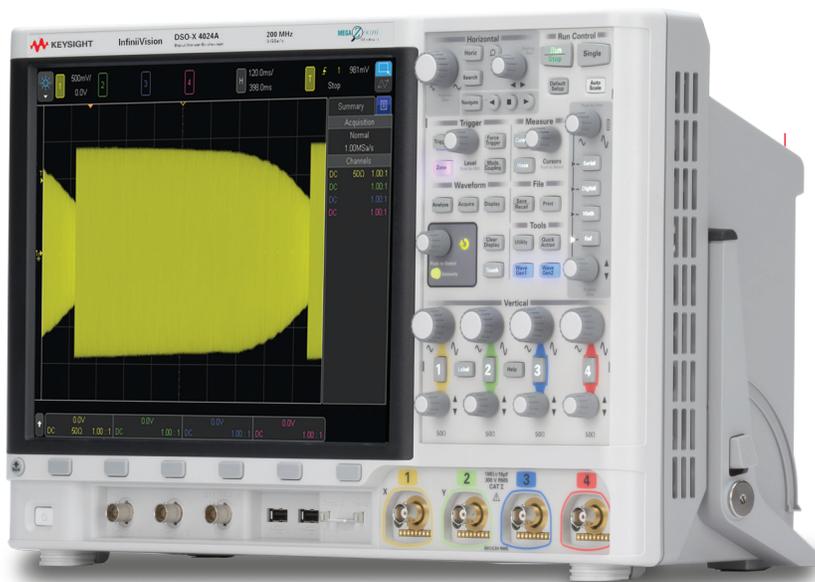


Keysight Technologies

Оценка полосы пропускания осциллографа,
необходимой для ваших приложений

Рекомендации
по применению



Введение

Полоса пропускания относится к тем характеристикам, которые при выборе осциллографа рассматривают в первую очередь. В этих рекомендациях по применению мы дадим вам некоторые полезные советы о том, как выбрать осциллограф с соответствующей полосой пропускания для цифровых и аналоговых приложений. Но сначала определим само понятие полосы пропускания.

Содержание

Введение	2
Определение полосы пропускания осциллографа	3
Полоса пропускания, необходимая для цифровых приложений.....	4
Сравнение измерений тактовой частоты.....	7
Полоса пропускания, необходимая для аналоговых приложений.....	9
Заключение	10
Глоссарий	11

Определение полосы пропускания осциллографа

Сигнальный тракт любого осциллографа обладает характеристикой фильтра нижних частот, которая спадает на высоких частотах, как показано на рис. 1. Большинство осциллографов с заявленной полосой пропускания 1 ГГц и ниже обладают гауссовской характеристикой, которая демонстрирует медленный спад, который начинается примерно с одной трети от частоты среза по уровню -3 дБ. Осциллографы с полосой пропускания больше 1 ГГц обычно имеют максимально плоскую амплитудно-частотную характеристику, как показано на рис. 2. Такая характеристика обычно является плоской в полосе пропускания и резко спадает на 3 дБ вблизи верхней граничной частоты.

Обе эти характеристики обладают своими достоинствами и недостатками. Осциллографы с максимально плоской характеристикой меньше подавляют сигналы внутри полосы пропускания, чем осциллографы с гауссовской характеристикой, а значит, они способны точнее измерять сигналы в пределах полосы пропускания. Но осциллографы с гауссовской характеристикой меньше подавляют сигналы за пределами полосы пропускания, чем осциллографы с максимально плоской характеристикой, а значит, осциллографы с гауссовской характеристикой обычно меньше затягивают фронты, чем осциллографы с максимально плоской характеристикой при одинаковых полосах пропускания. Но иногда сильное подавление сигналов вне полосы пропускания даёт определённые преимущества, помогая устранить высокочастотные компоненты, дающие вклад в наложные спектры в соответствии с теоремой Котельникова ($f_s > 2 \times f_{\text{МАКС}}$). Чтобы глубже понять теорему дискретизации Котельникова, познаться с рекомендациями по применению Keysight Technologies, Inc «Влияние частоты дискретизации осциллографа на достоверность выборки сигнала», ссылка на которые приведена в конце настоящего документа.

Но какой бы характеристикой ни обладал ваш осциллограф – гауссовской, максимально плоской или некоторой промежуточной, наименьшая частота, на которой входной сигнал ослабляется на 3 дБ, считается **верхней границей полосы пропускания осциллографа**. Полосу пропускания и амплитудно-частотную характеристику осциллографа можно измерить, свипируя частоту с помощью генератора синусоидального сигнала. Ослабление на 3 дБ соответствует погрешности амплитуды примерно -30% . Поэтому нельзя выполнять точные измерения сигналов, значительная часть спектра которых лежит вблизи верхней границы полосы пропускания осциллографа.

С полосой пропускания непосредственно связана другая характеристика осциллографа – время нарастания переходной характеристики. Осциллографы с гауссовской характеристикой обладают временем нарастания (измеренным по уровням 10% и 90%) примерно $0,35/f_{\text{н.п.}}$. Осциллографы с максимально плоской характеристикой, в зависимости от скорости спада АЧХ, обычно обладают временем нарастания в районе $0,4/f_{\text{н.п.}}$. Но не следует забывать, что время нарастания осциллографа не совпадает с самой короткой длительностью фронта, которую осциллограф может точно измерить. Временем нарастания осциллографа называется минимальная длительность фронта, которую осциллограф может воспроизвести, если подать на него гипотетический сигнал с бесконечно коротким фронтом (0 пс). И хотя этот теоретический параметр измерить невозможно, поскольку нельзя создать реальный сигнал с бесконечно коротким фронтом, время нарастания осциллографа можно измерить, подав на него сигнал, с длительностью фронта в 3 - 5 раз меньше, чем заявленное время нарастания осциллографа.

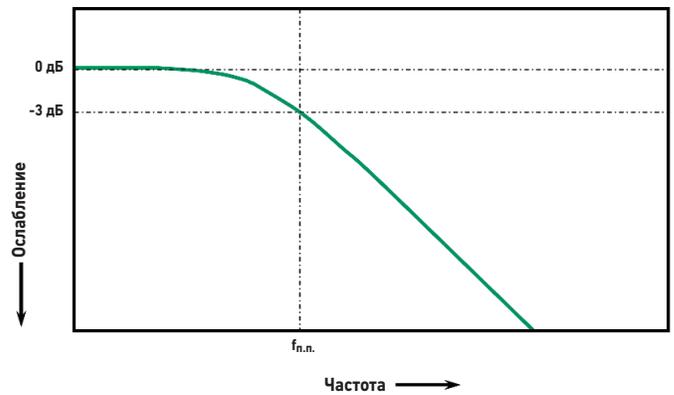


Рис. 1. Гауссовская АЧХ осциллографа

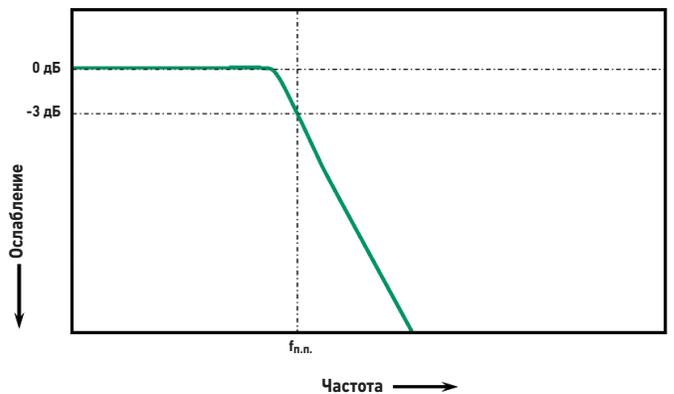


Рис. 2. Максимально плоская АЧХ осциллографа

Полоса пропускания, необходимая для цифровых приложений

Согласно простому правилу полоса пропускания осциллографа должна не менее чем в пять раз превышать самую высокую тактовую частоту вашей системы. Если осциллограф отвечает этому критерию, то он сможет захватить пятую гармонику с минимальным ослаблением сигнала. Эта составляющая очень важна для определения истинной формы цифровых сигналов. Но если вам нужно выполнить точные измерения крутых фронтов, то имейте в виду, что эта простая формула не учитывает реальных высокочастотных составляющих, из которых складываются крутые перепады сигнала.

Простое правило

$$f_{\text{п.п.}} \geq 5 \times f_{\text{такт}}$$

Более точный способ определения требуемой полосы пропускания осциллографа заключается в определении максимальной частоты, присутствующей в исследуемых цифровых сигналах, которая не является максимальной тактовой частотой. Максимальная частота определяется самым коротким фронтом вашей схемы. Поэтому в первую очередь нужно определить длительности фронтов самых высокоскоростных сигналов. Обычно эту информацию можно получить из официальных спецификаций компонентов, используемых в схеме.

Шаг 1. Определите минимальную длительность фронтов

Затем можно использовать простую формулу для вычисления максимальной частотной составляющей. Доктор Ховард У. Джонсон написал на эту тему целую книгу «Проектирование высокоскоростных цифровых устройств – начальный курс чёрной магии»¹. Он называет эту частотную составляющую частотой излома (knee) ($f_{\text{изл.}}$). Все крутые фронты имеют бесконечную ширину частотного спектра. Тем не менее, имеется перегиб (или «излом») частотного спектра крутых фронтов, за которой частотные составляющие с частотой выше $f_{\text{изл.}}$ практически не влияют на форму сигнала.

Шаг 2. Рассчитываем $f_{\text{изл.}}$

$$f_{\text{изл.}} = 0,5 / \text{Длительность фронта (10–90 \%)}$$

$$f_{\text{изл.}} = 0,4 / \text{Длительность фронт (20–80 \%)}$$

¹ Ховард У. Джонсон, «Проектирование высокоскоростных цифровых устройств – начальный курс чёрной магии», Prentice Hall, 1993 г.

Полоса пропускания, необходимая для цифровых приложений (продолжение)

Если фронт сигнала измеряется по уровню от 10 % до 90 %, то для получения $f_{изл.}$ нужно разделить 0,5 на длительность фронта сигнала. Если фронт сигнала измеряется по уровню от 20 % до 80 %, что в наше время встречается гораздо чаще, то для получения $f_{изл.}$ нужно разделить 0,4 на длительность фронта сигнала. И не следует путать эти длительности фронтов с заявленным временем нарастания осциллографа. В данном случае речь идёт о длительности фронта реального сигнала.

Третий шаг заключается в определении полосы пропускания осциллографа, необходимой для измерения такого сигнала, в зависимости от требуемой точности измерения длительности фронтов. В таблице 1 приведены формулы расчёта полосы пропускания при допустимой погрешности для осциллографов с гауссовской и максимально плоской характеристикой. Не забывайте, что большинство осциллографов с заявленной полосой пропускания ниже 1 ГГц обычно имеют гауссовскую характеристику, а большинство осциллографов с заявленной полосой пропускания выше 1 ГГц обычно имеют максимально плоскую характеристику.

Шаг 3. Расчёт полосы пропускания осциллографа

Допустимая погрешность	Гауссовская характеристика	Максимально плоская характеристика
20 %	$f_{п.п.} = 1,0 \times f_{изл.}$	$f_{п.п.} = 1,0 \times f_{изл.}$
10 %	$f_{п.п.} = 1,3 \times f_{изл.}$	$f_{п.п.} = 1,2 \times f_{изл.}$
3 %	$f_{п.п.} = 1,9 \times f_{изл.}$	$f_{п.п.} = 1,4 \times f_{изл.}$

Таблица 1. Формулы для расчёта необходимой полосы пропускания в зависимости от допустимой погрешности и типа АЧХ

Полоса пропускания, необходимая для цифровых приложений (продолжение)

Теперь давайте рассмотрим простой пример:

Определите минимальную требуемую полосу пропускания осциллографа с гауссовской АЧХ для измерения фронта длительностью 500 пс (10–90 %)

Если сигнал имеет время нарастания/спада примерно 500 пс (по уровню 10–90 %), то максимальная значимая частотная составляющая ($f_{изл.}$) сигнала будет равна примерно 1 ГГц.

$$f_{изл.} = (0,5/500 \text{ пс}) = 1 \text{ ГГц}$$

Если вас устраивает погрешность измерения 20 %, то можно использовать осциллограф с полосой пропускания 1 ГГц. Но если вам нужна погрешность 3 %, то лучшим выбором будет осциллограф с полосой пропускания 2 ГГц.

Погрешность измерения временных интервалов 20 %:
Полоса пропускания осциллографа = $1,0 \times 1 \text{ ГГц} = 1,0 \text{ ГГц}$

Погрешность измерения временных интервалов 3 %:
Полоса пропускания осциллографа = $1,9 \times 1 \text{ ГГц} = 1,9 \text{ ГГц}$

Теперь выполним измерения цифрового сигнала тактовой частоты с характеристиками, близкими к тем, что использованы в нашем примере, используя при этом осциллографы с разной полосой пропускания.

Сравнение измерений тактовой частоты

На рис. 3 показана результирующая осциллограмма, полученная при измерении сигнала тактовой частоты 100 МГц с фронтами длительностью 500 пс (по уровню 10-90 %) с помощью осциллографа с полосой пропускания 100 МГц. Как видите, этот осциллограф просто пропускает основную гармонику сигнала 100 МГц, и наш прямоугольный тактовый сигнал становится очень похожим на синусоиду. Осциллограф с полосой пропускания 100 МГц может быть хорошим решением для отладки многих 8-разрядных микроконтроллеров с тактовыми частотами от 10 до 20 МГц, но для измерения тактовой частоты 100 МГц такой полосы явно не достаточно.

На рис. 4 показано то же измерение, выполненное с помощью осциллографа с полосой пропускания 500 МГц. Этот осциллограф может захватить пятую гармонику измеряемого сигнала, что соответствует нашей первой простой рекомендации. Но при измерении длительности фронта мы видим, что этот осциллограф показывает примерно 800 пс. В этом случае осциллограф не может очень точно измерять фронты нашего сигнала. На самом деле этот осциллограф показал значение, близкое к его собственному времени нарастания (700 пс), а не длительность фронта входного сигнала, которая близка к 500 пс. Если для нас важна длительность фронтов, то для выполнения такого измерения нужен осциллограф с большей полосой пропускания.



Рис. 3. Тактовая частота 100 МГц, захваченная осциллографом с полосой пропускания 100 МГц



Рис. 4. Тактовая частота 100 МГц, захваченная осциллографом с полосой пропускания 500 МГц

Сравнение измерений тактовой частоты (продолжение)

Воспользовавшись осциллографом с полосой пропускания 1 ГГц, мы получим куда более точную осциллограмму, как показано на рис. 5. Если выполнить измерение длительности фронта на этом осциллографе, то мы получим примерно 600 пс. Погрешность этого измерения составляет примерно 20 %, что может быть вполне приемлемым, особенно в условиях ограниченного бюджета. Однако даже это измерение можно считать недостаточно достоверным. Если вам нужна погрешность измерения фронтов длительностью 500 пс не более 3 %, то вам понадобится осциллограф с полосой пропускания 2 ГГц или больше, в соответствии с приведённой выше формулой.

Воспользовавшись осциллографом с полосой пропускания 2 ГГц, мы увидим точное представление сигнала тактовой частоты с очень точным измеренным значением длительности фронта примерно 520 пс, как показано на рис. 6.

Обратите внимание, если требования по полосе пропускания уже приобретенного Вами осциллографа ужесточились, то у некоторых осциллографов компании Keysight, например InfiniiVision серии X и Infiniium, полосу пропускания можно расширять в любой момент времени до максимального значения в модельном ряде серии.



Рис. 5. Тактовая частота 100 МГц, захваченная осциллографом с полосой пропускания 1 ГГц



Рис. 6. Тактовая частота 100 МГц, захваченная осциллографом с полосой пропускания 2 ГГц

Полоса пропускания, необходимая для аналоговых приложений

Много лет назад большинство производителей осциллографов рекомендовало использовать осциллографы с полосой пропускания, как минимум в три раза превышающей максимальную частоту исследуемого сигнала. Хотя это трёхкратное превышение неприменимо к цифровым приложениям, к аналоговым сигналам, таким как модулированные ВЧ сигналы, его применять всё ещё можно. Чтобы понять, откуда берётся это правило «три к одному», давайте рассмотрим реальную АЧХ осциллографа с полосой пропускания 1 ГГц.

На рис. 7 показан результат измерения сигнала, свипируемого по частоте (от 20 МГц до 2 ГГц), на осциллографе Keysight с полосой пропускания 1 ГГц. Как видите, ровно на 1 ГГц входной сигнал затухает примерно на 1,7 дБ, что хорошо укладывается в ограничение –3 дБ, которое определяет полосу пропускания этого осциллографа. Однако для точного измерения аналоговых сигналов нужно использовать осциллограф в той части диапазона, где его характеристика достаточно равномерна и демонстрирует минимальное ослабление. Примерно на одной трети от полосы 1 ГГц этот осциллограф практически не создаёт ослабления (0 дБ). Однако не все осциллографы ведут себя подобным образом.

Показанный на рис. 8 результат свипирования получен на осциллографе с полосой пропускания 1,5 ГГц другого производителя. Здесь мы видим пример весьма неравномерной АЧХ. Характеристику этого осциллографа нельзя назвать ни гауссовской, ни максимально плоской. Она скорее «максимально неравномерная» с большими всплесками и провалами, что может привести к сильным искажениям как аналоговых, так и цифровых сигналов. К сожалению, заявленная полоса пропускания осциллографа по уровню –3 дБ ничего не говорит об ослаблении или усилении на других частотах. Даже на частоте, равной одной пятой от полосы пропускания этого осциллографа, сигналы ослабляются примерно на 1 дБ (10 %).

Так что в этом случае правило 3X не даёт хорошего результата. Выбирая осциллограф, надо выбирать производителя с хорошей репутацией и уделять пристальное внимание относительной неравномерности АЧХ осциллографа.

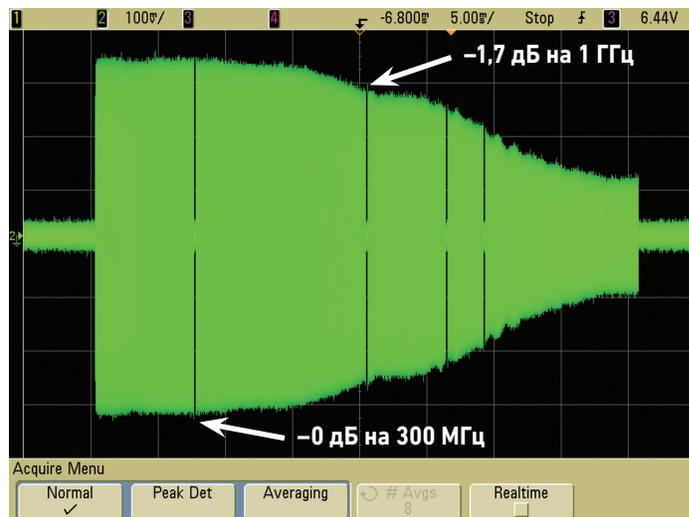


Рис. 7. АЧХ осциллографа Keysight MS07104В с полосой пропускания 1 ГГц

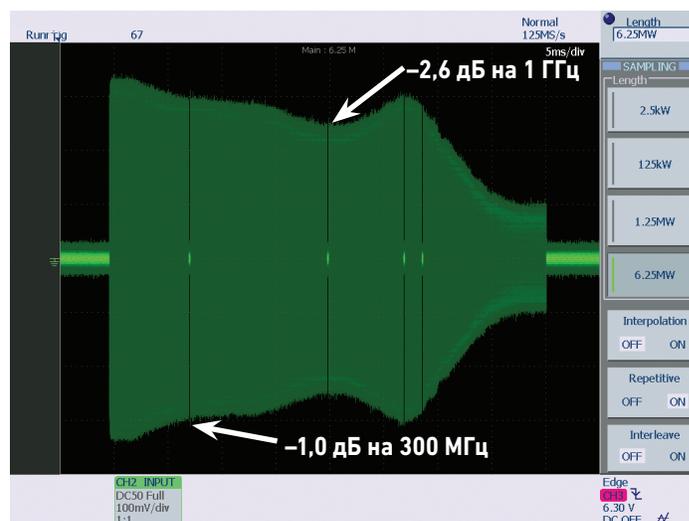


Рис. 8. АЧХ осциллографа с полосой пропускания 1,5 ГГц другого производителя

Заключение

Для цифровых приложений нужно выбирать осциллограф, полоса пропускания которого как минимум в пять раз превышает максимальную частоту тактового сигнала вашей схемы. Но если вам нужно точно измерять длительность фронтов сигналов, то придётся определить максимальную значимую частоту исследуемого сигнала.

Для аналоговых приложений выбирайте осциллограф, полоса пропускания которого как минимум в три раза превышает максимальную частоту аналогового сигнала в вашей схеме. Но эта простая рекомендация применима лишь к осциллографам с относительно равномерной АЧХ в нижней трети полосы пропускания. Как раз с этим у осциллографов Keysight всё в порядке.

И выбирая осциллограф для текущей работы, не забывайте о завтрашних задачах. Если бюджет позволяет, купите осциллограф с небольшим запасом по полосе пропускания, и в будущем это сэкономит вам деньги. Но если в перспективе вам понадобится ещё более широкая полоса пропускания, воспользуйтесь возможностью расширения полосы пропускания осциллографов Keysight.

Ссылка на приборы

Самая последняя и полная информация о приложениях и приборах приведена на нашем сайте по ссылке:

www.keysight.com/find/scopes

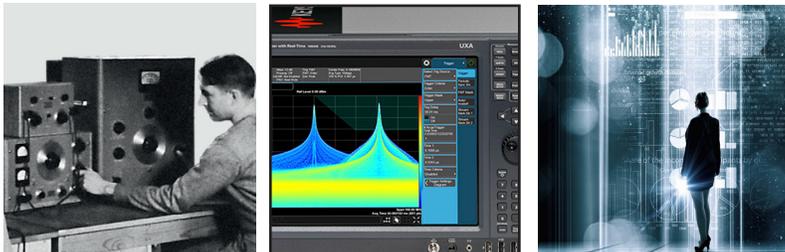
Глоссарий

Гауссовская АЧХ	Характеристика ФНЧ, имеющая медленный спад, который начинается примерно на 1/3 от частоты среза по уровню –3 дБ. Осциллографы с заявленной полосой пропускания 1 ГГц и ниже обычно обладают характеристикой, близкой к гауссовской.
Сигналы в полосе пропускания	Частотные компоненты, частота которых меньше верхней границы полосы пропускания по уровню –3 дБ.
Частота излома	Максимальная «значимая» частота ($f_{изл.}$), определяющая форму цифрового импульса, которую можно рассчитать по известной длительности фронта сигнала (обычно доступной в технических характеристиках применяемого компонента).
Максимально плоская характеристика	Характеристика ФНЧ, достаточно плоская ниже частоты среза по уровню –3 дБ и резко спадающая вблизи частоты среза. Осциллографы с заявленной полосой пропускания больше 1 ГГц обычно обладают максимально плоской характеристикой.
Теорема Котельникова	Утверждает, что для сигнала с ограниченной полосой и максимальной частотой $f_{МАКС}$, частота равномерно распределённых выборок f_s должна как минимум вдвое превышать максимальную частоту $f_{МАКС}$, чтобы сигнал можно было однозначно восстановить без наложения спектров.
Верхняя граница полосы пропускания осциллографа	Минимальная частота, на которой входной синусоидальный сигнал ослабляется на 3 дБ (погрешность амплитуды –30 %).
Время нарастания осциллографа	Самое малое время нарастания сигнала, которую может воспроизвести осциллограф, если входной сигнал имеет бесконечно малое время нарастания. Для осциллографов с примерно гауссовской АЧХ время нарастания можно вычислить по формуле $0,35/f_{н.п.}$. Осциллографы с максимально плоской характеристикой обычно имеют время нарастания в районе $0,4/f_{н.п.}$.
Сигналы вне полосы пропускания	Частотные компоненты, частота которых больше частоты среза по уровню –3 дБ.
Свипающее измерение АЧХ	Измерение, использующее генератор сигналов, частота выходного синусоидального сигнала которого периодически перестраивается от установленной пользователем нижней частоты до установленной пользователем верхней частоты для определения АЧХ некоторого прибора или устройства.

Развиваемся с 1939 года

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, услуг, знаний и опыта наших инженеров поможет вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От Hewlett-Packard и Agilent к Keysight.



myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

Персонализированная подборка только нужной вам информации.

http://www.keysight.com/find/emt_product_registration

Зарегистрировав свои приборы, вы получите доступ к информации о состоянии гарантии и уведомлениям о выходе новых публикаций по приборам.

KEYSIGHT SERVICES
Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight

www.keysight.com/find/service

Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по поверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



Планы технической поддержки Keysight

www.keysight.com/find/AssurancePlans

ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight

www.keysight.com/find/channelpartners

Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.

Российское отделение

Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: tmo_russia@keysight.com

www.keysight.ru

Сервисный Центр

Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб, 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-16-10-14)



www.keysight.com/go/quality

Keysight Technologies, Inc.

Сертифицировано DEKRA на соответствие стандарту ISO 9001:2015
Система управления качеством