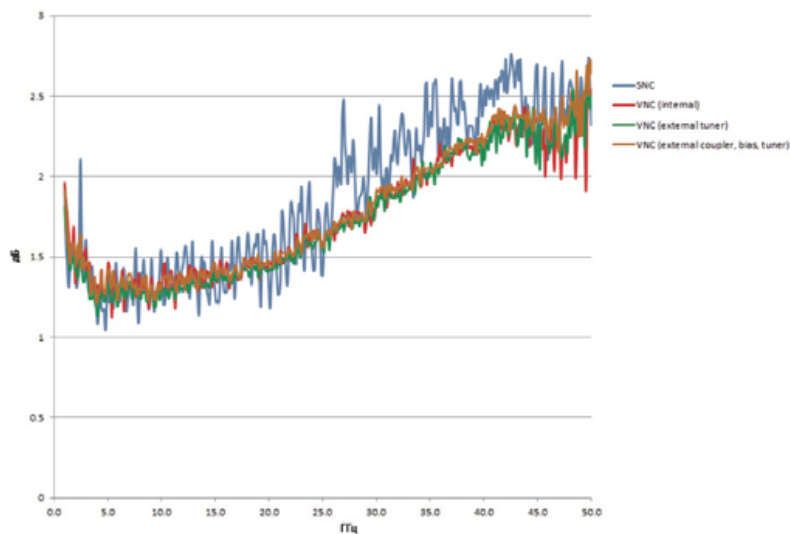
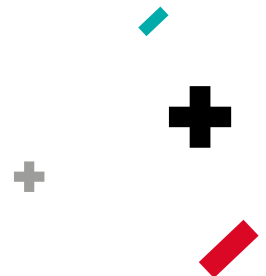


Рис. 13. При использовании в системе качественных кабелей с низкими потерями, а также при измерении устройств с хорошим согласованием по входу метод переноса тюнера шума ко входу ИУ будет оказывать менее заметное влияние на джиттер трассы и общую точность измерений



## Работа в диапазоне частот от 50 до 67 ГГц

В анализаторах цепей серии PNA-X опциональные малошумящие приемники и тюнер импеданса работают в диапазоне частот до 50 ГГц. Однако стандартные приемники, предназначенные для измерения S-параметров, могут быть использованы для проведения измерений коэффициента шума в диапазоне частот 50–67 ГГц.

Необходимо сделать два разъяснения, которые мы можем проиллюстрировать, используя структурную схему

малошумящего приемника (рис. 14). Во-первых, поскольку в стандартных приемниках отсутствует малошумящий усилитель перед смесителем, характеристики шумовых параметров являются не такими хорошими, как у специализированных малошумящих приемников. Во-вторых, внеполосный шум может вносить избыточный шум в результаты измерений коэффициента шума, поскольку в стандартных приемниках также отсутствует блок фильтров перед смесителем.

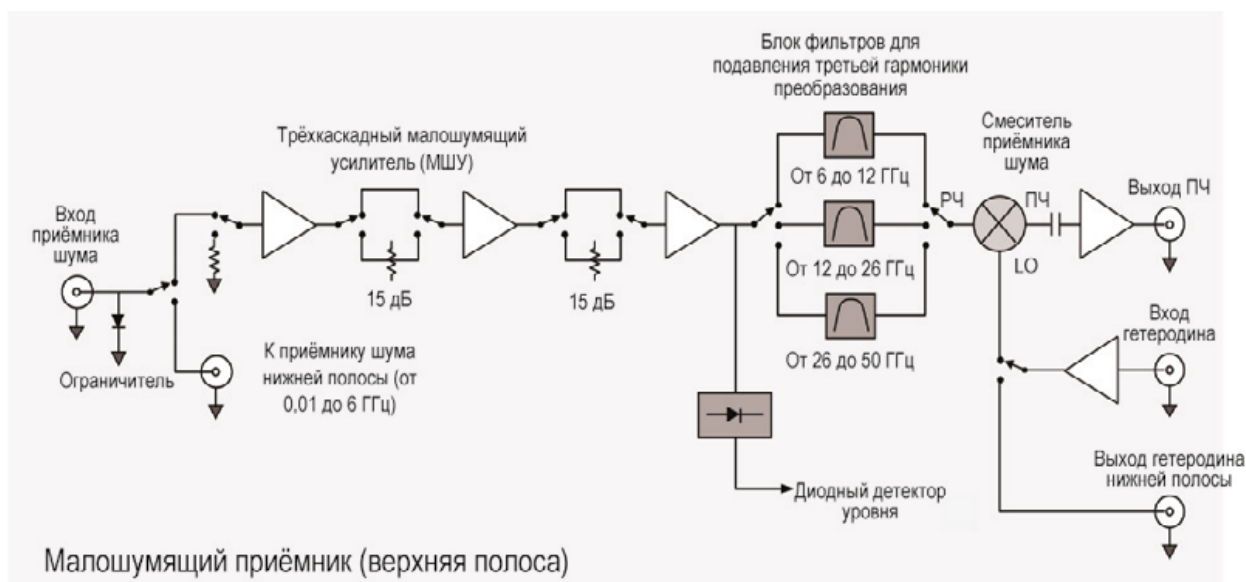


Рис. 14. В специализированном малошумящем приемнике тракт сигнала, ведущий к смесителю, включает малошумящие усилители и блок фильтров

При использовании стандартного приемника необходимо также развернуть направленный ответвитель измерительного порта 2 в обратную сторону. При этом прямое плечо и ответвленное плечо меняются местами,

за счет чего чувствительность приемника увеличивается. Это достигается за счет снижения мощности порта при измерении обратных S-параметров и является хорошим компромиссом для измерений коэффициента шума.

К счастью, данные ограничения можно преодолеть с помощью внешнего оборудования: предусилителя и фильтра. Как показано на рис. 15, предусилитель и фильтр

подсоединяются к приемнику напрямую, за счет чего исключаются потери, которые возникают в направленном ответвителе измерительного порта.

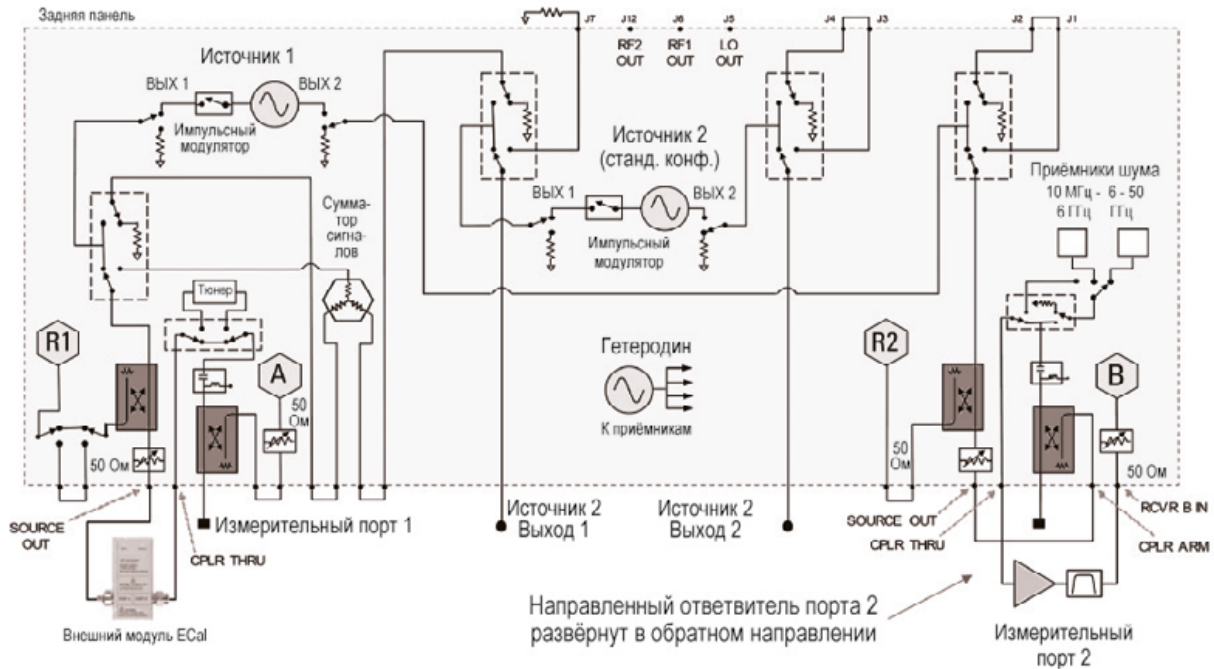


Рис. 15. Добавление внешнего предусилителя и фильтра улучшает качество измерений коэффициента шума с использованием стандартных приемников в диапазоне частот 50–67 ГГц

При использовании этой установки заданный уровень мощности сигнала источника, поступающего с выхода измерительного порта 2, будет уменьшен на величину потерь в ответвителе, поскольку теперь сигнал источника проходит через ответвленное плечо. Заметим также, что сигнал проходит и в обход встроенного

тунера. Для векторной калибровки шума требуется внешний модуль ECal (N4694A), который работает в диапазоне частот до 67 ГГц и имеет соединители 1,85 мм.

Необходимо принять во внимание еще одно предостережение: высокий коэффициент усиления, обеспечиваемый данной конфигурацией, усложняет калибровку и измерение параметров многих типовых ИУ.



С учетом такого большого коэффициента усиления в установке зондового контроля важно предпринять особые меры предосторожности и установить уровни мощности порта достаточно низкими, чтобы предотвратить компрессию предусилителя и приемника анализатора цепей серии PNA-X во время калибровки и последующих измерений.

Внешний фильтр играет решающую роль в обеспечении хорошего качества измерений коэффициента шума. В анализаторе цепей серии PNA-X для измерений на частотах выше 26,5 ГГц используется смешение на третьей гармонике. Однако преобразование шума происходит также на основной частоте гетеродина, результатом чего является большой вклад внеполосного шума в результаты измерения.

При измерении коэффициента шума с помощью малозумящего приемника анализатор отфильтровывает шум либо вблизи основной частоты, либо вблизи третьей гармоники, в зависимости от полосы частот. При измерении коэффициента шума с использованием стандартного приемника внутренняя фильтрация отсутствует. В итоге при измерении в диапазоне частот 50–67 ГГц будет появляться внеполосный шум вблизи основной частоты гетеродина вследствие поступления мощности шума ИУ на исследуемой частоте третьей гармоники, и это приведет к нежелательному увеличению значения измеренного коэффициента шума.

При использовании стандартного приемника в диапазоне частот ниже 26,5 ГГц для подавления шума вблизи третьей гармоники необходим внешний фильтр низких частот или полосовой фильтр. При измерении в диапазоне частот выше 26,5 ГГц для подавления шума вблизи основной частоты гетеродина необходим фильтр

верхних частот или полосовой фильтр. При измерениях в полосе частот 50–67 ГГц два коаксиально-волноводных перехода V281A (WR-15) компании подключаются последовательно, образуя превосходный фильтр верхних частот, который подавляет сигналы на частотах ниже 44 ГГц.




## Выводы



Не всегда бывает просто получить точные данные измерения коэффициента шума на пластине: результат зависит от методики измерения и конфигурации измерительного оборудования. Как было указано выше, векторный анализатор цепей способен обеспечить измерение амплитудных и фазовых характеристик как измерительной системы, так и ИУ. Это позволяет достичь высокой точности при использовании метода холодного источника для измерения коэффициента шума усилителей, преобразователей частоты и многих других ИУ.

Снабженный опцией измерения коэффициента шума с полной коррекцией (опция 029), СВЧ-анализатор цепей серии PNA-X обеспечивает исключительную точность. Ключевым фактором являются методы калибровки, обеспечиваемые СВЧ-анализаторами серии PNA-X. Эти передовые методы позволяют распространить точность измерений вплоть до наконечников пробников (зондов).

Что касается внешнего по отношению к анализатору цепей оборудования, использование высококачественных кабелей будет способствовать дальнейшему улучшению измерений коэффициента шума. В некоторых случаях, как было проиллюстрировано здесь реальными результатами измерений, применение внешних тюнеров, цепей подачи смещения и ответвителей измерительных портов может в значительной степени снизить джиттер и неравномерность характеристики, имеющей вид пульсаций, при измерениях коэффициента шума на частотах до 50 ГГц.

Для измерений в диапазоне частот 50–67 ГГц можно использовать стандартные приемники. Посредством добавления внешнего предусилителя и внешнего фильтра точные результаты могут быть получены во всем диапазоне измерения анализатора цепей серии PNA-X. 

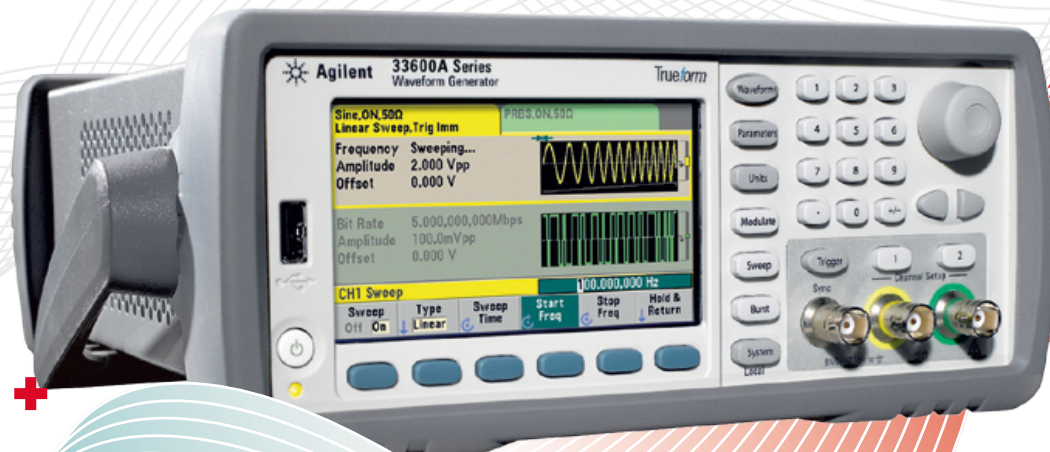


## Комментарий специалиста

Мир радиоэлектроники — это постоянное поле боя: за уменьшение массогабаритных показателей, снижение энергопотребления, повышение количества и качества информации. Коэффициент шума (КШ) является одним из ключевых показателей радиоэлектронных систем, влияющим на общую энергетику. В предыдущих номерах журнала «Эксперт +» мы подробно разбирали измерения КШ с помощью наиболее простого и экономичного метода измерения Y-фактора. Но для целого класса задач возможность применения и точности этого метода недопустимы. Одной из причин являются активно развивающиеся в последние годы разработка и производство отечественной электронно-компонентной базы, имеющей крайне высокие требования к проектируемым изделиям. Благодаря использованию векторных анализаторов цепей с малозумящими приемниками и другим новаторским решениям удается достигнуть беспрецедентной точности измерения КШ.



Никита Болдырев,  
руководитель направления  
радиоизмерительного оборудования  
ЗАО НПФ «Диполь»  
nb@dipaul.ru

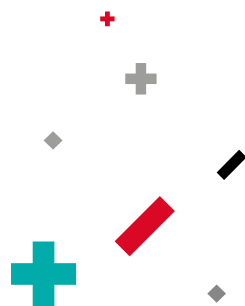


## Генераторы сигналов Keysight Technologies серии 33600A со склада «Диполь»

- Уникальная технология Trueform
- Уровень гармонических искажений в 5 раз ниже, чем у аналогичных приборов.
- Уровень джиттера составляет менее 1 пс.
- Амплитуда выходного сигнала - от 1 мВ до 10 В (размах) с разрешением 14 бит.
- Частота дискретизации до 1 Гвыб/с обеспечивает высокое разрешение по времени для сигналов произвольной формы.
- Объем памяти сигналов произвольной формы: 4 Мточек на канал в стандартной комплектации с возможностью расширения до 64 Мточек на канал.



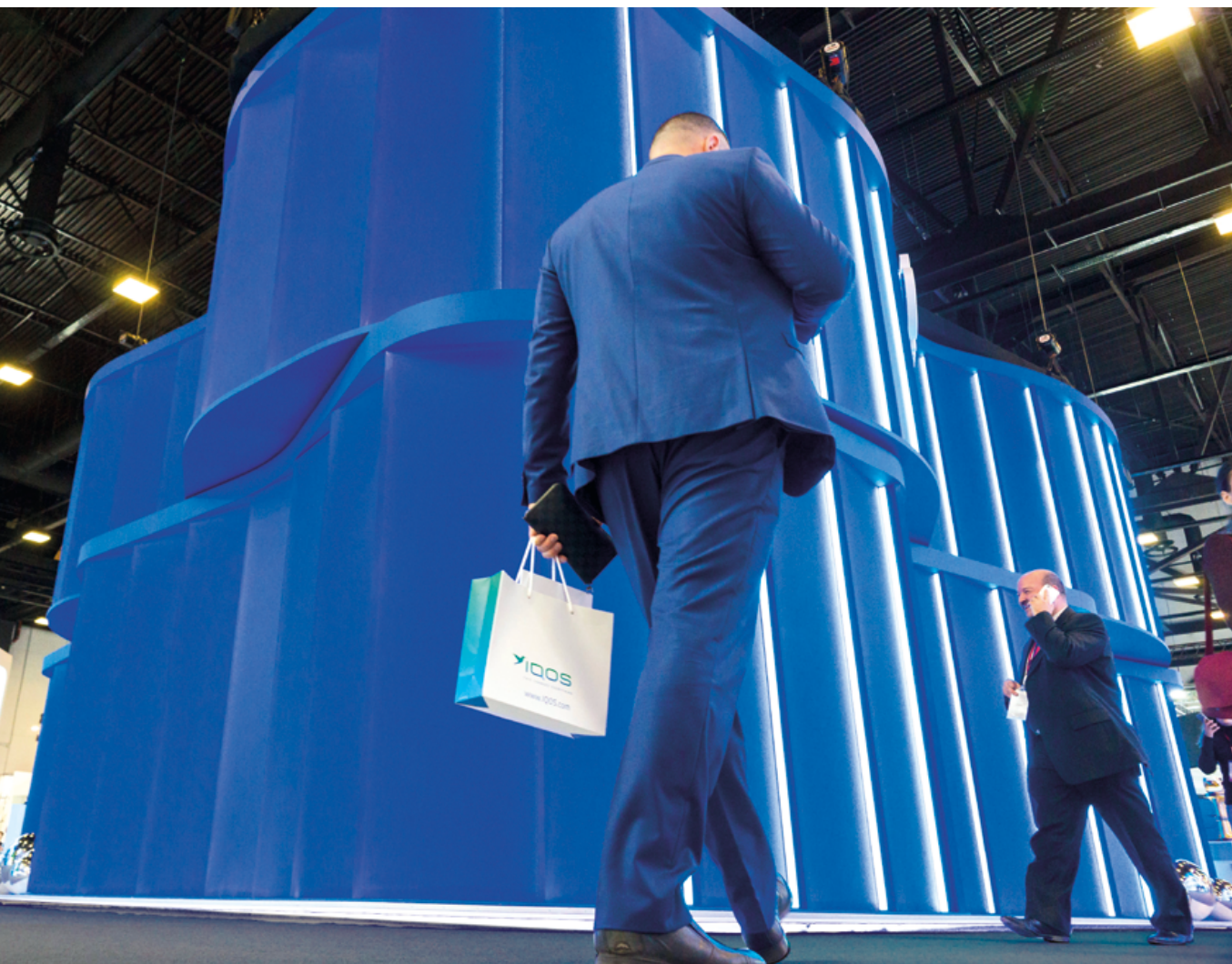
# Через прения к звездам?



Очередной Петербургский международный экономический форум — ПМЭФ-2018, собравший под свои знамена ведущих представителей делового мирового сообщества, проходил под девизом «Создавая экономику доверия». В ходе основной программы на площадках Форума состоялось более 150 мероприятий в рамках четырех тематических блоков: «Технологии для лидерства», «Россия: используя потенциал роста», «Человеческий капитал в цифровой экономике» и «Глобальная экономика в эпоху изменений».

Доверие — ключевой актив в мире бизнеса, и на Форуме обсуждались вопросы, связанные с этим аспектом деловой среды. Другими важными темами, красной нитью прошедшими через программу мероприятия, стали вопросы цифровой трансформации бизнеса и связанных в том числе с глобальной цифровизацией технологических прорывов ближайшего будущего.

Представители компания «Диполь» приняли участие в работе ПМЭФ и мы хотим поделиться некоторыми мнениями экспертов, отмеченными на площадках Форума.





## Новые лидеры в технологической сфере. Выйти на мировой рынок

Сегодня российские технологические компании способны создавать продукты высокого качества. В то же время на пути масштабирования бизнеса и повышения его эффективности отечественные хайтек-лидеры сталкиваются с вызовами, которые не всегда позволяют им выходить на глобальные

аудитории даже при наличии таких амбиций. Возможно ли переломить эту ситуацию с помощью российских экспортных инициатив? Какой должна быть поддержка для достижения точного и значимого эффекта? На какие международные рынки имеет смысл ориентироваться? Опыт каких стран может быть полезен?

### Ключевые выводы

#### Государство активно поддерживает высокотехнологичный бизнес

**МИХАИЛ АНТОНОВ, ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА, ДИРЕКТОР ПО РАЗВИТИЮ ИННОВАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ, ЧЛЕН ПРАВЛЕНИЯ, АО «РВК»:**

— Есть, на мой взгляд, в сегодняшней политике Российской Федерации два ведущих проекта, которые ориентированы на качественный рост технологической продвинутости России. Первый проект — «Цифровая экономика». Второй проект, который направлен именно на поиск команд и проектов в новых технологических сферах, — это проект «Национальная технологическая инициатива».

**ДМИТРИЙ ШУШКИН, ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР АВВУУ РОССИЯ:**

— В рамках взаимодействия и с Министерством по торгпредствам, и с РЭЦ мы активно сотрудничаем по целому ряду направлений. Полезная, хорошая деятельность.

#### Возрастает востребованность экспорта высокоинтеллектуальных продуктов

**КИРИЛЛ КАЕМ, СТАРШИЙ ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТ ПО ИННОВАЦИЯМ, ФОНД «СКОЛКОВО»:**

— Сам по себе объект экспорта становится настолько высокоинтеллектуальным, что, возможно, там не ракеты и танки будут интересны, а как раз единицы и нолики, которые через границы будут перемещаться.



Михаил Антонов



Дмитрий Шушкин



Кирилл Каем





## ДМИТРИЙ ШУШКИН:

— В первую очередь люди, — тем более, конечно, в зрелых экономиках — смотрят на ценность того, что вы предлагаете. Если это им позволяет получать в бизнесе какой-то выигрыш, выгоду, то им уже с этого момента начинает хотеться.

## Проблемы

### Высокотехнологичный экспорт из России растет недостаточно высокими темпами

ЕЛЕНА КУЗНЕЦОВА, ПАРТНЕР  
MCKINSEY & COMPANY:

— Сейчас высокотехнологичный экспорт из России составляет примерно 6 млрд 600 млн долларов. Это в два раза меньше, чем высокотехнологический экспорт Польши, или Индии, или Венгрии. Это примерно в 4 раза меньше, чем у Филиппин, в 9 раз меньше, чем у Малайзии.



Елена Кузнецова



Олег Духовницкий



Леонид Рейман

### Зависимость российского бизнеса от импортного оборудования

ОЛЕГ ДУХОВНИЦКИЙ, РУКОВОДИТЕЛЬ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО АГЕНТСТВА СВЯЗИ (РОССВЯЗЬ):

— С точки зрения спутникового оборудования технологии, к сожалению, к нам приходят, как и раньше, в большинстве своем из-за рубежа. С точки зрения полезной нагрузки большая часть оборудования как прежде, так и теперь поступает из-за границы. Да, доля постепенно падает.

## Решения

### Оптимизм и готовность учиться

ОЛЕГ ДУХОВНИЦКИЙ

— Надо быть оптимистом, постоянно учиться. Не стесняться учиться как у своих соперников, так и у своих подчиненных и умело работать в команде. И тогда все у нас получится.

ЛЕОНИД РЕЙМАН, ПРЕДСЕДАТЕЛЬ СОВЕТА  
ДИРЕКТОРОВ, ОАО «АНГСТРЕМ»:

— Чтобы выходить на мировые рынки, нужно быть оптимистом. Потому что если ты не веришь в то, что делаешь, ничего никогда и не достигнешь.

## Использование своих преимуществ для создания конкурентоспособного продукта

ДМИТРИЙ ШУШКИН:

— Нужно стараться делать лучше всех то, что ты делаешь, не хвататься за все подряд, сосредотачиваться в том, где ты можешь показать максимальное качество. И тогда, я думаю, это будет востребовано повсюду.

ЛЕОНИД РЕЙМАН:

— Наша задача — создать производственную инфраструктуру и постараться на ее базе найти тот самый правильный продукт, который будет востребован на Западе.



## Завоевание стабильных позиций на локальном рынке

АЛЕКСАНДР ХАНИН, ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР VISIONLABS:

— Выходя на новые рынки, выходя за рубеж нашей родной страны, родной локации, нужно, во-первых, быть спокойным, что на локальном рынке вы уже заняли какую-то долю, у вас есть финансовая подушка, то есть здесь вы достигли какой-то стабильности.



Александр Ханин

АЛЕКСЕЙ КАТКОВ, УПРАВЛЯЮЩИЙ ПАРТНЕР АФК «СИСТЕМА»:

— Если ты на локальном рынке не добился никакого признания и успеха, и в одном и в другом — и в b2b, и в b2c, то точно нет смысла идти куда-то.



Алексей Катков

## Развитие партнерской сети

АЛЕКСАНДР ХАНИН:

— Никаких денег, никаких инвестиций не хватит, чтобы самому обеспечить локальное присутствие во всех регионах интереса. Гораздо правильнее это делать с партнерами, которые знают местный рынок, у которых уже есть проекты.

## Тщательный анализ ситуации на рынке

АЛЕКСЕЙ КАТКОВ:

— Во-первых, нужно понять, это b2b или b2c. Если b2c, то, соответственно, каков шанс сделать лучший продукт и иметь деньги на его промо. Если это b2b-шный продукт, то понять, насколько токсичен данный продукт на рынке, какие могут быть возможные ухудшения ситуации.

## Создание эффективной модели госрегулирования высокотехнологичных отраслей

ЛЕОНИД РЕЙМАН:

— Государство должно поддерживать свои высокотехнологичные отрасли. Развитие высокотехнологичного сектора — очень важный фактор развития страны. Помимо традиционных вещей, типа финансирования или грантов, возможны и другие механизмы.



### КИРИЛЛ КАЕМ:

— По части проектов, касающихся, например, микроэлектроники, биологии, — без создания государственных платформ и инвестиций в государственные платформы, которые позволяют обеспечить командам базовые условия для разработки собственных продуктов, мы, к сожалению, будем эти команды терять.

### Взаимодействие высокотехнологичного бизнеса и промышленного производства

#### ЕВГЕНИЙ ТИМКО, СОСНОВАТЕЛЬ XPLORATION CAPITAL:

— Нельзя сказать, что российская промышленность слишком сильно отстала. Работая с ней, можно в принципе развивать, получать те компетенции, которые дальше будут востребованы и на Западе.



Евгений Тимко

### Привлечение международного бизнеса в российскую юрисдикцию

#### МИХАИЛ АНТОНОВ:

— Часть компаний, часть команд, часть лидеров будет уходить в те юрисдикции, в которых им комфортно развивать свой проект и свой продукт. Но и Россия должна стать привлекательной для тех компаний и команд, которые бы могли развивать свой продукт здесь, в России. В том числе и нормативное регулирование должно этому способствовать.



## Форкаст-2100. Какие технологии будут востребованы в будущем?

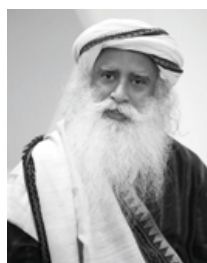
Прогресс современного общества невозможен без развития науки и техники, без внедрения и применения технологических инноваций. Стремительное развитие технологий во всех областях жизнедеятельности ставит новые вызовы перед человечеством. Революционные разработки в сфере медицины, компьютеров, энергетики, квантовой физики и космических путешествий меняют нашу жизнь и меняют курс цивилизации.



Каку Митио



Как изменится наша жизнь через 80 лет и что будет представлять собой мир в 2100 году? Как одним усилием воли будут управляться компьютеры, что произойдет с искусством, как мы станем подключаться к мировому информационному полю? Искусственные органы, летающие автомобили, невероятная продолжительность жизни и молодости — все это обоснованные прогнозы научного мира.



Садхгуру Джагги

### Ключевые выводы

**Мир будущего станет эпохой воплощения человеческой мечты о бессмертии**



КАКУ МИТИО, ПРОФЕССОР ФИЗИКИ,  
СОАВТОР ТЕОРИИ СТРУН, ФУТУРОЛОГ:

— Мысли и чувства станут материальными. В медицине мы не только боремся с болезнями, но и улучшаем, доводим до совершенства человеческое тело и выделяем гены, отвечающие за старение. Мы уже изолировали порядка 60 генов, ответственных за процесс старения, который пока еще необратим, но я считаю, что к 2100 году мы сможем добиться не только цифрового, но и биологического бессмертия. Мы сумеем возродить исчезнувших существ, существовавших на Земле десятки тысяч лет назад. У нас уже есть геном мамонта и неандертальца.

Интернет станет брейннетом, мозгонетом, мы сможем передавать ощущения, эмоции, чувства через Интернет. У животных мы уже можем передавать воспоминания.



САДХГУРУ ДЖАГГИ, ЙОГИН, МИСТИК,  
ОСНОВАТЕЛЬ ФОНДА «ИША»:

— Все, что можно создать из воспоминаний, может быть сделано. Все, что есть у вас в интеллекте, все это может сделать и машина. Не могу предсказать, когда именно, но это возможно. 90% человечества живет, основываясь на своем интеллекте и физиологических способностях, это можно пересоздать в машинах.

ДМИТРИЙ МЕДНИКОВ, ЗАМЕСТИТЕЛЬ  
ГЕНЕРАЛЬНОГО ДИРЕКТОРА, ФГУП  
«ВСЕРОССИЙСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ  
ТЕЛЕВИЗИОННАЯ И РАДИОВЕЩАТЕЛЬНАЯ  
КОМПАНИЯ» (ВГТРК):

— Дальнейшее развитие будет в первую очередь связано с фантазией. Инвестиции в трансформацию разума — это и будет перспектива технологического развития. А сейчас технологии нужны для того, чтобы уменьшить количество времени, которое человек тратит на тот или иной преимущественно физический труд.

### Ключевые технологии будущего зарождаются в настоящем

#### КАКУ МИТИО:

— Три фактора, определяющих будущее: искусственный интеллект, биотехнологии и нанотехнологии. В целом они станут работать для роста благосостояния и процветания.

Искусственный интеллект, как мне кажется, сформирует отрасль крупнее нынешней автомобильной. Автомобиль сам станет роботом. Опасность в том, что роботы когда-нибудь осознают себя.

У нас будет солнечная энергия, которая дешевле, чем ископаемая энергия, благодаря революционным разработкам в технологиях хранения энергии. Предполагается, что уже к середине века появится и первый термоядерный реактор.

У нас будет сверхзвуковой коммерческий транспорт, первые прототипы появятся уже в 2025 году. Уже есть чертежи и наработки для создания сверхзвуковых самолетов, которые не будут испытывать перегрузки, аналогичные тем, из-за которых разрушился «Конкорд».



Дмитрий Медников





## Проблемы

### Бесконтрольное технологическое развитие несет угрозу человечеству

САДХГУРУ ДЖАГГИ:

— Машины уже представляют опасность. Автомобили убивают больше людей, чем умирает в войнах каждый год. Это колоссальный урон, который мы принимаем. И ужасно, что можно уже нажать кнопку и стереть с лица целый город.



Дмитрий Морозов



Софико Шеварднадзе

КАКУ МИТИО:

— К концу века нужно будет встроить в роботов чип, который их отключает, если они хотят убить человека, — такое предохранительное устройство. Когда роботы станут настолько умными, чтобы отключать это устройство, нам надо будет слиться с ними. Не думаю, что это произойдет в нынешнем веке, но в следующем это вполне возможно. Вместо того, чтобы воевать с ними, можно стать сверхлюдьми.

### Технологическое познание мира ограничено

ДМИТРИЙ МОРОЗОВ,  
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР, BIOCAD:

— При помощи всевозможных технологий мы исследуем природу, и фактически мы с ней на «вы». Пытаемся на основе своих технологических знаний о природе вещей понять то, что понять невозможно. Используя технологический подход, мы все равно будем отставать на много шагов от того, как в принципе должны жить.



### Технологии не отменяют поляризацию общества

ДМИТРИЙ МЕДНИКОВ:

— Тот, кто придумывает идеи и будет формировать партнеров-роботов, тот и будет человеком, как бы технологически он ни был устроен. Кто придумывает категории, тот и контролирует мир.

СОФИКО ШЕВАРДНАДЗЕ,  
ЖУРНАЛИСТ, ТЕЛЕВЕДУЩАЯ:

— Есть масса людей, которые нуждаются в лекарствах, но не могут себе позволить купить их, у них нет денег на вакцины, при этом есть фармлобби, поднимающие цены.



### ДМИТРИЙ МОРОЗОВ:

— Мир несправедлив изначально, он таким создан, я не верю во всеобщую справедливость, это заложено в природе человека. Высокотехнологичное лечение останется пока уделом богатых людей, и продление жизни тоже.

### Развитие технологий уменьшает значение межличностного общения



### СОФИКО ШЕВАРДНАДЗЕ:

— Прогресс технологический и прогресс коммуникационный влечет за собой тотальное одиночество. Сейчас люди могут общаться, находясь в разных концах мира, но при этом они все больше и больше замыкаются в себе. Проблема в том, что люди перестают нуждаться друг в друге.

## Решения

### Доступность знаний должна служить миру и демократии



#### КАКУ МИТИО:

— Интернет распространяет демократию: чем более образованны люди, тем больше сил они чувствуют, и это распространяет концепцию демократии. Будем надеяться, что с распространением Интернета войн станет меньше.

### Контроль над технологиями необходимо сохранять

#### КАКУ МИТИО:

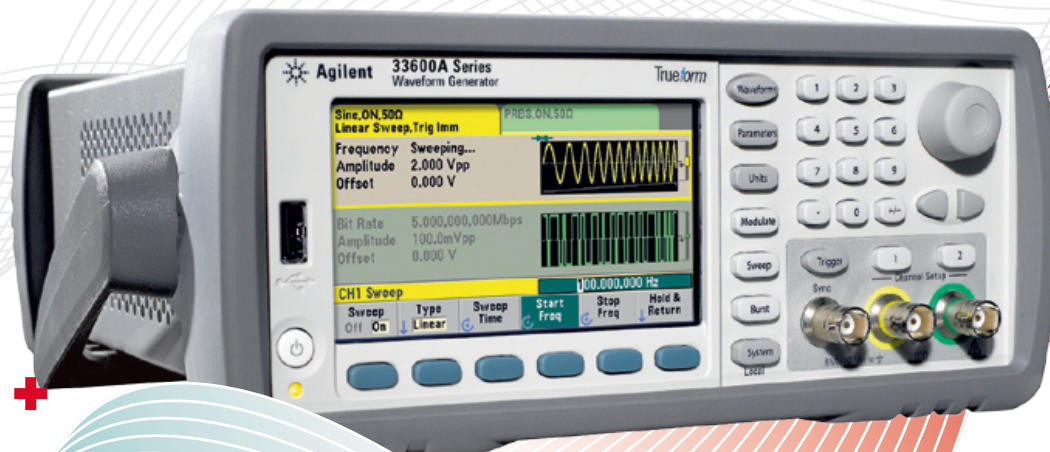
— Любая технология — обоюдоострый меч. Ее можно использовать против болезней, неграмотности, бедности — и против людей. Поэтому мы должны быть уверены в том, что мы контролируем эти мощные технологии.

### Образование поможет сохранить человеческое общество

#### КАКУ МИТИО:

— Ключом ко всему является образование. Мы должны образовывать людей так, чтобы общества не раскалывались на маленькие группы, воюющие друг с другом.





## Генераторы сигналов Keysight Technologies серии 33600A со склада «Диполь»


- ✓ Уникальная технология Trueform
- ✓ Уровень гармонических искажений в 5 раз ниже, чем у аналогичных приборов.
- ✓ Уровень джиттера составляет менее 1 пс.
- ✓ Амплитуда выходного сигнала - от 1 мВ до 10 В (размах) с разрешением 14 бит.
- ✓ Частота дискретизации до 1 Гвыб/с обеспечивает высокое разрешение по времени для сигналов произвольной формы.
- ✓ Объем памяти сигналов произвольной формы: 4 Мточек на канал в стандартной комплектации с возможностью расширения до 64 Мточек на канал.



# А теперь для протокола

Проблемы тестирования на соответствие стандарту LoRaWAN





LoRaWAN является быстроразвивающейся и относительно новой беспроводной технологией, предлагаемой союзом LoRa Alliance для беспроводных сетей связи дальнего радиуса действия. Широкие возможности технологии LoRa не только делают ее очень привлекательной для реализации разнообразных задач в области «Интернета вещей», но и влекут за собой более строгие требования к тестированию, призванному обеспечить как соответствие LoRaWAN-устройств стандарту, так и возможность их эксплуатации в течение не менее 10 лет.

## Обзор

LoRaWAN - это двунаправленный протокол со сквозным шифрованием, который работает с использованием расширения спектра методом линейной частотной модуляции (CSS) в субгигагерцовых региональных ISM- и минимально лицензируемых диапазонах частот. LoRa Alliance - это открытая некоммерческая организация, членами которой являются более 500 компаний, в том числе IBM, Cisco, Orange, Renesas, Semtech, Arduino, Microchip, ST Microelectronics и ARM. Столь широкая поддержка этой технологии в отрасли означает ее поддержку во всем мире, поэтому уже сегодня насчитывается более 350 пробных эксплуатаций и внедрений.

## Основные особенности

Технология LoRaWAN обещает большую дальность действия: 25–50 км вне помещений, а также очень хорошие показатели проникновения внутри зданий, что позволяет применять ее в разнообразных строениях, на подвальных этажах и в гаражах. Абонентские устройства обычно работают с низкими скоростями передачи данных, в их состав входят недорогие датчики и аккумуляторы со сроками службы более 10 лет, а в некоторых случаях и до 20 лет.

LoRaWAN представляет собой масштабируемую технологию, которая поддерживает устройства для частного и общедоступного применения с относительно небольшой инфраструктурой по сравнению

с другими решениями, например технологией сотовой связи. Она включает эталонное оборудование и эталонные разработки, в некоторых из них используется программное обеспечение с открытым исходным кодом. Дополнительно она имеет функцию определения географического местоположения, не основанную на работе системы глобального позиционирования (GPS). Возможность определения местоположения без GPS очень важна, поскольку применение GPS может приводить к значительному расходу заряда аккумуляторной батареи. Определение местоположения с помощью LoRaWAN гораздо менее точно по сравнению с GPS; оно основано на алгоритме различения моментов поступления сигнала, позволяющем определять местоположение с точностью до ближайшего городского квартала.

## Небольшая мощность


LoRaWAN обладает двумя отличительными свойствами, позволяющими повысить продолжительность работы аккумуляторных батарей в отдаленных узлах сети, что зачастую является ключевым преимуществом этой технологии. Во-первых, применяемая в LoRaWAN модуляция CSS позволяет работать с уровнями на 25 дБ ниже уровней мощности сигналов помех, при этом шлюзы по-прежнему принимают полезный сигнал. Во-вторых, в LoRaWAN используется адаптивный алгоритм скорости передачи данных, который для оптимизации времени излучения настраивает скорость передачи данных конечного узла в зависимости от его удаленности от шлюза.

## Цели испытаний

Поскольку большинство предлагаемых LoRaWAN преимуществ связано с применяемой технологией радиосвязи высокой сложности и продолжительным временем автономной работы ее устройств, тщательные испытания этих устройств на этапах исследований и разработки, проверки и производства чрезвычайно важны. Недорогие конечные устройства делают технологию LoRaWAN популярной в тех областях, где необходимо большое количество датчиков. Стоимость установки датчиков может значительно превышать стоимость самих устройств, и заказчики могут требовать продолжительных гарантийных сроков, подтверждающих их успешное применение в течение длительного времени. Ошибки микропрограммного обеспечения или дефект аппаратной части конечного устройства, приводящие к чрезмерному расходованию заряда аккумулятора, способны погубить экономическую эффективность проекта. Таким образом, крайне важно обеспечить соответствие разрабатываемого LoRaWAN-устройства требованиям стандарта по следующим параметрам:

- соответствие требованиям определяющих нормативных документов, регулирующих использование радиочастотного спектра;
- характеристики передачи ВЧ-сигнала;
- характеристики приема ВЧ-сигнала;
- продолжительное время работы от аккумуляторных батарей.





## Соответствие требованиям нормативных документов, регулирующих использование радиочастотного спектра

Каждое радиоустройство должно соответствовать различным нормативным документам, и, например, в США использование в протоколе LoRaWAN технологии CSS означает, что оно должно отвечать требованиям Федеральной комиссии по связи FCC, часть 15.247, которые применяются к осуществляемым в нелицензируемых радиоустройствах передачам с дискретной перестройкой несущей частоты и расширением спектра. LoRaWAN-устройства необходимо тестиро-

вать в режимах цифровой модуляции и расширения спектра, а также в смешанном режиме, при котором используются аспекты как цифровой модуляции, так и расширения спектра. Компания Semtech, поставщик аппаратных средств стандарта LoRaWAN, предлагает разнообразные рекомендации по применению, призванные помочь разработчикам и изготовителям обеспечить соответствие устройств нормативным требованиям FCC.



## Характеристики передачи ВЧ-сигнала

Качество выполняемой устройством передачи важно для обеспечения длительного времени работы аккумуляторной батареи. Если пакет данных не принят, его следует отправлять повторно, а это влечет за собой расход заряда аккумуляторов передающего и принимающего устройств. Все, что необходимо, — это относительно несложная установка, в которой имеется программное обеспечение для отправки последовательностей специальных тестовых сигналов на тестируемое устройство и анализатор сигналов для измерения параметров сигнала, передаваемого тестируемым устройством. В качестве анализатора сигналов можно использовать анализатор сигналов серии X, например N9020B MXA компании Keysight (рис. 1), или анализатор сигналов в формате PXI. Кроме того, можно расширить возможности анализатора сигналов за счет программного обеспечения, позволяющего выполнять измерения качества модуляции.



Рис. 1. Анализатор сигналов N9020B серии MXA компании Keysight

Ниже приведены некоторые ключевые параметры, проверяемые в ходе тестирования LoRaWAN-устройств согласно FCC, часть 15.247:

- выходная мощность:  $\leq 30$  дБм;
- полоса пропускания по уровню 6 дБ:  $> 500$  кГц в режиме цифровой модуляции;
- спектральная плотность мощности:  $\leq 8$  дБм в любой полосе частот шириной 3 кГц;
- полоса пропускания по уровню 20 дБ:  $\leq 500$  кГц для канала с дискретной перестройкой несущей частоты;
- мощность паразитных излучений на несущей частоте:  $\leq -43$  дБм от 10 МГц до десятой гармоники несущей частоты передатчика;
- тесты характеристик передатчика в режиме частотной манипуляции, основанные на измерении отклонений девиации частоты и частоты несущей.





## Характеристики передачи ВЧ-сигнала

Поскольку в LoRaWAN используются сигналы небольшой мощности, важно проверять точность настройки чувствительности приемника и правильность выполнения приемным устройством демодуляции сигнала и фильтрации всех помех, в том числе внутриканальных и межканальных. Такие тесты можно проводить с помощью программного обеспечения Signal Studio компании Keysight, которое позволяет управлять генератором сигналов и формировать сигналы стандарта LoRaWAN. В качестве генератора для таких испытаний можно использовать векторный генератор сигналов N5182B серии MXG компании

Keysight (рис. 2) или модульный генератор сигналов в формате PXI. В любом из этих случаев сигнал ослабляют с помощью аттенюатора до очень низкого уровня мощности и передают на LoRaWAN-устройство, принимающее этот сигнал. Тестируемое устройство стандарта LoRaWAN обычно запускается вместе с испытательным программным обеспечением компании Semtech, которое работает с сигналом повторяющейся произвольной формы от генератора в качестве испытательного сигнала и подсчитывает число пакетов, принятых правильно, и число пакетов с ошибкой.



Рис. 2. Векторный генератор сигналов N5182B серии MXG компании Keysight





Для технологии LoRaWAN крайне важны испытания чувствительности приемника при различных коэффициентах расширения спектра. Также необходимо убедиться в том, что в присутствии сигнала помехи уровень чувствительности приемника не придется поднимать больше чем на 3 дБ.

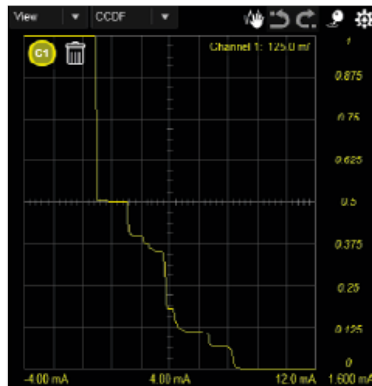


Рис. 3. Нумулятивная интегральная функция распределения (CCDF)

## Измерение разряда батареи с помощью анализатора питания постоянного тока

Поскольку продолжительная работа аккумуляторной батареи является ключевым аспектом многих областей применения технологии LoRaWAN, важно располагать правильными и точными результатами измерений текущего потребления. Более того, необходимо знать потребление заряда для каждой операции LoRaWAN-устройства и учитывать это при разработке микропрограммного обеспечения.

При переходе из состояний с низким потреблением мощности (спящий режим, бездействие, приостановленные процессы и т. д.) в режимы работы (прием, передача или технологический) значение потребляемого конечным LoRaWAN-устройством тока будет, вероятно, изменяться на несколько порядков. Таким образом, важно иметь возможность выполнять измерения в широком динамическом диапазоне без неоднородностей, связанных с переключением диапазонов. Например, если наибольший рабочий ток устройства или его компонента в 250 000 раз больше тока в режиме с наименьшим потреблением, для охвата такого диапазона АЦП необходимо разрешение 18 бит. Если требуется точность 1%, понадобится еще семь дополнительных битов, всего в сумме 25 бит.

Большинство измерительных приборов не способны обеспечить такое требование в едином диапазоне измерений, поэтому лучше остановить свой выбор на приборе с автоматическим выбором диапазона измерений. Это анализатор питания постоянного тока N6705C (рис. 4) с модулем источника/измерителя N6781A или N6785A компании Keysight. Автоматический выбор диапазона измерений в анализаторе N6705C обеспечивает эквивалент 28-битного динамического диапазона без неоднородностей, связанных с переключением диапазонов.



Рис. 4. Анализатор питания постоянного тока N6705C компании Keysight

Анализатор питания N6705C можно использовать вместе с программным обеспечением управления и анализа Keysight 14585A для анализа кумулятивной функции распределения (CCDF, показана на рис. 3). CCDF используется для анализа потребления тока в LoRaWAN-устройствах. Ее график по осям X и Y наглядно отображает, насколько часто LoRaWAN-устройство работает при различных уровнях потребляемого тока.

## Измерение разряда батареи с помощью анализатора формы токовых сигналов, потребляемого устройством

Анализатор формы токовых сигналов устройств серии CX3300 компании Keysight (рис. 5) представляет собой еще одно полезное средство измерений разряда батареи в LoRaWAN-устройствах. С его помощью можно измерять

ток вплоть до 100 нА с полосами пропускания до 140 МГц. Благодаря широкой полосе пропускания данный анализатор формы токовых сигналов идеален для измерений кратковременных импульсов.

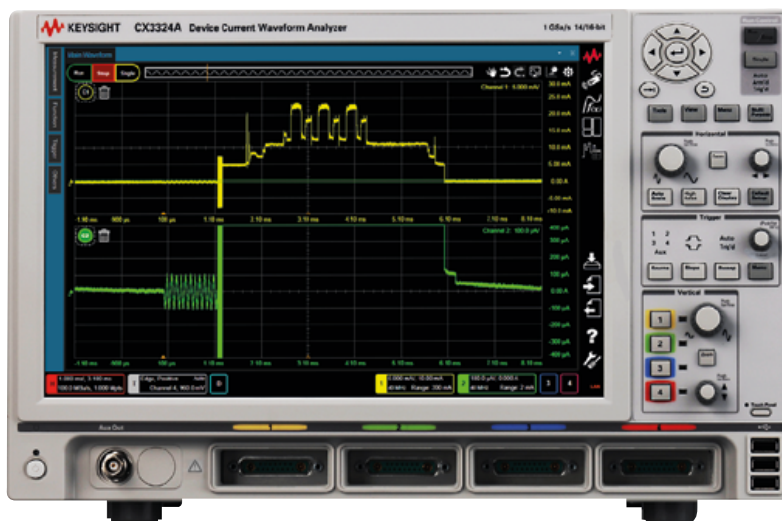


Рис. 5. Анализатор формы сигнала тона Keysight CX3324A

В дополнение к возможности отображения CCDF в анализаторе формы токовых сигналов предусмотрена автоматическая регистрация профиля тока (рис. 6). Этот прибор автоматически разделяет форму токовых сигналов на сегменты в зависимости от уровней тока, и для каждого

сегмента вычисляет разнообразные статистические характеристики. Кроме того, можно добавлять, удалять и перемещать отметки сегментов для выполнения специальных измерений и получения статистических характеристик, которые значительно выходят за рамки автоматических измерений.



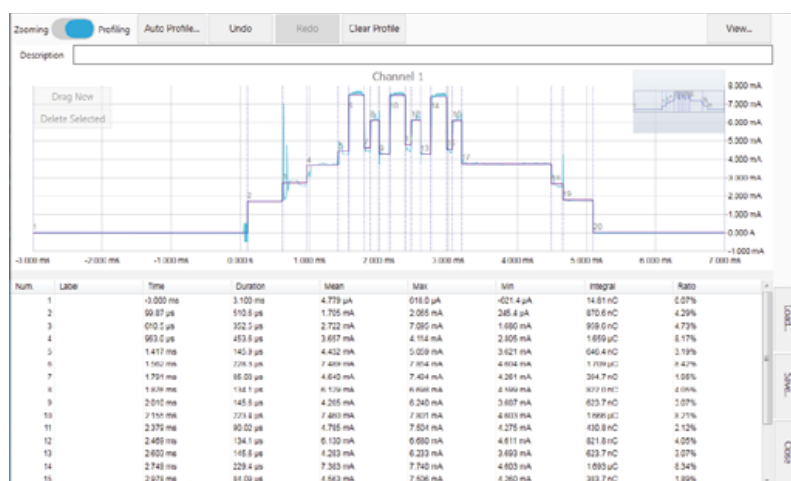


Рис. 6. Пример работы автоматического профилировщика потребления тока

## Заключение

LoRaWAN — технология современных энергоэффективных глобальных сетей (LPWAN), которая действует на низких скоростях передачи данных в целях обеспечения высокой помехоустойчивости, обширного покрытия и продолжительной работы аккумуляторных батарей. Для обеспечения экономической эффективности применения технологии LoRaWAN необходимо выполнять тщательное

тестирование LoRaWAN-устройств, чтобы убедиться в том, что их характеристики приема и передачи соответствуют требованиям FCC, часть 15.247, а срок службы батареи отвечает ожиданиям заказчика и составит не менее 10 лет.

(Подготовлено на основе материалов компании Keysight)

# Подключение к мощности

Параллельное подключение источников питания  
для увеличения мощности без ухудшения  
рабочих характеристик



Алексей Телегин,  
ведущий блога по источникам питания  
Keysight Technologies

Мы продолжаем знакомить читателей с материалами, посвященными базовым понятиям и подходам в использовании источников питания (ИП), современным решениям в данной области и уникальным функциям, помогающим решить самые сложные задачи, возникающие при тестировании. В этом номере ведущий раздела по системам электропитания объединенного блога Keysight Technologies в России Алексей Телегин обсуждает особенности параллельного подключения ИП.

Различные варианты подключения ИП помогают пользователю решать конкретные прикладные задачи. Известны схемы последовательного подключения ИП для получения большего напряжения, а также параллельного подключения — для получения большего тока (следует отметить, что схемы сопровождается список требований и мер предосторожности). Вопрос «Как получить больше мощности от источников питания?» не теряет своей актуальности.

Параллельное подключение нескольких источников питания для увеличения напряжения связано с определенными проблемами, поскольку между источниками всегда будет наблюдаться некоторый дисбаланс напряжений. Поэтому один блок является источником напряжения, а остальные блоки соединены параллельно и работают в режиме стабилизации тока.

Для поддержания такого режима предел выходного напряжения всех источников питания, действующих в режиме стабилизации тока (CC), должен быть установлен на большее значение, чем в ведущем источнике питания, находящемся в режиме стабилизации напряжения (CV) (схема на рис. 1). При сохранении высокого уровня нагрузки параллельно соединенные блоки работают в соответствующих режимах (в данном случае как минимум 2/3 нагрузки). Но что произойдет, если не удастся поддерживать высокий уровень нагрузки?

На самом деле при таком подходе можно работать и при меньших нагрузках. В этом случае необходимо установить одинаковый уровень напряжения на всех блоках. Теперь при полной нагрузке блоки будут работать по той же схеме (см. выше), а блок с самым низким значением напряжения — в режиме стабилизации напряжения. Однако при снятии нагрузки более низковольтные блоки перейдут в нестабилизированный режим работы, а блок с наибольшим напряжением будет сохранять общую выходную мощность в режиме стабилизации напряжения.

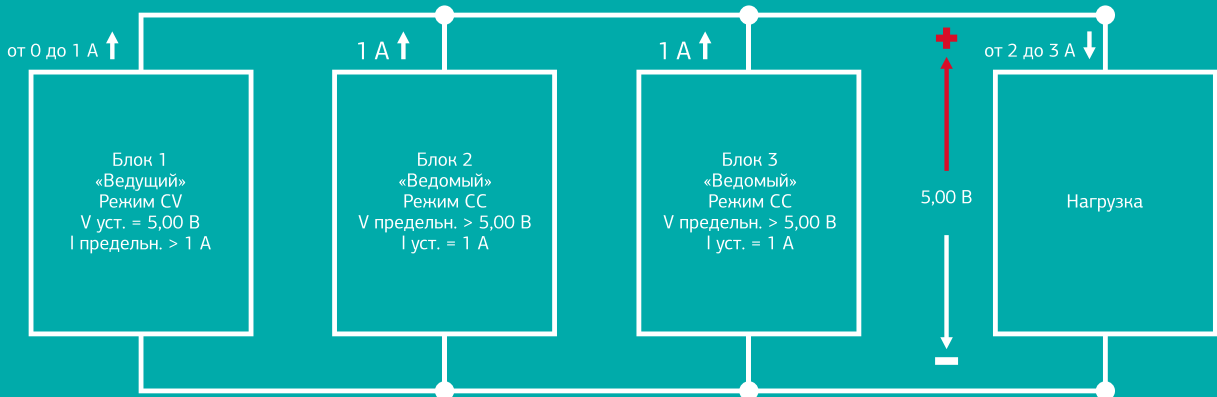


Рис. 1. Параллельное подключение источников питания для получения большей мощности



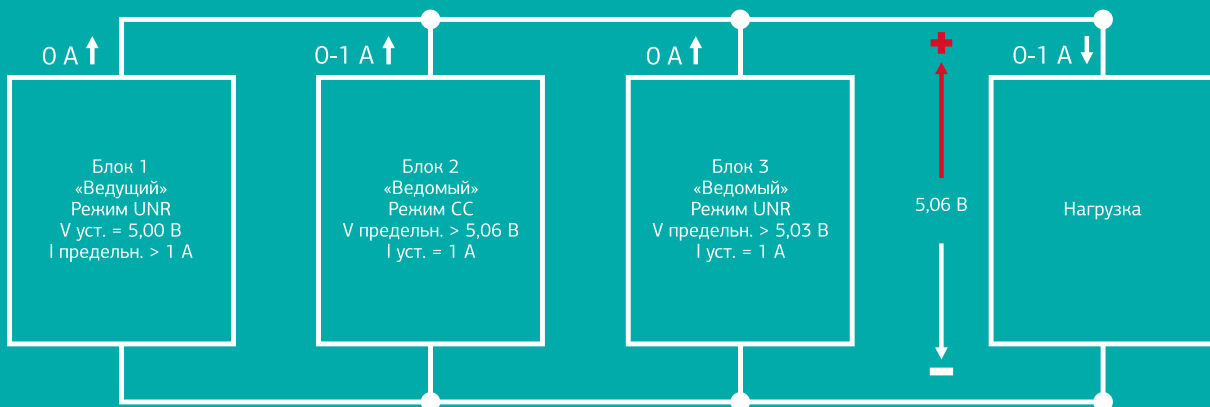


Рис. 2. Состояния параллельно подключенных источников питания при малой нагрузке



Эта схема показана на рис. 2 для нагрузки в пределах 0–1/3. В результате наблюдается небольшое ухудшение рабочих характеристик. Переход между предельными значениями наименьшего и наибольшего напряжения влияет на регулирование напряжения. Кроме того, поскольку разным блокам питания приходится переключаться между режимами стабилизации напряжения, стабилизации тока и нестабилизированным режимом работы, значительно страдают характеристики напряжения переходных процессов.



Усовершенствованная версия метода параллельного подключения заключается в создании схемы «ведущий-ведомый» с управляющими сигналами для распределения тока между блоками.

В источниках питания Keysight серии N5700A и N8700A реализована схема управления, приведенная на рис. 3. При такой схеме подключения ведущий блок, работающий в режиме стабилизированного напряжения, выдает аналоговый выходной сигнал программирования по току ведомому блоку, действующему в режиме стабилизации тока. Соответственно, оба блока равномерно распределяют ток нагрузки в широком диапазоне.

Тем не менее схема из нескольких блоков, в которой только один блок работает в режиме стабилизации напряжения, не обеспечивает такой же хорошей динамической характеристики, как один источник напряжения большей мощности. В источниках питания производительной системы питания Keysight Advanced Power System (APS) серии N6900A/N7900A реализован уникальный инновационный подход, обеспечивающий безупречное функционирование параллельно подключенных блоков питания без ухудшения рабочих характеристик.

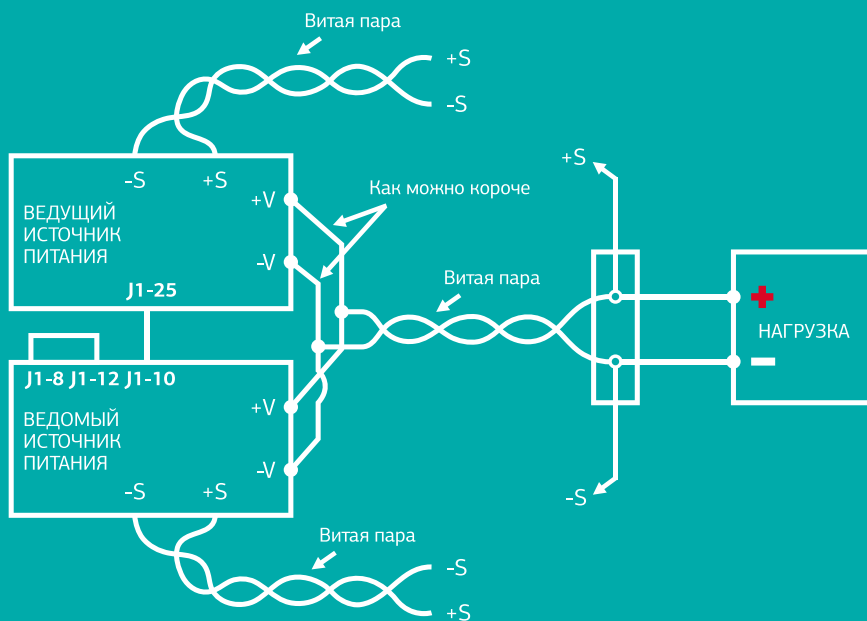


Рис. 3. Параллельное подключение N5700A (используется измерение по 2-проводной схеме)

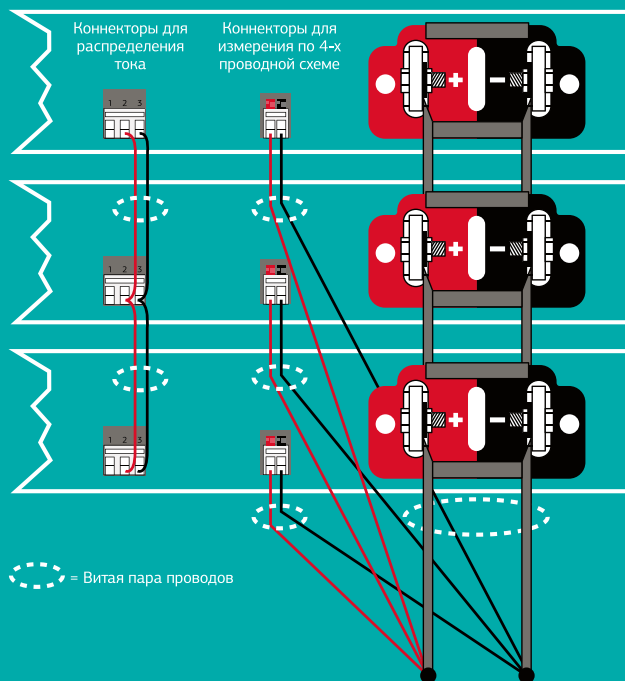



Рис. 4. Параллельное подключение источников питания APS серии N6900A/N7900A

На рис. 4 показана схема параллельного подключения блоков Keysight APS серии N6900A/N7900A. В схеме параллельного подключения источников питания APS серии N6900A/N7900A также используется аналоговый управляющий сигнал для приведения в действие механизма распределения тока.

При этом в данной схеме отсутствуют ведущее и ведомые устройства. Все блоки находятся в режиме стабилизации напряжения при равномерном распределении тока. Это позволяет пользователю легко рассчитать размеры и параметры планируемой системы электропитания без необходимости учитывать возможное ухудшение рабочих характеристик. 



Ссылка на блог Keysight Technologies в России

**ОДИН — ДАЖЕ**

**ЕСЛИ ОЧЕНЬ ВАЖНЫМ —**

**НЕ ЦЕЛЫМ ЧАСТЯМ  
ПРОСМОТРЕТЬ  
АВТОМОБИЛЬ**

Управление несколькими вибростендами при использовании методов ММО (много входов измерения, много выходов управления) для проведения транспортных испытаний большого размера объектов

**ТЕМ БОЛЕЕ ГРУЗОВИК  
МНОГОМОНДАЖНЫЙ**





Текст подготовлен:  
Григорий Романенко,  
глава представительства фирмы  
«Брюль и Кьер» в РФ

Клар Флинн (Claire Flynn),  
Алекс Уильямсон (Alex Williamson),  
Тим Бидвелл (Tim Bidwell), компания Brüel & Kjær VT5



Испытания с использованием нескольких вибростендов с воздействием в одном направлении могут повысить качество проводимых работ, но такая «добавленная сложность» должна учитываться на ранних этапах проектирования испытательной вибрационной установки.

В настоящее время наблюдается рост потребности использования вибростендов для транспортных испытаний все более крупных и сложных по структуре объектов, чтобы заменить комплексные дорожные испытания. В таких случаях объединение нескольких вибростендов для совместной работы по одной оси может быть лучшим решением, чем попытка использования одного, большего по размеру и мощности вибростенда. Этот метод все чаще применяется в качестве стандартизованного подхода, в частности при испытаниях по стандарту MIL-STD-810 на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам.

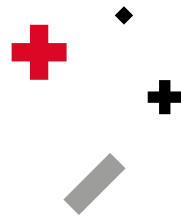


При проведении испытания с использованием нескольких источников возбуждения для воздействия по одной оси (MESA) существует два основных метода управления вибрацией, каждый из которых имеет свои плюсы и минусы в зависимости от применения. Эти методы используют:

- подачу общего задающего сигнала на все вибростенды;
- подачу разных задающих сигналов на каждый вибростенд.

Последний способ предусматривает применение MIMO-системы управления виброиспытаниями и должен учитывать выбор вибростендов, акселерометров, крепежной оснастки и даже технических знаний персонала. Эти вопросы требуют проработки на самых ранних этапах проектирования новой испытательной вибрационной установки, чтобы обеспечить ее оптимальное функционирование и понимание рабочих возможностей.

В статье содержится практическая информация по использованию метода тестирования с несколькими вибростендами MIMO для транспортных испытаний больших объектов и предлагаются указания для реорганизации испытательных систем с одним вибростендом в системы с несколькими вибростендами. Эти сведения получены в ходе сотен часов проведения реальных испытаний при воздействии гармонической и широкополосной случайной вибрации с использованием 420-кН системы, состоящей из четырех вибростендов LDS V9 в горизонтальном и вертикальном исполнении. Статья также содержит практические соображения инженеров-испытателей и руководителей испытаний при разработке и проектировании стенда для проведения MIMO-виброиспытаний нагрузок большого размера.

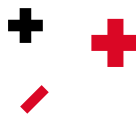


## 1. Введение

Испытания с использованием одного вибростенда с воздействием по одной оси — это надежно отработанный метод для проведения вибрационных испытаний. Но все чаще возникают ситуации, когда применение нескольких вибростендов может стать более рациональным решением. На первый взгляд может показаться, что работа МИМО-системы с несколькими вибростендами сходна с действием системы с одним вибростендом с тем лишь отличием, что вибраторов больше и предусмотрена другая система управления вибрационными испытаниями. Как правило, производители испытательного оборудования предоставляют информацию по отдельным компонентам, таким как вибратор, МИМО-контроллер, оснастка или акселерометры, в рамках общего решения. Однако при МИМО-вибрационных испытаниях возникают системные взаимодействия, которые следует учитывать в целом, на самых ранних этапах проектирования новой испытательной вибрационной установки, чтобы обеспечить ее оптимальную эксплуатацию и понимание рабочих возможностей.

В последующих разделах содержатся в том числе рекомендации по созданию комплексного решения МИМО-системы. Они включают указания по выбору испытательного оборудования и оснастки, а также по использованию расширителей и столов скольжения. Однако, поскольку МИМО-испытания — это более сложная область, чем испытание с одним вибростендом, в статье даны методические рекомендации по контуре управления как по выбору акселерометра, так и по самой стратегии управления, указаны различные факторы, на которые следует обращать внимание при контроле многоточечного возбуждения/отклика (МИМО) по сравнению с управлением вибра-

ционным возбуждением по одному выходу. Кроме того, представлен опыт использования методов быстрой оптимизации контроля испытаний для соответствия условиям испытательного центра, включая ключевые параметры оборудования, имеющие заметное влияние на достигнутый уровень контроля. Также в статье показаны возможная оценка результатов и отчеты по испытаниям в соответствии с регламентами стандарта MIL-STD-810 G (метод 527 и 514.6) и даны предложения по дополнительному анализу данных, который создает представление о резонансном поведении полезной нагрузки.



**Тип и количество вибростендов, выбранных для вибрационной МИМО-системы, зависит от размера и формы полезной нагрузки, а не только от типа проводимого испытания**



## 2. Рекомендации по выбору испытательного оборудования и крепежной оснастки

Тип и количество вибростендов, выбранных для вибрационной МИМО-системы, зависит от размера и формы полезной нагрузки, а не только от типа проводимого испытания. Поэтому на самых ранних этапах проектирования системы важно учитывать распределение массы полезной нагрузки и вероятные динамические характеристики. И хотя возможно совместное использование различных типов вибростендов с МИМО-контроллером вибрации, необходимо помнить, что чем меньше сложность внутрисистемного взаимодействия, которым придется управлять, тем лучше управление. Поскольку наземная полезная нагрузка, скорее всего, имеет собственную сложную динамику, остальная система должна быть минимальной сложности.

Поэтому при выборе типа вибростенда следует рассмотреть наихудшие условия распределения массы для выработки общих требований к системе. Менее очевидно для тех, кто привык использовать в испытаниях только один вибростенд, то, что применение многоточечного управления, обычного для испытаний с помощью одного вибростенда, не является стандартным подходом к управлению многоточечным возбуждением/откликом — МИМО. Вместо этого обычно предпочитают матричное управление, где количество контрольных датчиков равно количеству вибростендов. Так же, как и для одноточечного управления одного вибростенда, это означает, что контрольные точки могут проходить через частоты резонанса и антире-

зонанса (узлов) в пределах частотного диапазона испытания. Поэтому целесообразно выбирать вибростенды большей мощности, выходящей за рамки теоретических расчетов.

Особое внимание следует уделить методу крепления полезной нагрузки. Использование расширителей и столов скольжения приводит к дополнительному динамическому воздействию (и потому — к сложности в управлении), чего следует избегать. Однако на практике, при проведении испытаний нагрузок различных форм и размеров, горизонтальные и вертикальные столы зачастую просто необходимы. Система управления виброиспытаниями предполагает линейную зависимость уровня возбуждения для режимов предварительного тестирования с низким уровнем, где могут преобладать фрикционные



эффекты и шум сигнала, и более высоких уровней полного испытания, где фрикционный и шумовые эффекты ничтожны. Поэтому все динамические движущиеся элементы системы вибростенда нужно выбирать таким образом, чтобы минимизировать трение и избежать перевозбуждения системы на низких частотах. Подробней ситуации, подпадающие под это описание, рассмотрены в разделе 4.1. Динамические характеристики полезной нагрузки также являются важным фактором. Тяжелая полезная нагрузка большого размера испытывает

расширение под воздействием тепла, статическое провисание, динамический изгиб и скручивание. При испытаниях с использованием одного вибростенда эти силы часто компенсируются, так что на вибростенд воздействуют силы или моменты с минимальным значением. Для сравнения: при использовании системы из нескольких вибростендов велика вероятность присутствия результирующей силы или момента, которые воздействуют на каждый вибростенд или иную структуру вибрационной системы, как показано на рис. 1.

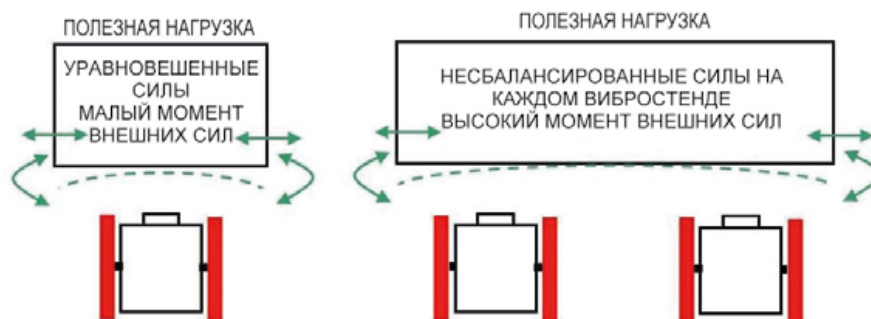


Рис. 1. Воздействие динамических свойств полезной нагрузки на один вибростенд и систему из нескольких вибростендов

Передачу реактивных сил, возникающих в ответ на резонанс полезной нагрузки в систему вибростенда, можно сократить за счет жесткости оснастки. Оснастка, спроектированная с высоким коэффициентом пе-

редачи по оси возбуждения и в то же время угловой и поперечной податливостью, может до минимума уменьшить величину момента, который должна испытывать вибрационная система. Поэтому важно принять

во внимание и рассчитать степени свободы системы непосредственно с начала ее проектирования.

### 3. Защита системы

Хотя механическая конструкция испытательного оборудования является важной гарантией выдерживания воздействий значительных реактивных сил, сопутствующих испытаниям наземных полезных нагрузок большого размера, организации контура управления необходимо уделять значительное внимание. Рекомендуется в вибрационной системе обеспечить наличие сред-

ства одновременного включения и остановки всех вибростендов контролируемым способом в нормальном состоянии и в условиях отказа, например в случае блокировки или аварийной остановки. Иначе дополнительное напряжение и повреждение может возникнуть как на полезной нагрузке, так и на вибрационной системе. Хотя оснастка должна иметь строение, сводящее к минимуму передачу

реакции полезной нагрузки, дополнительно можно использовать проверочные акселерометры в поперечном исполнении для защиты вибростендов от испытываемых моментов, превышающих граничные значения. Однако не следует полагаться на это при нормальных режимах из-за возникновения ограничения управления.



### 4. Различия между контуром управления системы ММО с несколькими вибростендами и системы с одним вибростендом

#### 4.1. Матрица идентификации системы

Обычно перед стартом ММО-испытаний с гармоническим и случайным возбуждением вибрации запускается матрица идентификации. Она описывает взаимодействия, включая фазовые отношения между каждым сигналом возбуждения и контрольным откликом по всему частотному диапазону испытания. Сначала проводится испытание случайным возбуждением без установления взаимных спектральных связей между вибростендами, и это является основой для начального управления, применяемого при проведении испытаний на воздействие гармонической или случайной вибрации. Как говорилось выше, предполагаются линейные отношения уровня возбуждения для режимов с низким максимальным уровнем испытания, которые могут быть подвержены воздействию

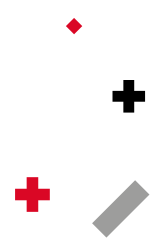
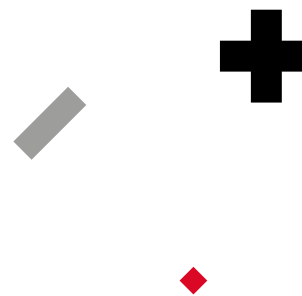
трения, шумов и нелинейного резонанса, переходных процессов. Линейные отношения между испытаниями низкого и высокого уровня имеют гораздо большее значение при ММО-испытаниях, чем в случае испытания с одним вибростендом, где управление обычно основано на отклике акселерометра, а не на предварительно сохраненных связях. Причина в том, что системы управления испытаниями для одного вибростенда, как правило, имеют более быстрое адаптивное управление благодаря более простым требованиям, предъявляемым к контролю. При проведении испытания со случайным возбуждением идентификационная матрица обновляется, и эти данные могут вноситься в память для использования в последующих прогнозах. Это особенно полезно для сложных нагрузок, не имеющих линейных динамических характеристик.

#### 4.2. Взаимные спектральные связи: фаза и когерентность

Проведение испытания с несколькими вибростендами, действующими в направлении только одной оси (далее — по одной оси), — это не просто определение профиля амплитуды колебания по диапазону частот. По мере того как частоты приближаются к первому резонансу системы и превышают его, полезная нагрузка перестает двигаться равномерно по оси возбуждения. При испытаниях полезной нагрузки на одном вибростенде часто используется многоточечное управление, так что изменение амплитуды колебания в различных точках нагрузки учитывается с помощью методов управления по среднему или по максимуму. Аналогично, если измерялось фазовое соотношение между акселерометрами в испытании с многоточечным управлением,

можно увидеть в результате разность фаз между различными контрольными точками. Эти фазовые отношения не влияют на управление, поскольку учитывается только амплитуда колебания, а получающийся момент гасится вибрационным столом.

При проведении испытания с несколькими вибростендами, действующими в одном направлении, взаимные спектральные отношения между контрольными точками имеют гораздо большее значение, поскольку при MIMO-испытаниях для каждой контрольной точки происходит оптимизация не только профиля амплитуды, но и фазы и когерентности между положениями всех контрольных акселерометров. При испытаниях по одной оси слишком просто полагать, что отношения фазы и когерентности между акселерометрами в контрольных точках будут равны нулю градусов



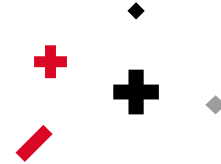
**Опыт показывает, что зарядовые акселерометры являются лучшим решением при проведении испытаний с незатухающими переходными процессами**



по фазе и с когерентностью близкой к 1 по всему диапазону частот. Такие условия не соответствуют реальным, а попытка контролировать нулевую фазу и высокую когерентность при резонансе приведет к испытаниям полезной нагрузки в чрезмерном объеме. Важно понимать, что когерентность, близкая к 1, не должна считаться «хорошей», так же как и когерентность, близкая к 0, не должна считаться «плохой». Вместо этого, когерентность должна восприниматься как «высокая», когда динамические свойства полезной нагрузки позволяют контрольным точкам быть сильно взаимосвязанными, и когерентность должна восприниматься как «низкая», когда контрольные точки слабо связаны между собой, что обычно случается при резонансе и при доминировании широкополосной энергии, генерируемой полезной нагрузкой над сигналом возбуждения вибростенда.

### 4.3. Обычное управление по четырем точкам в сравнении с многоточечным управлением

Управление вибрации при MIMO предполагает, что все сигналы возбуждения и управления одновременно используют матричные связи и оптимизируют задающие сигналы каждого вибростенда для получения нужного профиля амплитуды, фазы и когерентности в каждой контрольной точке. Возбуждение каждого вибростенда влияет на все контрольные точки, а не только на наиболее тесно связанными с ним, и точность управления



зависит от сложности динамических процессов в системе. Поэтому управление MIMO не должно рассматриваться как простое независимое управление режимами испытаний соответствующими контрольными акселерометрами, но должно восприниматься с точки зрения взаимодействия с другими контрольными точками. Это означает, что если, например, предположить, будто при проведении испытания воздействием

случайной вибрации на системе с четырьмя вибростендами в трех контрольных точках воспроизведение профиля будет точно соответствовать заданному, а в четвертой будет превышение из-за резонансного поведения, то в условиях реального MIMO-испытания в трех положениях контрольных точек будет наблюдаться тенденция к отклонению от своих заданных профилей, чтобы в четвертой точке достичь более близкого соответ-

ствия. Значит, при резонансной частоте отклик каждого канала управления может выглядеть как отклоняющийся от профиля, однако при просмотре взвешенной средней амплитудно-частотной характеристики на каналах управления видно, что общее управление оптимизировано. С этой точки зрения управление MIMO сходно с обычным многоточечным управлением, которое используется в системах с одним вибростендом.





#### 4.4. Выбор акселерометра

Производители систем управления МИМО-виброиспытаниями рекомендуют использовать акселерометры с высокой чувствительностью для того, чтобы обеспечить необходимый уровень сигнала для управления фазой. При этом испытания с одним вибростендом проводятся с помощью акселерометров чувствительностью в 10 мВ/г, а для МИМО-систем требуются акселерометры, имеющие величину 100–1000 мВ/г.

Наземные полезные нагрузки большого размера часто состоят из нескольких компонентов в модульном блоке или контейнере. Как вся конструкция подвержена резонансу, так и отдельные компоненты тоже резонируют и могут дребезжать. При испытаниях тяжелой полезной нагрузки большого размера на МИМО-системе есть вероятность, что подвижная масса нагрузки будет значительно превосходить массу вибростендов. В результате способность всех вибростендов вместе со столами и крепежной оснасткой демпфировать переходные процессы, связанные с динамическим поведением полезной нагрузки, будет

весьма ограниченной по сравнению с испытаниями малых нагрузок. Кроме того, доступные местоположения для контрольных акселерометров больше ограничены, чем при испытании на одном вибростенде с использованием стола скольжения и расширителя. Это означает, что контрольные акселерометры должны иметь более высокую чувствительность и диапазон измерения ускорения, чтобы приспособиться к переходным процессам без перегрузок. Данные требования по чувствительности и диапазону измерения ускорения обратозависимы конструкции акселерометра. IEPЕ-акселерометры со встроенным предусилителем отвечают следующему соотношению:

чувствительность (мВ/г) × диапазон измерения ускорения (г) = 5.000–7.000

То есть для акселерометра чувствительностью 500 мВ/г ускорение в переходном процессе выше пиковых 14g приведет к перегрузке.

Опыт показывает, что зарядовые акселерометры являются лучшим решением при проведении испытаний с незатухающими переходными процессами. Поскольку преобразователи заряда в напряжение находятся в отдельном блоке, удаленном от динамических процессов полезной нагрузки, появляется возможность использования значительно более высокого диапазона измерений (до момента перегрузки), в зависимости от выбора согласующего усилителя. Таким образом, соотношение может быть преобразовано в следующий вид:

чувствительность (pC/g) × диапазон измерения ускорения (г) = 10.000–100.000

Для вибрационных систем  
однозадачного использования тонкая  
настройка большого числа параметров  
может дать преимущества при  
получении итогового уровня контроля  
управления испытаниями

## 5. Рекомендации по стратегии управления

### 5.1. Профиль идентификационной матрицы

Для расчета матрицы идентификации системы необходимо уделять внимание разработке профилей случайного возбуждения, особенно для последующих испытаний с гармоническим возбуждением. Опыт показывает, что применение максимально допустимого уровня возбуждения, особенно на частотах известных резонансов, помогает расчету линейного отношения между испытаниями низкого и высокого уровня. Однако при квалификационных испытаниях с более низким уровнем возбуждения, чем для расчета идентификационной матрицы, есть вероятность, что рассчитанная идентификация не подойдет. Например, если идентификационная матрица запущена при  $-3$  дБ полного уровня испытания, то она может не подойти для описания взаимодействия между сигналами возбуждения при  $-6$  дБ полного уровня испытания.

И наоборот, поскольку идентификационная матрица используется для определения связей сигналов возбуждения, разумней минимизировать уровень для профиля низкой частоты с целью уменьшения значений смещения и предотвращения повреждения полезной нагрузки. Так, при схеме «тяги-толкай» система управления должна сначала установить необходимый сигнал возбуждения

для инвертирования. И при подозрении, что испытание полезной нагрузки происходит с несовпадением по фазе, это должно учитываться в профиле матрицы. Однако уровень возбуждения должен быть достаточным для того, чтобы избежать возникновения эффекта трения и шумов, преобладающих на прого-

не для идентификации. Дополнительно профиль идентификационной матрицы должен начинаться при более низкой частоте, чем действительный диапазон испытания, чтобы избежать потери контроля управления на низкой частоте (особенно при испытании с гармоническим возбуждением).



### 5.2. Оптимизация параметров управления

Для систем управления виброиспытаниями одиночных стенов заводские установки часто настроены для оптимальной работы по большинству сценариев испытания полезной нагрузки, и часто требуется изменить лишь несколько параметров, таких как разрешение или скорость развертки. Типичные же системы управления MIMO гораздо чувствительней к настройке параметров, которые могут отличаться в зависимости от полезной нагрузки. Поэтому может понадобиться помощь более опытного инженера-испытателя, чем при тестировании с одним вибростендом. Для вибрационных систем однозадачного использования (например, системы для испытания спутников) тонкая настройка большого числа параметров может дать преимущества при получении итогового уровня контроля управления испытаниями. Однако для испытательных центров, где проводятся различные виды испытаний для разных объектов, требуется более прагматичный подход. Для улучшения контроля управления с минимальным временем настройки могут быть использованы ключевые подходы, выработанные благодаря многочасовому опыту проведения MIMO-испытаний. Перечень таких подходов и условия по их исполнению описаны ниже.

## 5.2.2. Испытания на гармоническую вибрацию

Условия:

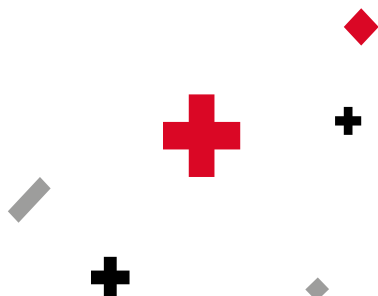
- Наличие идентификационной матрицы. Так же, как и при испытаниях с воздействием случайной вибрацией, правильная матрица служит залогом успешного управления испытаниями (см. раздел 5.1).
- Использование ограничительных акселерометров. Ограничительные акселерометры можно применять как для защиты системы от сверхвысокого поперечного ускорения, так и для ограничения пика ускорения по оси возбуждения. Предельные значения необходимо устанавливать только для ограничения реальных экстремальных значений. Если пределы установлены слишком близко к стандартным значениям профиля испытания, управляемость может понижаться из-за того, что система управления «прыгает» между реальными MIMO-контрольными точками и несколькими отдельными проверочными ограничивающими точками.
- Наличие полосового фильтра. Поскольку наземная полезная нагрузка большого размера обычно подвержена переходным процессам, это вызывает желание сузить полосовой фильтр. Однако чем меньшую полосу пропускания обеспечивает фильтр, тем

медленнее обновляются данные управления. Это замедление более заметно при управлении MIMO, где производятся более сложные вычисления (в сравнении со стандартной системой управления испытаниями на одном вибростенде). И оно возрастает при увеличении количества вибростендов в системе.

- Контроль скорости сжатия. Скорость сжатия может иметь заметное влияние на управляющее воздействие и в идеале должна устанавливаться с собственным профилем испытания по частотному диапазону, а не применяться в виде установленного по умолчанию значения на системе управления. При моментальных переходных процессах во время развертки частоты можно использовать низкую скорость сжатия, чтобы

избежать чрезмерной реакции системы управления на переходные процессы. Повышенную скорость сжатия можно использовать, когда возникает необходимость сдвига отклика акселерометров и быстрой коррекции амплитуды возбуждения. Однако необходимо следить, чтобы высокая скорость сжатия не вызвала нестабильности управления.

- Контроль скорости развертки. Можно сократить скорость развертки на некоторых частотах, чтобы позволить системе управления корректировать амплитуду возбуждения с меньшим шагом. В сочетании со скоростью сжатия этот параметр позволяет оптимизировать управляющее воздействие.



## 6. Оценка результатов испытания

Испытания с помощью систем, включающих несколько вибростендов, — это развивающаяся область знаний, и стандарт MIL-STD-810G содержит разделы с указаниями, относящимися именно к данному типу испытаний. Однако применение нескольких вибростендов для испытания наземных резонансных полезных нагрузок большого размера все еще достаточно необычно, и испытания на специальной трассе являются более традиционным методом. Многочисленные резо-

нансы и переходные процессы, возникающие на полезной нагрузке такого типа при стандартных допусках, не всегда достижимы, поэтому рекомендуется более тесное взаимодействие с заказчиком испытания. Хорошее качество испытаний возможно при соблюдении всех требований заказчика, особенно при понимании процесса управления резонансной полезной нагрузкой большого размера. Примеры типичных результатов испытания приводятся в Приложении.

### 6.1. Амплитуда: использование управления по усредненному значению

Например, для вибрационной системы с четырьмя стендами MIMO-система управления виброиспытаниями контролирует каждый угол полезной нагрузки для оптимизации общего контроля плоскости нагрузки, проходящей испытания. Это усложняет понимание того, как именно применять допуски, указанные в стандарте MIL-STD-810G (Метод 514.6), поскольку для многоточечного управления сигнал управления — это обычно комбинированный сигнал, использующий стратегию управления по максимальному, минимальному или среднему значению.

Однако имеющийся стандарт MIL-STD-810G (Метод 527) объясняет, как именно можно рассматривать сигналы с точки зрения их составного характера, усредняя данные акселерометров на общей оси. В случае управления MIMO указанный способ используется не для управления, а только для метода точного представления и оценки результатов. Выходные комбинированные сигналы управления — это средняя пиковая амплитуда при гармоническом режиме или средняя спектральная плотность ускорения (СПУ/СПМ) при случайном режиме от четырех отдельных сигналов. Такие сигналы можно рассматривать как равновесные для профиля с обычной амплитудой или средне-взвешенные — при других видах профиля. Необходимый по стандарту MIL-STD допуск  $\pm 10\%$  для гармонического режима и  $\pm 3$  дБ для случайного режима в данном случае должен применяться к этому усредненному значению, чтобы определить, управляема ли конкретная полезная нагрузка в пределах допуска, определенного стандартом.

### 6.2. Амплитуда: отдельные сигналы управления

Стандарт АЕСТР 400 дает дополнительные рекомендации по допускам экстремальных значений отдельных сигналов. Это значит, что, независимо от того, какая стратегия используется для управления возбуждением при нескольких контрольных точках, по максимальному, минимальному или среднему значению (или среднему расчетному, как в случае MIMO) экстремальные значения определены для отдельных сигналов. Для испытания с гармоническим возбуждением рекомендуется допуск в  $\pm 25\%$  для отдельных сигналов для частоты до 500 Гц, хотя для испытания со случайным возбуждением сумма отдельных сигналов вне допустимого диапазона должна быть ограничена максимум до 5% от суммы сигналов в полосе пропускания испытания. Эти указания полезны в качестве ориентировочных значений по допускам для отдельных сигналов управления во время MIMO-испытаний.





### 6.3. Расчет среднеквадратического значения (СКЗ)

Во время испытания резонансная полезная нагрузка большого размера генерирует широкополосный сигнал, который выходит за рамки диапазона частот, управляемых вибрационной системой.

Стандартный подход расчета среднеквадратического значения случайной спектральной плотности ускорения принимает во внимание только область под кривой между начальной и конечной управляющей частотой.

Так, на графике (рис. 2) среднеарифметическое значение рассчитано только для частоты в диапазоне  $f_1$ – $f_2$ . Любая активность, превышающая  $f_2$ , отфильтровывается и не входит в вычисления. Но будет не лишним регистрировать данные и по более высокой частоте, например  $4 \times f_2$ , для того, чтобы понимать «общее СКЗ полезной нагрузки», поскольку это показывает, насколько «активно» откликается полезная нагрузка и происходит ли деградация конструкции во время испытания.

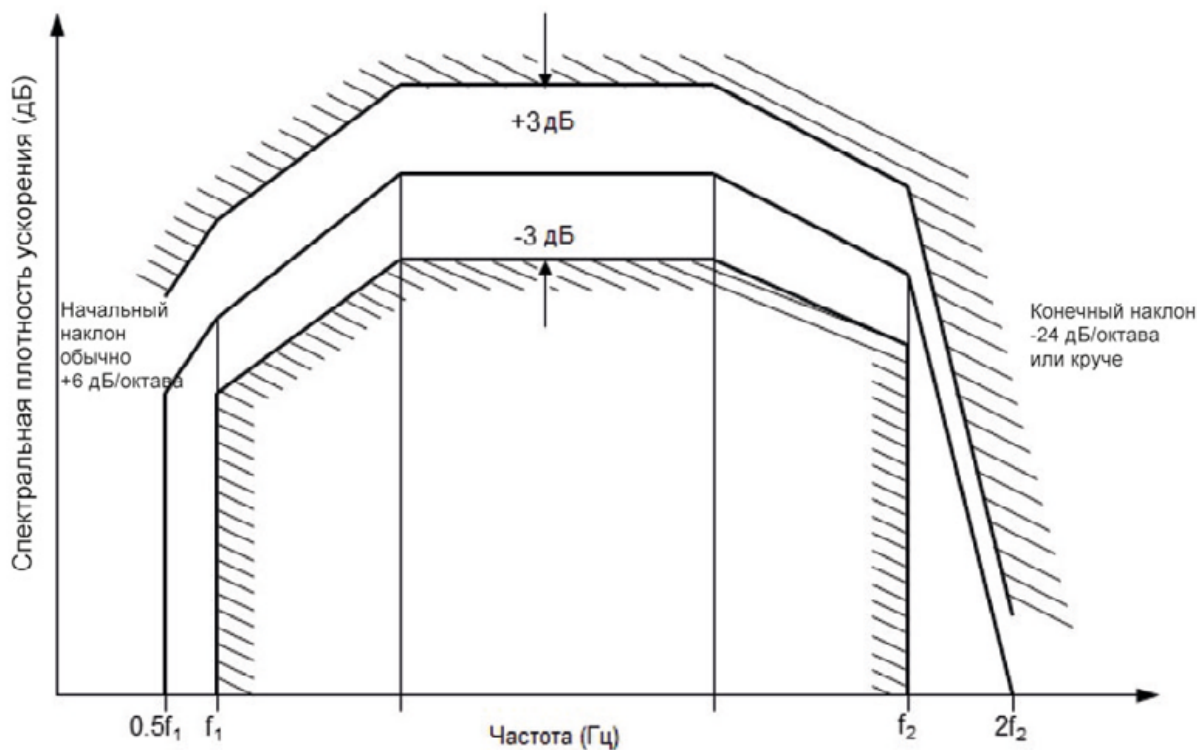


Рис. 2. Спектральная плотность ускорения при испытаниях со случайным возбуждением

Даже при активной откликающейся полезной нагрузке вполне возможно получить  $\pm 10\%$ -ный допуск

по среднеквадратическому значению среднего и отдельного сигнала в пределах диапазона испытаний  $f_1$ – $f_2$ .

#### 6.4. Фаза и когерентность взаимной спектральной плотности

Из-за динамических процессов на полезной нагрузке все точки управления имеют тенденцию двигаться неодинаково при всех частотах. Без данных измерения динамических характеристик объекта, полученных во время работы, ожидаемые фазу и когерентность можно вычислить, проведя прогон низкого уровня, к примеру  $-6\text{дБ}$  от номинального режима, и затем сравнивать их значения при полном уровне возбуждения (фактически сначала определяя отклик в процессе квалификационного прогона с низким уровнем). Сдвиг фазы или когерентности демонстрирует изменение поведения полезной нагрузки при условии, что нет никаких других проблем в контуре управления.

При гармоническом возбуждении измеряются отношения отно-

сительных фаз отдельных сигналов управления. Выяснилось, что ориентировочные значения допуска в  $\pm 10^\circ$  подходят для применения. Как можно было предвидеть, такой уровень допуска обычно достигается вне резонанса, однако через резонансную частоту можно измерить большую разность фаз.

В испытаниях со случайным возбуждением проверяются фаза и когерентность. При низких частотах когерентность между сигналами управления должна быть на максимально высоком уровне, чтобы избежать поломки вибростенда. Там, где когерентность высокая, например выше 0,5, уменьшение когерентности на 0,2 или более и изменение фазы более чем на  $\pm 10^\circ$  должно подвергаться дальнейшей оценке. Если квалификационный прогон показывает, что номинальная когерентность превышает 0,5, допуски для

когерентности или фазы применять не надо, поскольку вибросистеме не грозят никакие повреждения.

Итак, для резонансной полезной нагрузки большого размера типичное отклонение от высокой когерентности будет характеризоваться:

- падением когерентности, сосредоточенном вокруг первого резонанса, в пределах 10–40 Гц для полезной нагрузки большого размера;
- резкими скачками когерентности при резонансе полезной нагрузки на других высоких частотах;
- падением когерентности до 0,2 и ниже при более высоких частотах, например, выше 150 Гц, соответствующих падению возбуждения и необходимых при генерации широкополосного сигнала в самой полезной нагрузке.



#### 6.5. Участие заказчика испытаний / уполномоченного проектировщика

Не всегда есть возможность поддерживать управление полезной нагрузкой в пределах допусков, установленных стандартами. Например, при испытании с использованием гармонической развертки на резонансных частотах. Поэтому важно разработать подход для количественного измерения и изучения размаха амплитуд. Стандарт MIL-STD-810 G под-

черкивает важность установления подходящего значения допусков для конкретной полезной нагрузки. Предварительно установленные допуски не могут применяться ко всем возможным видам полезной нагрузки. Вместо этого может понадобиться рассмотреть и согласовать различные варианты значения допусков и уровня испытания для конкретной полезной нагрузки, что предполагает участие заказчика или уполномоченного проектировщика в проведении испытания.

## 6.6. Оценка результатов, выходящих за рамки допуска

При наличии результатов, выходящих за рамки допуска, необходимо провести анализ следующих показателей:

- Широкополосный пиковый сигнал. Просмотр широкополосных пиковых сигналов во время испытания с гармоническим возбуждением может оказаться полезным для определения состояния: доминируют ли сигналы неустановившегося режима над сигналами управления и достаточно ли динамического диапазона акселерометра.



- Сигнал возбуждения. Сигналы возбуждения можно сравнивать между собой и понижать уровень предварительных прогонов для того, чтобы понять, сгенерированы ли измеряемые уровни ускорения вибрационной системой или это реакция полезной нагрузки с минимальной долей возбуждения, привнесимого вибростендом.

- Временная история сигналов управления. Полезно записывать отдельные сигналы управления, используя подходящее для этого оборудование сбора данных, с последующим изучением зон со слабым управлением. При резком увеличении амплитуды относительное смещение между сигналами управления можно проанализировать и понять, приведет ли текущая ситуация к перенапряжению полезной нагрузки или вибрационной системы.



- Широкополосный отклик. Для понимания причин резкого увеличения амплитуды можно оценить БПФ отдельных сигналов на частоте увеличения амплитуды. Определить, какой уровень помех в широкополосном диапазоне искажает сигнал, и просмотреть видеозапись полезной нагрузки для визуализации источника этих помех.

## 7. Заключение

Существуют заметные преимущества использования системы с несколькими вибростендами для испытаний полезной нагрузки сложной формы и большого размера. При необходимом уровне управления такое типовое моделирование динамического поведения будет более достоверно, чем на системе с одним вибростендом. Однако по сравнению с испытаниями на системе, предусматривающей один вибростенд, для проведения ММО-испытаний на системе с несколькими вибростендами требуется новый подход и отношение ко всей вибрационной системе как цельному решению, а не как к отдельным компонентам. Эта статья затрагивает некоторые важные области, включая:

- выбор вибростенда;
- выбор системы управления;
- динамические процессы полезной нагрузки и их влияние на степени свободы всей системы;
- метод крепления полезной нагрузки;
- выбор акселерометров;
- предлагаемая стратегия управления — количество и расположение точек контроля;
- средство определения профиля испытания, включая фазу и когерентность;
- ожидания заказчика испытаний;
- требования к инженеру-испытателю.


Для обеспечения оптимального функционирования оборудования данные составляющие следует учитывать с первых моментов разработки технических условий и на всех этапах проектирования. 



Рис. 3. Установка для горизонтального испытания 3-тонного 8-футового стандартного контейнера

## Приложение

Пример типичных результатов испытаний полезной нагрузки большого размера с применением нескольких соосных вибростендов.

Испытательная установка 420kN Quad — электродинамическая система вибрации «квадро» горизонтальной конфигурации, использовалась для испытания 3-тонного 8-футового стандартного контейнера. Применена матричная стратегия управления испытанием с одним управляющим акселерометром, расположенным рядом с каждым из углов стандартного контейнера.



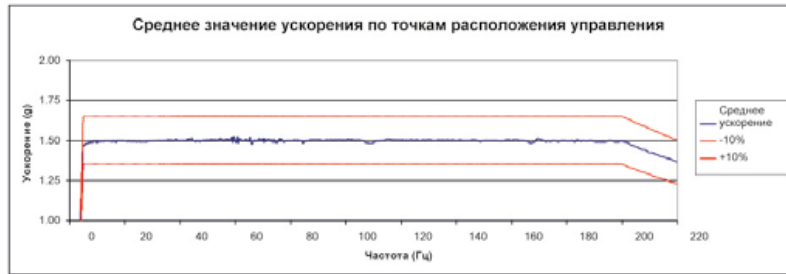


Рис. 4. График среднего ускорения при гармонической развертке

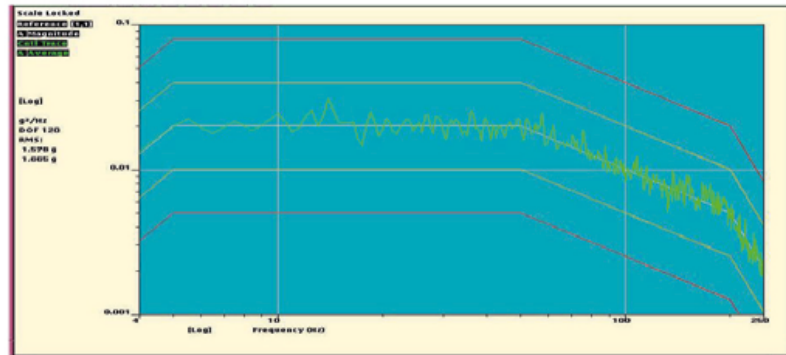


Рис. 5. График спектральной плотности ускорения усредненного сигнала управления

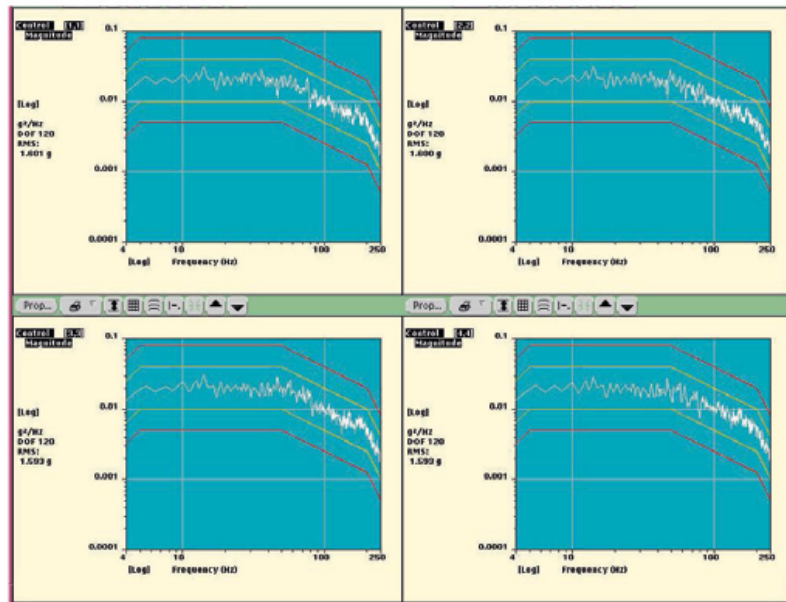


Рис. 6. Спектральная плотность ускорения для отдельных сигналов управления

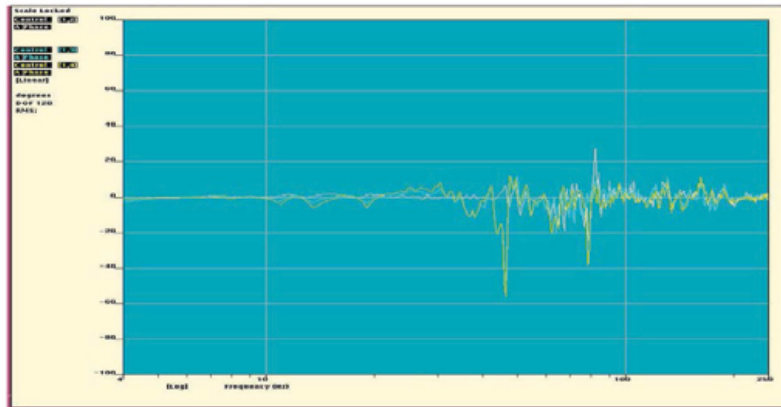


Рис. 7. Относительная фаза в контрольных точках

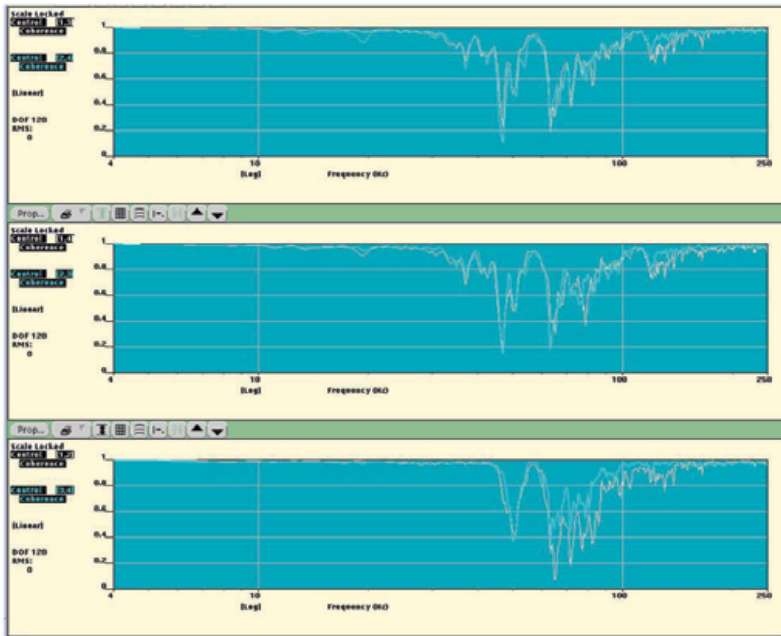


Рис. 8. Относительная когерентность в контрольных точках

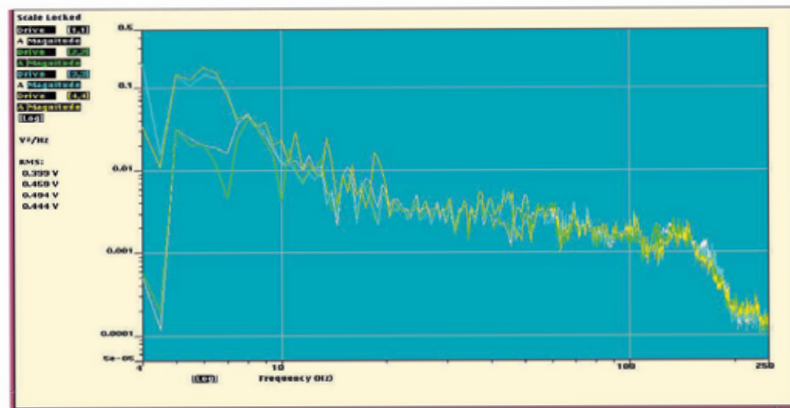


Рис. 9. График отдельных сигналов возбуждения



## Паяльник с регулировкой температуры Hakko FX-600 (36В)

Диапазон рабочей температуры 200–500 °С.  
Большой выбор наконечников, малый вес и габариты паяльника позволяют осуществлять пайку с различными видами компонентов. Используется для проведения самых разнообразных паяльных работ, в т.ч. при пайке электронных деталей и микросхем.

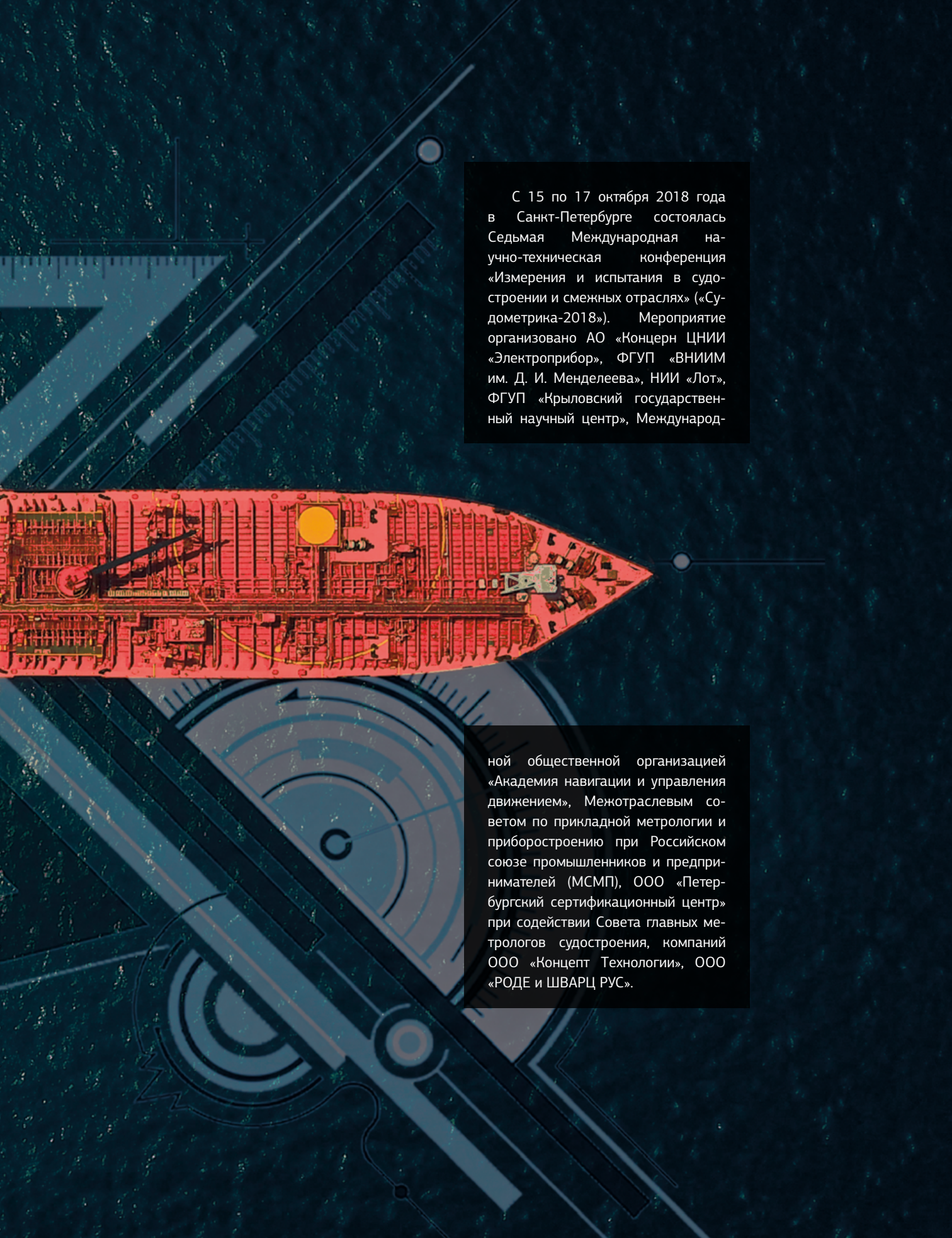
- ✓ Универсальный уровень мощности (50 Вт).
- ✓ Процедура управления рабочей температурой паяльника осуществляется простым поворотом ручки (расположена на рукоятке).
- ✓ Имеется возможность фиксации температуры с помощью специального ключа.
- ✓ Индикатор состояния установки температуры.
- ✓ Надежный керамический нагревательный элемент длительного срока службы.
- ✓ Тепловая защита предохраняет рукоятку инструмента от перегрева.
- ✓ Эргономичная и облегченная рукоятка из легкой пластмассы обеспечивает удобную работу.
- ✓ Стабильность температуры  $\pm 1$  °С.



# «Судомеритка» 2018







С 15 по 17 октября 2018 года в Санкт-Петербурге состоялась Седьмая Международная научно-техническая конференция «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» («Судометрика-2018»). Мероприятие организовано АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», НИИ «Лот», ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Международ-

ной общественной организацией «Академия навигации и управления движением», Межотраслевым советом по прикладной метрологии и приборостроению при Российском союзе промышленников и предпринимателей (МСМП), ООО «Петербургский сертификационный центр» при содействии Совета главных метрологов судостроения, компаний ООО «Концепт Технологии», ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС».



В работе конференции, программа которой включала свыше сорока докладов, приняли участие 107 представителей двадцати семи предприятий и организаций России и Казахстана. Обсуждение докладов, а также проведенные дискуссии в рамках двух круглых столов и открытое заседание Совета главных метрологов судостро-

ения позволили всесторонне рассмотреть результаты и обменяться опытом решения актуальных проблем измерений и испытаний продукции судостроения и смежных отраслей, метрологического обеспечения процессов создания кораблей, судов и оборудования для них. В числе прочего участники обсуждали:

- теорию и методы испытаний продукции судостроения и комплектующих изделий;
- методологию информационного сопровождения измерений и обеспечения их единства;
- методологию метрологического обеспечения гидроакустики;
- методическое и нормативное обеспечение испытаний в судостроении;
- теорию и методы измерений и контроля в производстве и испытаниях изделий судостроения;
- теорию и практику метрологического обеспечения измерений и испытаний в судостроении и смежных отраслях;
- состояние и перспективы развития испытательной базы в судостроительных отраслях;
- состояние и перспективы развития средств контроля и измерений.





Эксперты компании «Диполь» традиционно приняли участие в конференции и представили несколько докладов, осветив следующие темы:

**1. Межлабораторные сличения как способ контроля качества метрологических работ на предприятии.** Рассмотрены основные задачи, решаемые при межлабораторных сличениях метрологических лабораторий по действующим стандартам. С учетом результатов двух пилотных раундов сличений результатов калибровки электроизмерительных приборов оценены перспективы развития работ по сличениям метрологических лабораторий промышленных предприятий. Показано место межлабораторных сличений в современной прикладной метрологии.

**2. Результаты пилотного эксперимента по межлабораторным**


**сличениям результатов калибровки электроизмерительных приборов.**

Представлены результаты двух раундов межлабораторных сличений результатов калибровки цифрового мультиметра и стрелочного комбинированного прибора, проведенных в соответствии с ГОСТ ИСО/МЭК 17043. Пилотный характер работ по сличениям позволил отработать организационные и методические вопросы, подготовить рекомендации по преодолению трудностей, связанных с особенностями деятельности отечественных метрологических лабораторий.

**3. Метрологические аспекты измерений уровня пульсаций в источниках питания постоянно**

**го тока.** Рассмотрена проблема контроля параметра пульсаций в источниках питания постоянного тока. Зафиксировано наличие в нормативной

документации множества методик выполнения измерений для одного и того же контролируемого параметра. Проведен анализ метрологических проблем, возникающих при реализации существующих методик выполнения измерений. Предложен единственный вариант методики выполнения измерений и его техническая реализация.

В рамках конференции проведены занятия со старшеклассниками академической гимназии № 56, в ходе которых молодежь могла ознакомиться с результатами работы по созданию новой техники; также прошла выставка оборудования, где были представлены реостат электронно-управляемый (РЭУ-03), технология «Машинное зрение» и сопутствующее оборудование, необходимое для организации автоматизированной поверки (калибровки) средств измерений. 



# Не по-детски

Всероссийский образовательный проект  
«Большие вызовы»

$$E=mc^2$$







Илья Новожилов,  
руководитель проектов направления  
метаматериалов Университета ИТМО,  
методист профиля «Нанотехнологии» ОЦ «Сириус»  
mihail-muhin@yandex.ru

В образовательном центре «Сириус» в рамках проекта «Большие вызовы» команды российских школьников совместно с вузами и представителями индустрии занимаются разработкой серьезных научных проектов. Программа состоит из различных профилей, к одному из них — «Нанотехнологии» — присоединилась и компания «Диполь».



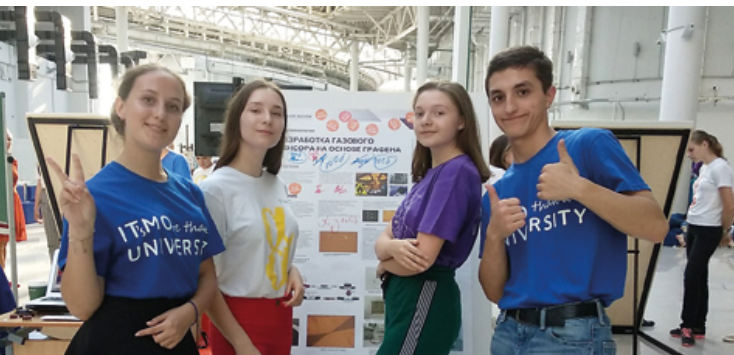
Константин Крупальник,  
руководитель направления  
«Микроэлектроника»  
kk@dipaul.ru

Центр «Сириус», ставший заметным явлением и знаковым местом за очень короткий срок, был создан образовательным фондом «Талант и успех» и разместился в уютном уголке Сочи на берегу моря на территории Олимпийской деревни. Свою деятельность центр ведет при поддержке и координации Министерства образования и науки, Министерства спорта и Министерства культуры Российской Федерации. Работа «Сириуса» направлена на раннее выявление, развитие и дальнейшую профессиональную поддержку одаренных детей, проявивших выдающиеся способности в области искусств, спорта, естественно-научных дисциплин, а также добившихся успеха в техническом творчестве.



Центр работает круглый год, и сюда из всех регионов России ежемесячно приезжают и проходят бесплатное обучение 800 детей в возрасте 10 –17 лет. Их сопровождают более 100 преподавателей и тренеров, повышающих в центре свою квалификацию. Образовательная программа рассчитана на 24 дня и включает как занятия по определенной специальности, так и развивающий досуг, мастер-классы, творческие встречи с признанными

в своих областях профессионалами, комплекс оздоровительных процедур, а в течение учебного года — общеобразовательные занятия. Учебная база «Сириуса» оборудована по последнему слову техники и позволяет проводить курсы интенсивного обучения в комфортных условиях.

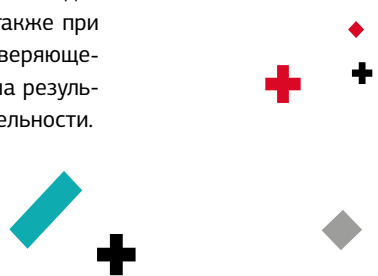






В «Сириусе» действует несколько направлений обучения: «Спорт», «Наука», «Искусство». Например, по направлению «Наука» отбор достаточно серьезный, он проводится Экспертным советом Фонда на основании результатов участия кандидатов в предметных олимпиадах и конкурсах, собственного (индивидуального или командного) проекта научно-технического или исследовательского характера, а также при наличии документа, удостоверяющего исключительное право на результат интеллектуальной деятельности.

Каждый месяц по направлению «Наука» проходит профильная образовательная смена (около 400 детей), посвященная конкретной области знаний (IT, физика, математика и т. д.). При этом ежегодно в июле организуется особая, проектная смена под названием «Большие вызовы».



Формат «Больших вызовов» следующий: партнеры «Сириуса» (вузы, компании-разработчики, производители и другие предприятия) готовят темы проектов (глобальные задачи), которые школьникам предлагается разработать в течение смены. Проекты выполняются командой из 5–7 человек во главе с руководителем — представителем партнера, предло-

жившего конкретную задачу. Участниками проектной образовательной программы «Большие вызовы» стали победители и призеры Всероссийского конкурса проектных и исследовательских работ школьников. А в 2018 году к различным мероприятиям конкурса было привлечено свыше 40 000 учащихся 8–10 классов со всей страны.

«Большие вызовы» разделены на 12 направлений, среди которых есть профиль «Нанотехнологии», предусматривающий разработку четырех проектов (по два от каждого партнера). Кстати, в нынешнем году партнерами профиля стали Университет ИТМО и ФИОП Роснано.







В частности, Университет ИТМО предложил ребятам заняться двумя проектами. Первый — инновационная разработка «Создание газового сенсора на основе графена».

В последние годы локальные газовые анализаторы становятся все более востребованными, причем спектр их действия может быть как общим, так и специфическим, например детектирование конкретных газов сверхмалой концентрации.

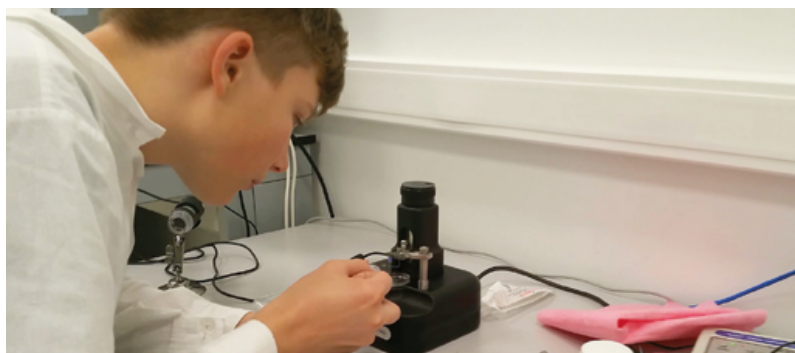
Принцип детектирования присутствия газов в атмосфере может быть основан на изменении проводимости активного слоя, адсорбирующего молекулы газа. Электрический потенциал молекул способен влиять на транспорт носителей заряда в активном слое, что фиксируется с помощью измерения вольт-амперных характеристик. Понятно, что в такой геометрии толщина активного слоя должна быть как можно меньше (чтобы изменение электрического потенциала на поверхности слоя приводило к изменению проводимости всего слоя), а электрическая проводимость как можно выше.

Идеальным материалом, удовлетворяющим обоим требованиям, является графен — двумерное вещество, толщиной всего в один атом. За счет своих уникальных свойств графен становится прекрасным проводником, а адсорбция на его поверхности минимального количества молекул способна существенно изменить проводимость слоя.

Главная задача данного проекта заключается в создании газового анализатора на основе одиночных чешуек графена и наноконтактов.

Современные газовые анализаторы становятся все более миниатюрными и чувствительными. Для экспресс-диагностики состава газовой атмосферы на чипе должно располагаться большое количество сенсорных элементов, настроенных на различные газы. Подобные анализаторы могут быть созданы с помощью традиционных методов фотолитографии.

Участникам проекта было предложено разработать методы создания анализаторов присутствия в атмосфере специфических газов, работающих на эффекте изменения проводимости активного слоя на основе графена. Для реализации этой цели требуется развить методы создания слоев углерода, толщиной всего в один атом, а также методы формирования контактов к данным слоям. Такие подходы должны быть реализованы в лабораторных условиях без применения сложного оборудования. Для создания наноструктур, а также для их диагностики было решено в качестве одного из возможных методов использовать сканирующую зондовую микроскопию и (или) фотолитографию по шаблону.



Второй проект — инновационная разработка **«Создание подложки для селективной эпитаксии нитевидных нанокристаллов для светоизлучающих диодов».**

Задача синтеза упорядоченных массивов наноструктур чрезвычайно актуальна при создании приборных приложений. В частности, массив упорядоченных на подложке вертикально ориентированных нитевидных нанокристаллов (наностолбиков или нанопроволок) может служить основой для создания сверхъярких светоизлучающих диодов, используемых в матрицах LED-панелей.

Для создания профилированных подложек под массивы нитевидных нанокристаллов могут использоваться различные методы электронной или оптической литографии, что требует применения дорогостоящего оборудования.

Проектной команде было предложено разработать новую технологию







создания наноструктурированных покрытий для синтеза упорядоченного массива нитевидных нанокристаллов на основе перфорированного слоя оксида и массива самоупорядоченных микро- и наносфер.

Главная задача проекта заключается в формировании наноструктурированных подложек для последующей селективной эпитаксии нитевидных нанокристаллов.

Современные устройства уже давно имеют в своем составе различные наноструктуры, такие как квантовые ямы, квантовые проволоки и квантовые точки. Подобные системы с пониженной размерностью демонстрируют уникальные электронные и оптические свойства, недостижимые для традиционных объемных полупроводниковых ма-

териалов. Понятно, что методы синтеза подобных систем очень трудоемки и технологичны и зачастую требуют применения дорогостоящего технологического и диагностического оборудования. Поэтому участникам проекта было предложено разработать методы подготовки (модификации) ростовых подложек для последующего синтеза наноструктур, которые могут быть реализованы в лабораторных условиях без применения сложного и дорогостоящего оборудования. Наноструктурирование подложки должно заключаться в формировании упорядоченного массива субмикронных отверстий в верхнем оксидном слое. При этом способ модификации поверхности должен быть масштабируемым и предусматривать создание упорядоченных микро- и наноструктур на относительно больших площадях.



Для диагностики создаваемых массивов наноструктур, как и при работе над первым проектом, было решено использовать неразрушающую сканирующую зондовую микроскопию.

Для выполнения обоих проектов потребовалась центрифуга (спиннер) для нанесения тонких пленок. Необходимое оборудование предложила компания «Диполь», предоставив лабораторную центрифугу Spin 150i NPP от компании АРТ (Германия). Spin 150i NPP позволяет наносить на образцы пленки различных материалов, в том числе формировать на подложке тонкий слой фоторезиста высокой однородности, который необходим для процесса фотолитографии.

Принцип нанесения материалов центрифугированием достаточно прост, при этом он позволяет достигать хороших результатов на относительно несложном и недорогом лабораторном оборудовании. Образец, на который наносится материал, закрепляется в центрифуге вакуумным прижимом на специальном держателе. Наносимый материал подается в центрифугу при помощи системы автоматического дозирования или вручную — шприцем или пипеткой. При раскручивании образца и верхней подаче материала в центр образца по оси его вращения подаваемый материал равномерно распределяется по всему образцу, причем толщина покрытия практически линейно связана со скоростью вращения образца. Например, при диапазоне скоростей вращения 0 – 12 000 об/мин, которым обладает центрифуга Spin 150i NPP, в зависимости от типа наносимого материала можно получить тонкие слои (например, фоторезиста) толщиной около 1 мкм с высокой

однородностью (нескольких процентов).

К преимуществам метода центрифугирования можно отнести простоту реализации, линейную зависимость параметров (толщины слоя и скорости вращения), высокую однородность наносимого покрытия. Недостатками метода являются формирование краевого валика (утолщения на крае образца), определенные сложности при работе с образцами некруглой формы (сложно удалять валик, затеки по углам), невозможность работы с поверхностями с развитым рельефом (например, МЭМС-задачи); неэффективный расход подаваемого материала (фоторезиста). Большинство недостатков метода устраняется с помощью

более сложных центрифуг либо с использованием других методов нанесения, в частности ультразвукового спрей-нанесения. Тем не менее наряду с более сложным ультразвуковым спрей-нанесением обычное центрифугирование широко распространено как в лабораториях, так и на производствах, в том числе при изготовлении современной электронной компонентной базы.

Следует отметить, что, помимо технических показателей лабораторной центрифуги для нанесения материалов (скорость вращения, ускорение, диаметр обрабатываемого образца и др.), важными параметрами являются материал изготовления чаши и способ управления процессом.





В настоящее время наиболее оптимальным материалом для изготовления чаши считается полипропилен NPP, который инертен практически ко всем химическим веществам. Для наиболее агрессивных реагентов применяется материал чаши PTFE (политетрафторэтилен). Кроме возможности работы с большинством химических реактивов, по окончании работ поверхность такой центрифуги легко отмыть от использованных материалов, что немаловажно для лабораторных задач.



Говоря о способах управления процессом нанесения, следует упомянуть, что в новейших центрифугах установлены контроллеры с сенсорными дисплеями, при помощи которых в несколько кликов можно создать пошаговый рецепт процесса. Для каждого шага независимо задается скорость вращения, ускорение, направление вращения, доза подаваемого вещества. Таким образом, все параметры технологического процесса можно записать в рецепт, чтобы минимизировать влияние человеческого фактора. Современной лабораторной центрифугой управ-

лять легче, чем мобильным телефоном, поэтому такое оборудование не только упрощает жизнь технологам на производстве, но и является доступным эффективным инструментом для обучения молодых специалистов.



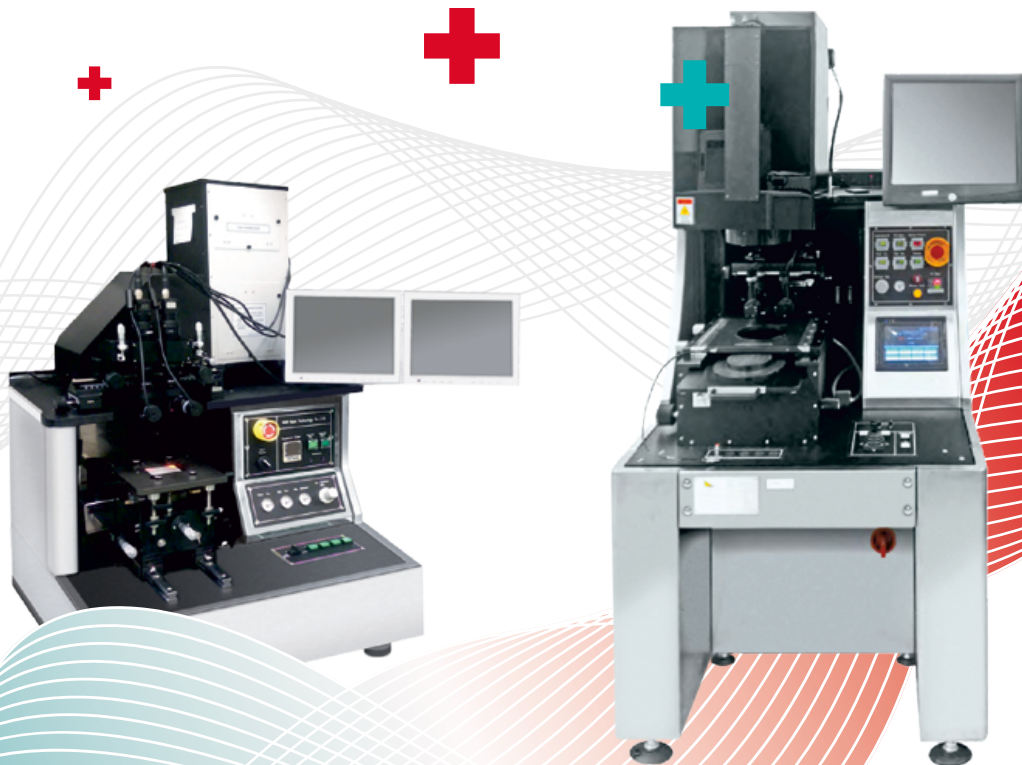
Возвращаясь к рассказу о проекте «Большие вызовы», можно добавить, что юные исследователи занимались решением реальных инженерных, технологических и исследовательских задач на протяжении всей проектной смены. В завершение работы участники «Фестиваля проектов» представили экспертам и коллегам-школьникам полученные результаты. Важно подчеркнуть, что команды решали серьезные научные и технологические задачи, нацеленные на достижение практических результатов и создание прототипов с перспективой их

будущего внедрения в производство. Заявленные проекты достигли первоначальных целей: ребятам из проекта «Разработка газового сенсора на основе графена» удалось сделать флейки графена, подвести к графену нанопровода и создать прототип высокочувствительного газового датчика, а участники «Создания подложки для селективной эпитаксии нитевидных нанокристаллов для светоизлучающих диодов» разработали собственную технологию получения на подложке структурированных наноглублений.



Важно отметить, что команды не ограничились первоначальными задачами. Школьники предложили множество идей для развития проектов и разработанных ими технологий. В дальнейших планах предусмотрена общая встреча участников команд в нанолаборатории физико-технического факультета Университета ИТМО в Санкт-Петербурге для продолжения работы над проектами и создания еще одной итерации прототипов. Лаборатории

физико-технического факультета оснащены самым современным оборудованием, в том числе оборудованием для производства микроэлектроники, поставленного компанией «Диполь». Благодаря этим возможностям школьники смогут вывести свои прототипы и проекты на новый технологический уровень. Нам остается только поддержать их желание и способности.



AG500-4N-SLC/-6N-SLC

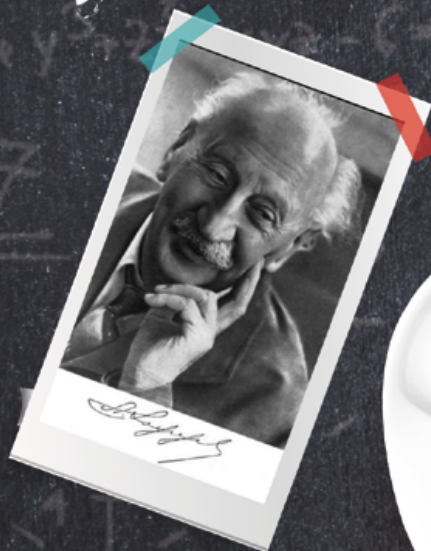
AG500-4N-ST/-6N-ST

## **Ручные и полуавтоматические установки совмещения-экспонирования серии AG500**


- ✓ Оптимальное решение для пластин 60×48 мм и полупроводников 2"-6" при разрешении до 0,8 мкм.
- ✓ Универсальная оснастка для образцов и шаблонов.
- ✓ Автоматическое выравнивание образца параллельно шаблону.
- ✓ Удобство работы оператора: моторизованная видеосистема и джойстик (для версии – ST).
- ✓ Массивное основание для защиты от вибраций (для версии – ST).
- ✓ Низкая цена и стоимость эксплуатации



# Физтеху — Ученых





The background of the page is a dark, chalkboard-like surface with faint mathematical formulas and symbols such as  $\frac{d}{dx}$ ,  $\int$ ,  $\sum$ ,  $\infty$ , and  $\frac{1}{2}$  scattered across it. Several colorful balloons (white, teal, and red) and pieces of silver confetti are scattered around the page, creating a celebratory atmosphere. A white rectangular box is centered on the page, containing the main text.

Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН — один из крупнейших научных центров России, в котором проводятся как фундаментальные, так и прикладные исследования в важнейших областях современной физики.

Институт, основанный выдающимся ученым и организатором науки Абрамом Федоровичем Иоффе и с 1960 года носящий имя своего создателя и первого руководителя, в этом году отмечает знаменательную дату — столетний юбилей.

Историю института, прошедшего путь от небольшого отдела до крупнейшего научного центра и флагмана отечественной электроники, сопровождает череда впечатляющих открытий и масштабных достижений.

Во время Великой Отечественной войны сотрудники организации, защищая боевые корабли от магнитных мин, решали задачу их размагничивания. За эту работу, которая помогла спасти жизни тысяч моряков, ученые были отмечены высшим знаком отличия — Сталинской премией.

Выдающимся является и вклад физтеховцев в появление отечественного атомного оружия. Научным руководителем разработки урановой бомбы назначили самого Иоффе, а лабораторию возглавили крупнейшие ученые Курчатов и Харитон.

Мировую славу институт обрел благодаря разработкам в области полупроводников, в эпоху которых, по словам академика Жореса Алферова, мы сейчас и живем. В 2000-м за труды, «заложившие основу современной информационной техники, за развитие полупроводниковых гетероструктур для оптоэлектроники» группе физиков института была присуждена Нобелевская премия.





К юбилею ремонтируется фасад знаменитого здания Физтеха в Санкт-Петербурге на Политехнической, 26, а в районе Шувалово идет строительство и техническое перевооружение центра НИОКР. Компания «Диполь» имеет непосредственное отношение к проходящей реконструкции, о чем мы подробно расскажем в следующих номерах нашего журнала.

Сейчас же хочется от всей души поздравить институт со знаменательной датой, пожелать дальнейших успехов и выразить удовольствие от совместной работы. Компания «Диполь» может поделиться своим опытом в сфере проектирования, строительства и поставки оборудования, Физтех же дает нам фундаментальные знания в областях новых, прорывных технологий.

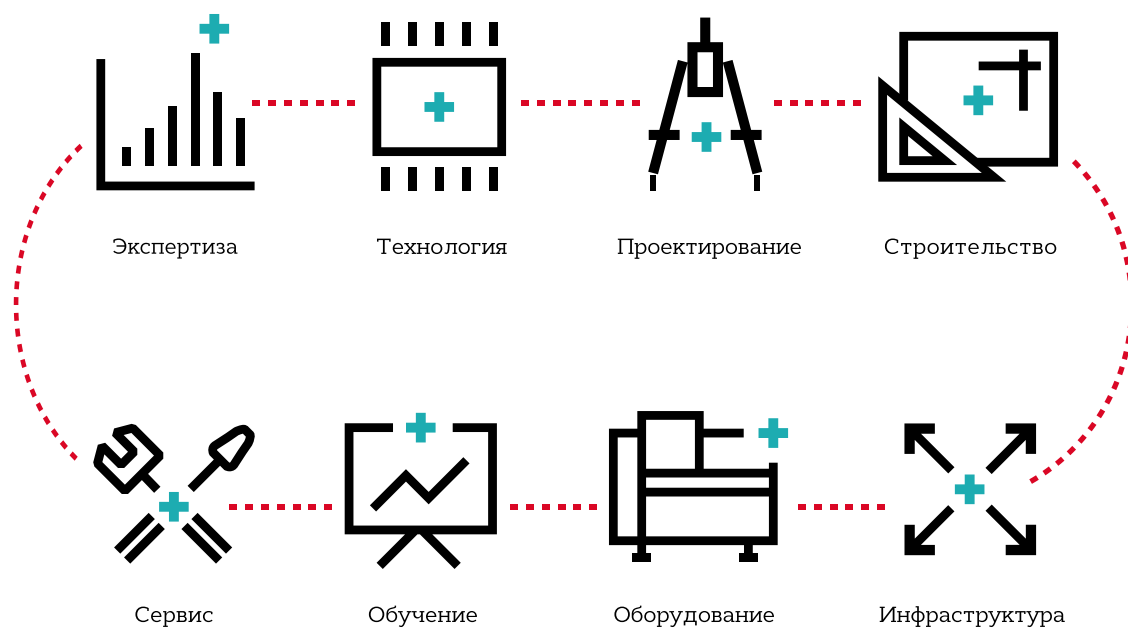


Синергия, возникающая в результате сотрудничества науки и бизнеса, не только способствует укреплению обоих партнеров, но и способна положительно повлиять на развитие отечественной микроэлектронной промышленности в целом.

Мы гордимся сотрудничеством с ФТИ имени А. Ф. Иоффе и выражаем надежду, что эта плодотворная работа продлится еще долгие годы.

## **+ Отраслевой интегратор**

**Решение ключевых задач при создании предприятия по производству радиоэлектронной аппаратуры**



[www.dipaul.ru](http://www.dipaul.ru)





 ДИПОЛЬ





#### САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Россия,  
197101, Санкт-Петербург,  
ул. Рентгена, д. 5б

Тел./факс: (812) 702-12-66  
E-mail: [info@dipaul.ru](mailto:info@dipaul.ru)

#### МОСКВА

Россия,  
127254, Москва,  
Огородный проезд, д. 20, стр. 1

Тел./факс: (495) 645-20-02  
E-mail: [msk@dipaul.ru](mailto:msk@dipaul.ru)

#### НИЖНИЙ НОВГОРОД

Россия,  
603057, г. Нижний Новгород,  
пр. Гагарина, д. 50, корпус 15, офис 106/2

Тел./факс: (831) 464-97-27  
E-mail: [nnov@dipaul.ru](mailto:nnov@dipaul.ru)

#### ЕКАТЕРИНБУРГ

Россия,  
620027, Екатеринбург,  
ул. Азина, д.24, офис 609

Тел./факс: (343) 227-12-66  
E-mail: [ekb@dipaul.ru](mailto:ekb@dipaul.ru)

#### КАЗАНЬ

Россия,  
420140, Казань,  
ул. Юлиуса Фучика, д. 90А, офис 619

Тел./факс: (843) 208-59-99  
E-mail: [kzn@dipaul.ru](mailto:kzn@dipaul.ru)

#### ПРАГА

Czech Republic,  
150 00 Prague 5,  
Plzenska 155/133

Tel./fax. +420 2 5573 9633  
E-mail: [info@dipaul.eu](mailto:info@dipaul.eu)



[info@dipaul.ru](mailto:info@dipaul.ru)  
[www.dipaul.ru](http://www.dipaul.ru)

**ЭКСПЕРТ+**  
ЗНАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИННОВАЦИИ