

Построитель АЧХ — осциллограф или анализатор спектра?

Владимир ДЬЯКОНОВ,
д. т. н., профессор
vpdyak@yandex.ru

Цифровые осциллографы используются для анализа сигналов во временной области, тогда как анализаторы спектра делают это в частотной области. Однако в практике исследования и тестирования радиоцепей, устройств и компонентов часто возникают особые задачи, для решения которых могут использоваться те или иные приборы совместно с цифровыми генераторами различных сигналов. В статье сравниваются возможности этих приборов в построении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) компонентов и приводятся примеры работы с ними. Показана возможность построения АЧХ в широком диапазоне частот (от дозвуковых до СВЧ) с большим динамическим диапазоном по уровню.

Основная схема снятия АЧХ

АЧХ — важная характеристика многих 4-полюсников и компонентов (фильтров, резонаторов, усилителей и др.). Она представляет зависимость модуля коэффициента передачи тестируемого устройства от частоты. В настоящее время интенсивное развитие получил новый класс приборов — векторные анализаторы цепей, которые позволяют снимать АЧХ в комплексной форме или в виде модуля коэффициента передачи и фазового сдвига от частоты. Однако это очень дорогие и редкие приборы.

Во многих случаях вполне достаточно применения скалярных построителей АЧХ, например, на основе генератора качающейся частоты (ГКЧ), детектора и осциллографического индикатора (рис. 1). Генератор качающейся частоты обеспечивает получение синусоидального тестирующего сигнала, частота которого пропорциональна уровню модулирующего напряжения или его логарифму. Модулирующий пилообразный сигнал подается также на вход горизонтального канала, а сигнал с выхода тестируемого устройства (4-полюсника) через детектор подается на вход вертикального канала индикаторного устройства (осциллографа). В результате тестируемое устройство последовательно испытывается синусоидальным сигналом с плавно меняющейся частотой, и на его экране строится график АЧХ тестируемого устройства.

Еще недавно измерители АЧХ, работающие в широком диапазоне частот, были сложными, громоздкими, тяжелыми и дорогими приборами. Например, советские измерители АЧХ Х1-40, Х1-46, Х1-56 с диапазоном частот от 20 Гц до 1, 0,2 и 0,2 МГц соответственно имели

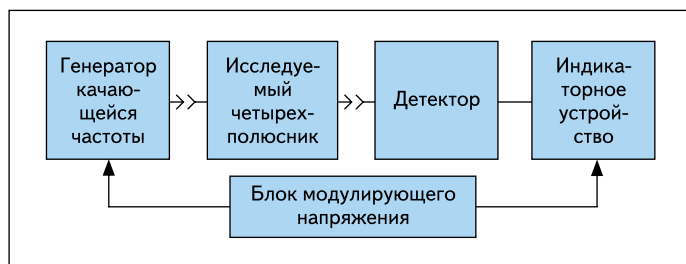


Рис. 1. Функциональная схема построителя АЧХ на базе ГКЧ и осциллографического индикатора

вес 35, 42 и 44 кг, а измеритель Х1-43 с диапазоном частот от 0,5 МГц до 1,25 ГГц весил даже 47 кг [1]. Стабильность частоты их была низкой, порою очень низкой.

Важным параметром измерителей АЧХ является динамический диапазон по уровню — разность между максимальным уровнем отсчета АЧХ и средним уровнем шумовой дорожки. При линейном масштабе по уровню (вертикали) у упомянутых приборов он лежит в пределах 14–24 дБ, то есть невелик, и только при логарифмическом масштабе достигает 40 дБ и выше. Получение высокого динамического диапазона при снятии АЧХ — одна из целей данной статьи.

Переход на микроэлектронную элементную базу и применение прямого цифрового синтеза частот позволили создать новое поколение генераторов с высочайшей стабильностью частоты и перестройкой ее от тысячных долей герц до нескольких гигагерц (а порою и десятков гигагерц). Как правило, это малогабаритные приборы умеренного веса, имеющие много общего в интерфейсе пользователя и в основных установках (например, частоты и уровня).

Снятие АЧХ осциллографом без применения детектора

Одним из препятствий в получении точных АЧХ различных компонентов и большого динамического диапазона является применение детектора. К сожалению, полупроводниковые диоды, на основе которых строятся детекторы, имеют резко нелинейную вольт-амперную характеристику с порогом при уровне напряжения в доли вольта. В результате наблюдается зона нечувствительности детекторов в области малых напряжений и значительные искажения при среднем уровне сигналов — в единицы вольт. Это приводит к значительному снижению динамического диапазона построителей АЧХ. В ряде случаев, например на частотах выше десятков мегагерц, недостаточно и быстрое действие диодов.

Указанные недостатки принципиально устраняются удалением детектора и построением АЧХ в виде зависимости уровня осциллограммы синусоидального ВЧ-сигнала от его частоты. При этом осциллограф должен быть достаточно высокочастотным для непосредственного просмотра сигнала с выхода тестируемого устройства [4, 5]. На максимальной исследуемой частоте осциллографа спад его АЧХ обычно нормируется на уровне –3 дБ (или 0,7 от уровня на низких

частотах). Такой спад АЧХ (иногда возможен и ее подъем) создает недопустимо большую погрешность. Чтобы она была незначительна (на уровне 0,5–1 дБ), верхняя граничная частота осциллографа должна в несколько раз превышать полосу частот тестируемого устройства. Она в первую очередь определяется максимальной частотой генератора качающейся частоты. Наметилась тенденция применения в качестве последнего высокостабильных цифровых генераторов с прямым частотным синтезом, в частности генераторов произвольных функций и форм сигналов [2, 3]. Их применение позволяет расширить число видов сигналов, используемых для тестирования.

На рис. 2 показано окно настройки генератора произвольных функций AFG3101 фирмы Tektronix, используемого в режиме генератора качающейся частоты с перекрытием области частот от 1 кГц до 100 МГц (это максимальная частота для данного генератора). Задано качание синусоидального сигнала по линейному закону. Для этого используется линейно-нарастающий модулирующий сигнал с длительностью линейной части 10 мс и нулевым временем возврата.

Старшие модели генераторов класса AFG3000 имеют максимальные частоты синусоидального сигнала до 240 МГц. Но многие цифровые генераторы синусоидальных сигналов с прямым частотным синтезом, например SM300 фирмы Rohde&Schwarz, имеют максимальную частоту до 3 ГГц и выше. Как правило, все они допускают режим качания частоты от минимального значения (нередко намного ниже 100 кГц) до максимального (3 ГГц и выше). Этим, а также высочайшей стабильностью частоты (порядка 10^{-6}) они выгодно отличаются от применяемых ранее аналоговых ГКЧ на основе LC-генераторов с частотой, управляемой варикапом или подмагничиванием ферритового сердечника индуктора.

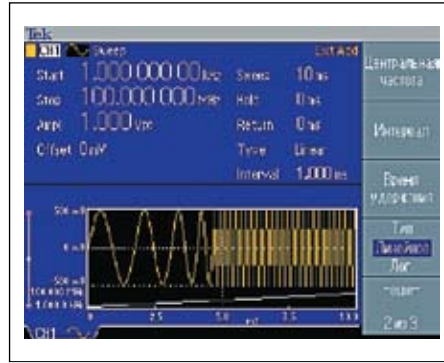


Рис. 2. Пример установок генератора AFG3101 для качания в полосе частот от 1 кГц до 100 МГц

Для просмотра полной полосы частот нужно подключить вход внешнего запуска осциллографа к выходу запуска генератора, то есть обеспечить запуск осциллографа в режиме ждущей развертки от генератора. Кроме того, следует обеспечить равенство длительностей пилы управляющего напряжения ГКЧ и развертки осциллографа. Для этого нужно установить коэффициент развертки равным 1 мс/дел., поскольку его масштабная сетка по горизонтали имеет 10 делений, и это дает длительность развертки, равную 10 мс. Получаемая осциллограммой АЧХ система генератор — осциллограф представлена на рис. 3. Ручкой горизонтального смещения график АЧХ центрируется на экране.

Эта осциллограмма получена при согласованной работе генератора с выходным сопротивлением 50 Ом с осциллографом, у которого входное сопротивление также равно 50 Ом. В данном случае вид АЧХ почти идеален: есть только едва заметное ослабление сигнала на высоких частотах. Если переключить входное сопротивление осциллографа на 1 МОм (без удлинения соединительных проводов), то АЧХ лишь немного ухудшится, а уровень сигнала возрастет вдвое.

Роль памяти осциллограмм

Стоит сразу отметить специфический недостаток цифровых осциллографов — ограниченное объемом памяти осциллограмм число их точек, что обусловлено дискретизацией сигнала. Этот недостаток принципиально отсутствует у аналоговых осциллографов, но их выпуск в наше время резко сокращен (стоимость широкополосных аналоговых осциллографов намного превосходит стоимость цифровых осциллографов). Приведенные далее примеры даны с применением цифрового осциллографа Tektronix DPO4101 с максимальной частотой исследуемого сигнала 1 ГГц и памятью осциллограмм каждого канала до 10 Мбайт. Это лучший из осциллографов компании Tektronix с закрытой архитектурой [4, 5]. Поскольку у приборов используется кодирование каждой точки 1 байтом, то число точек осциллограмм практически равно объему используемой памяти.

Выясним влияние памяти осциллограмм на отображение АЧХ. На рис. 3 показана АЧХ в идеализированном виде — при отсутствии тестируемого устройства. Точнее говоря, им является отрезок кабеля, соединяющего выход генератора с выбранным входом осциллографа. Сигнал воспроизводится как широкая полоса, ширина которой равна двойной амплитуде сигнала генератора. Яркость полосы растет по мере роста частоты генератора. Разумеется, частоту нужно определять не по яркости, а по времени горизонтальной шкалы, пропорциональному частоте.

На рис. 4 воспроизведен этот случай при памяти осциллограмм в 1 Мбайт. Воспроизведение полосы сигнала теперь явно неудовлетворительное и создает ложное впечатление о резком изменении частоты в центре экрана.

Если уменьшить числа точек до 100 000 (рис. 5), то воспроизведение сигнала становится совершенно неудовлетворительным

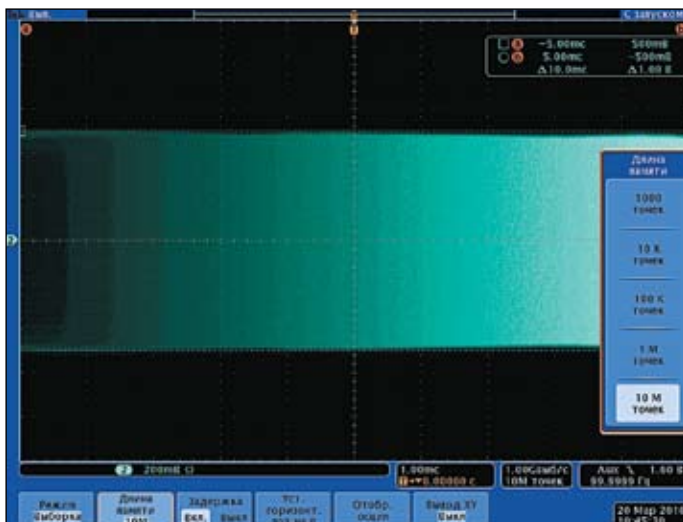


Рис. 3. АЧХ осциллографа DPO4101 в полосе частот от 1 кГц до 100 МГц при числе точек осциллограммы 10 млн

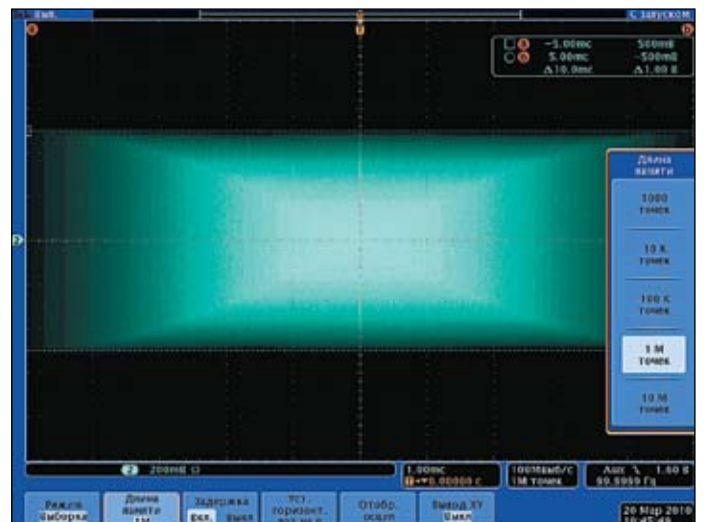


Рис. 4. АЧХ осциллографа DPO4101 в полосе частот от 1 кГц до 100 МГц при числе точек осциллограммы, равном 1 млн

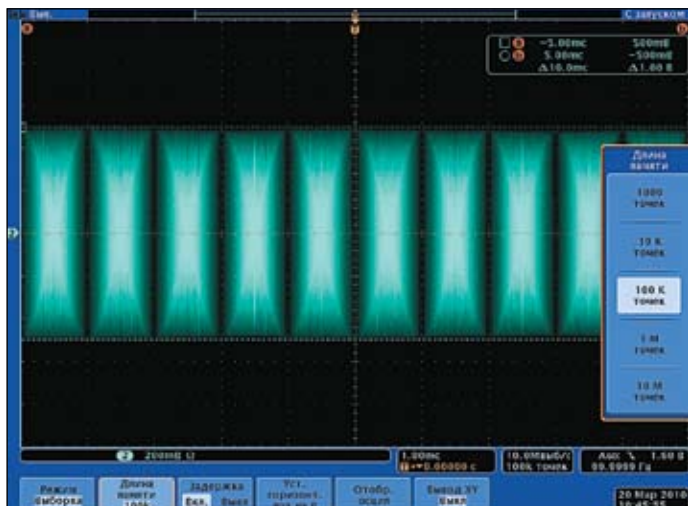


Рис. 5. АЧХ осциллографа DPO4101 в полосе частот от 1 кГц до 100 МГц при числе точек осциллограммы 100 000

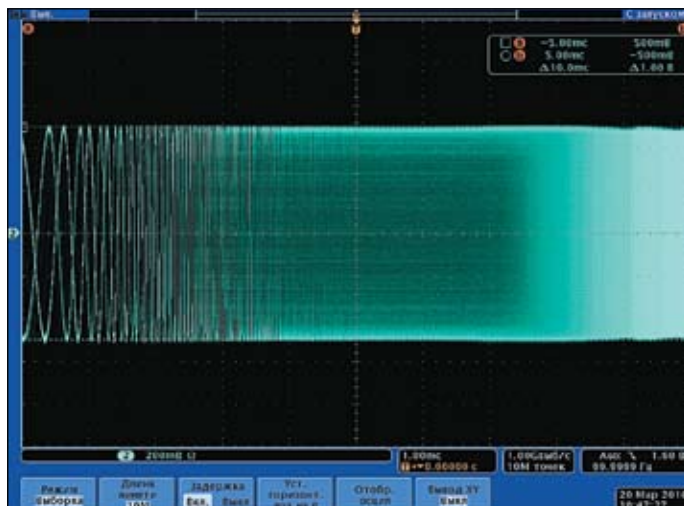


Рис. 6. АЧХ осциллографа DPO4101 в полосе частот от 1 кГц до 100 МГц при длине памяти 10 Мбит и логарифмическом масштабе по частоте

(при числе точек 10 000 ситуация еще хуже). Таким образом, данный метод применим далеко не со всеми цифровыми осциллографами: он требует применения приборов с большой емкостью памяти (и числом точек) осциллограмм.

Логарифмический масштаб по оси частот

Многие генераторы обеспечивают качество частоты по логарифмическому закону. На рис. 6 показано снятие АЧХ осциллографа для этого случая. Поскольку начальная часть АЧХ в данном случае растягивается, в левой части стал виден синусоидальный характер меняющегося по частоте сигнала. Небольшая неравномерность АЧХ хорошо видна в правой части осциллограммы. К сожалению, шкала времен у самого осциллографа остается линейной, что сильно затрудняет измерение частот на пиках и впадинах АЧХ прямо по масштабной сетке.

Фактически тут нужна сменная масштабная сетка с логарифмическим масштабом (рис. 7).

АЧХ осциллографа с фильтром нижних частот

Теперь покажем, насколько сильно меняется АЧХ при наличии в усилителе осциллографа фильтра нижних частот с граничной частотой около 20 МГц: АЧХ четко фиксирует спад на этой частоте. При установленном логарифмическом частотном масштабе он выглядит довольно резким. Динамический диапазон при линейном масштабе составляет не меньше десятков раз.

АЧХ осциллографических пробников

Из приведенных примеров ясно, что этот метод применим до максимальной частоты генератора в 100 МГц у генератора AFG3101

(и до 240 МГц у старших моделей генераторов этого класса). Таким образом, он охватывает весьма широкий диапазон частот — от инфразвуковых, звуковых, длинных, средних и коротких волн до УКВ. Это позволяет исследовать не только узкополосные, но и широкополосные компоненты — например, осциллографические пробники для осциллографов умеренного быстродействия, видеоусилители и другие устройства.

На рис. 8 показана АЧХ компенсированного пробника серии HP с коэффициентом деления 100. Хорошо видно, что пробник передает все частоты, но имеет заметную волнистость АЧХ. Ее основной причиной является несогласование 50-омного выхода генератора с большим (10 МОм, параллельно с емкостью около 10 пФ) входным сопротивлением пробника. АЧХ дает отчетливое представление о степени частотных искажений пробника и объясняет наблюдаемые на коротких фронтах импульсов колебательные процессы.

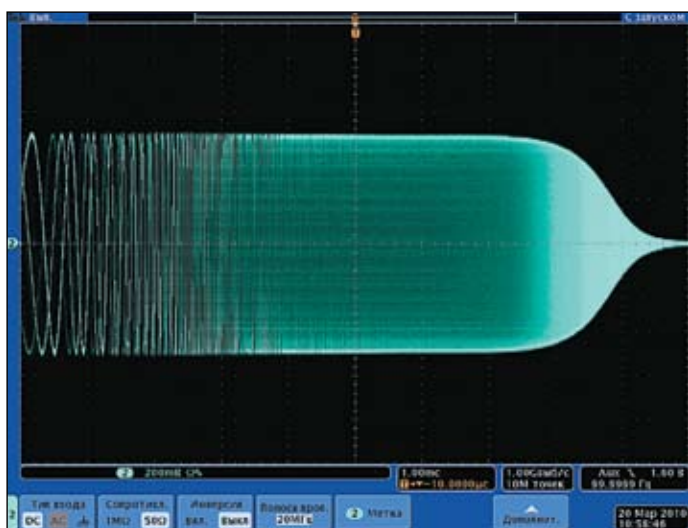


Рис. 7. АЧХ осциллографа DPO4101 с фильтром на 20 МГц в логарифмическом масштабе по частоте

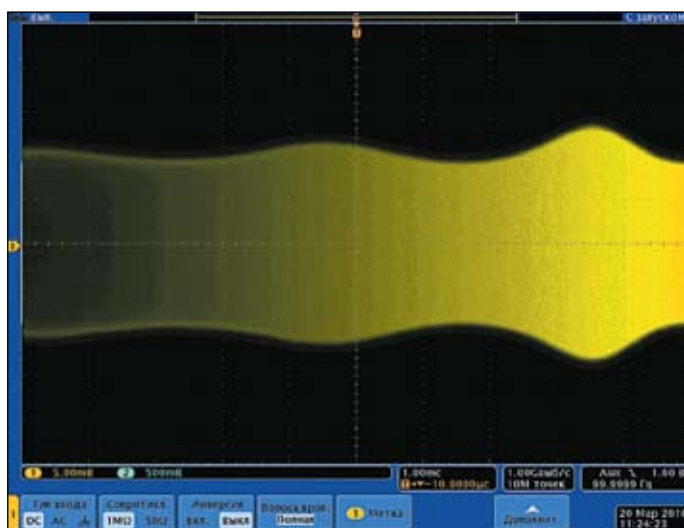


Рис. 8. АЧХ осциллографического пробника 1:100

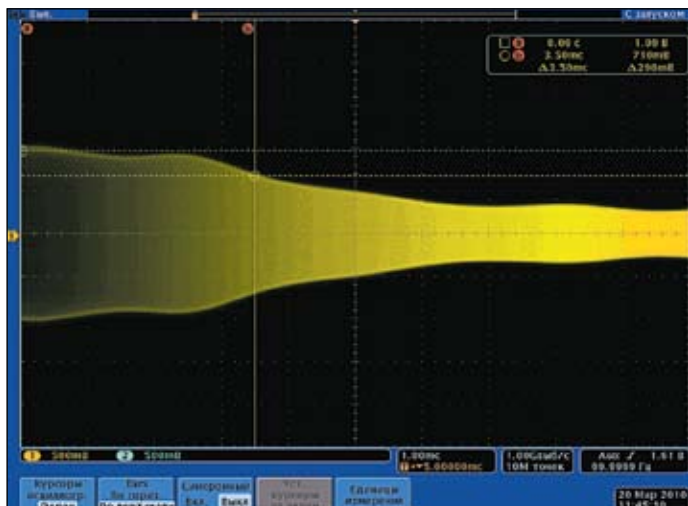


Рис. 9. АЧХ пробника к осциллографу Tektronix TDS2024В с переключателем в положении 1:1

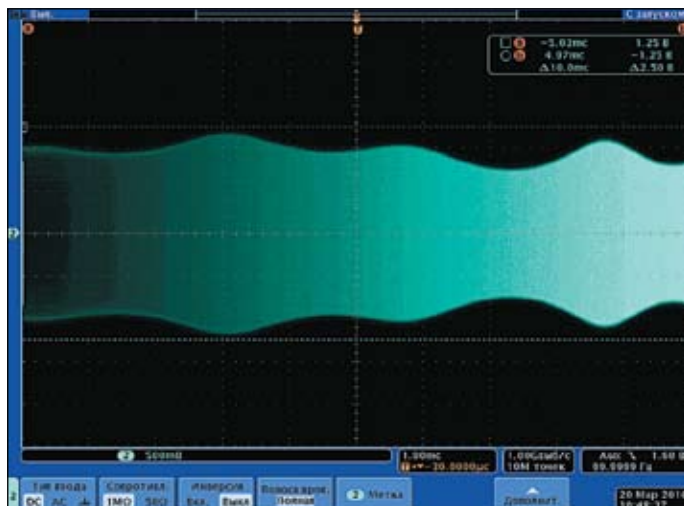


Рис. 11. АЧХ дифференциального пробника DP-150pro с линейным масштабом по частоте

Некоторые пробники при коэффициенте передачи 1:1 дают сильный спад АЧХ (рис. 9). Кстати, здесь показана техника применения курсоров для определения частоты, на которой спад АЧХ составляет -3 дБ или по уровню до 0,707 от максимального. Для многих такое поведение пробника кажется неожиданным. Оно связано со значительным увеличением входной емкости осциллографа на величину некомпенсированной в данном случае емкости коаксиального кабеля с длиной около метра. Эта емкость может достигать 50–100 пФ и выше. При недостаточно коротких проводниках (например, земляного), имеющих заметную индуктивность (в десятки наногенри), это приводит к неравномерности АЧХ и колебаниям переходной характеристики пробника. Поэтому рекомендуется применять пробник без ослабления только при наблюдении низкочастотных сигналов (не выше десятка мегагерц).

Построение АЧХ активного дифференциального пробника

Одно из главных применений измерителей АЧХ — это построение АЧХ четырехполюсников, к которым относятся всевозможные усилители, резонансные цепи, фильтры и иные устройства. Некоторые из них конструируются с учетом согласования на входе и на выходе с сопротивлениями в 50 или 75 Ом. В этом случае построение АЧХ описанным методом не вызывает особых трудностей и просто требует соединений тестируемого прибора с генератором и осциллографом стандартными 50- или 75-омными коаксиальными кабелями.

Однако очень многие устройства (особенно усилители ДВ, СВ и КВ диапазонов волн) имеют высокое входное сопротивление — от единиц кОм до 1 МОм и выше. В этом случае остро стоит задача построения согласующих устройств, например, эмиттерных



Рис. 10. Внешний вид высоковольтного активного дифференциального пробника DP-150pro фирмы Pintek

повторителей на биполярных транзисторах или истоковых повторителей на полевых транзисторах. Сама по себе разработка таких согласующих устройств требует снятия их АЧХ в широком диапазоне частот.

В последнее время в числе аксессуаров для осциллографов появились дифференциальные пробники, построенные на основе широкополосных интегральных операционных усилителей. Помимо функций преобразования импедансов, эти пробники обеспечивают получение осциллограмм напряжений между двумя произвольными точками. Большинство таких сверхширокополосных пробников очень дороги и рассчитаны на применение в низковольтных цепях.

Однако есть и приятные исключения. Фирма Pintek, к примеру, выпускает серию высоковольтных дифференциальных пробников DP-25/50/100/150/200 в виде приставок к осциллографам. Цифра указывает верхнюю граничную частоту пробников (нижняя равна 0). К примеру, пробник DP-150pro (рис. 10) имеет верхнюю граничную частоту 150 МГц на пределах ослабления 30, 100, 300 и 1000 раз и 100 МГц на пределе ослабления 10 раз. Пробник позволяет исследовать

сигналы с уровнем до 10 кВ, что значительно расширяет возможности осциллографов.

Следует отметить, что полосы частот выше 20–30 МГц такие пробники реализуют только при тщательной оптимизации цепей подключения. Прилагаемые к ним стандартные высоковольтные провода длиной около 60 см и наконечники для них использовать на частотах выше 20 МГц нельзя. Пробники имеют очень высокое входное сопротивление и малую входную емкость. Например, у пробника DP-150pro входное сопротивление при дифференциальном включении равно 100 МОм параллельно с емкостью 1 пФ, что позволяет слабо нагружать большинство тестируемых компонентов даже с высокоомным входом. Это ослабляет, но не устраняет полностью влияние подводящих сигналы проводов. Такие пробники можно использовать как согласующие устройства для снятия АЧХ 4-полюсников с высоким входным сопротивлением.

На рис. 11 показана АЧХ пробника DP-150pro в полосе частот до 100 МГц. Заметная волнистость АЧХ обусловлена длинными соединительными проводами и отсутствием согласования на выходе генератора. Такая АЧХ отражает реалии работы с пробником этого типа, описанные выше. Вид АЧХ сильно зависит от конструктивного оформления его подключения.

АЧХ входной цепи осциллографа с резонансами

На рис. 12 представлена АЧХ резонансной цепи RLCR, которая образуется включением между выходом генератора и входом осциллографа (они по 50 Ом) индуктивности в 36 мкГн и емкости 2200 пФ. Цепь дает отчетливо видимый резонансный пик на частоте около 0,6 МГц. Добротность цепи мала, поскольку ее общее сопротивление в 110 Ом велико (10 Ом добавляет активное сопротивление индуктора).

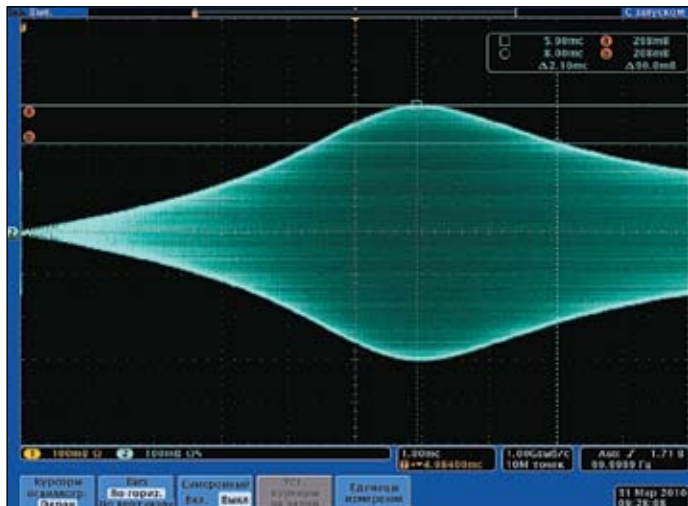


Рис. 12. АЧХ резонансной RLCR-цепи в полосе частот до 1 МГц при входном сопротивлении осциллографа 50 Ом

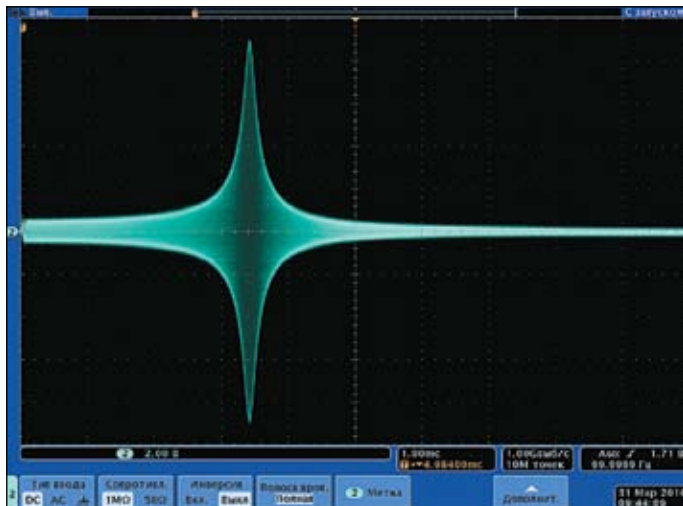


Рис. 13. АЧХ RLCR-цепи при переключении входного сопротивления осциллографа на 1 МОм

Однако если переключить входное сопротивление осциллографа на 1 МОм, то данный последовательный резонанс пропадает. Зато появляется новый параллельный резонанс на частоте около 3,4 МГц. На этот раз он обусловлен индуктивностью L , входной емкостью осциллографа и кабеля C_0 . Резонанс представлен довольно острым пиком, что свидетельствует о достаточно высокой добротности вызвавшего его контура.

По частоте резонанса:

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC_0})$$

можно определить входную емкость осциллографа, которая составляет около 57 пФ. Таким образом, исследование осциллографа по его АЧХ четко выявляет возможность существования двух резонансов входной цепи при наличии индуктивности L между выходом генератора и входом осциллографа и их проявление в различных условиях.

Установки для снятия АЧХ в узкой полосе частот с помощью ГКЧ и анализатора спектра

Казалось бы, естественно применять в роли измерителя АЧХ стандартные анализаторы спектра [6, 7]. Сейчас промышленность выпускает их, пожалуй, даже больше, чем осциллографов. Анализаторы спектра имеют простые установки нужного диапазона частот — путем задания начальной Start и конечной End частот анализа или средней Center частоты и полосы частот качания SPAN. Кроме того, в отличие от осциллографа, горизонтальная ось изображения на экране анализатора спектра отградуирована по частоте, а вертикальная — по логарифму уровня. Маркеры анализатора ориентированы на работу с частотами и с линейным или логарифмическим масштабом по уровню. Высокая чувствительность анализатора спектра, малый уровень шумов и наличие ряда высококачественных (нередко цифровых) де-

текторов обещают получение АЧХ в широком динамическом диапазоне по уровню. А наличие высококачественного детектора (часто цифрового) позволяет, в отличие построителя АЧХ на основе осциллографа без детектора, строить АЧХ в привычном «однополярном» виде.

Однако анализаторы спектра не предназначены непосредственно для снятия АЧХ. Они служат для выделения множества гармоник из сложного сигнала и их представления на экране индикатора в виде острых пиков. Фактически анализаторы спектра являются узкополосными супергетеродинными радиоприемниками, оснащенными фильтрами для выделения гармоник. Полоса пропускания фильтров зачастую намного уже, чем полоса частот компонентов, АЧХ которых исследуется. Тем не менее при использовании специальных приемов измерений и настроек измерительных приборов анализаторы спектра могут успешно применяться для построения (совместно с ГКЧ) высококачественных графиков АЧХ.

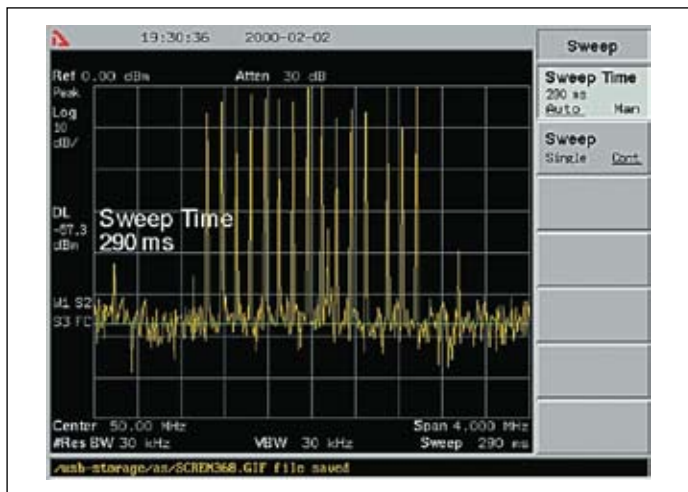


Рис. 14. Типичный спектр сигнала с выхода ГКЧ при отсутствии синхронизации между ним и анализатором спектра

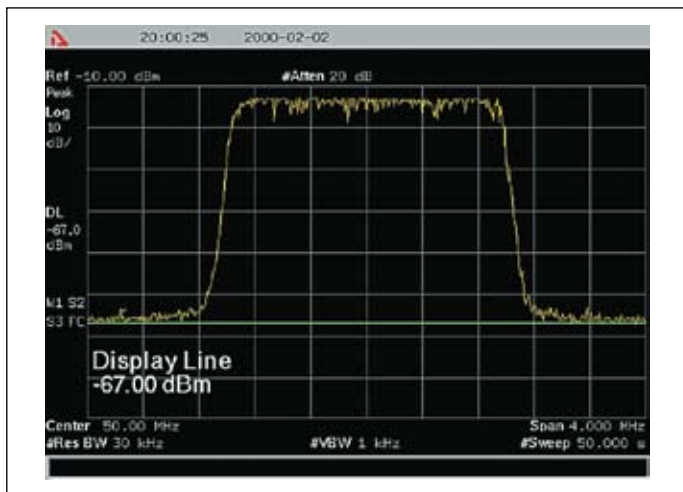


Рис. 15. Окно анализатора спектра АКС-1301 с установками для просмотра АЧХ в диапазоне от 49 до 51 МГц

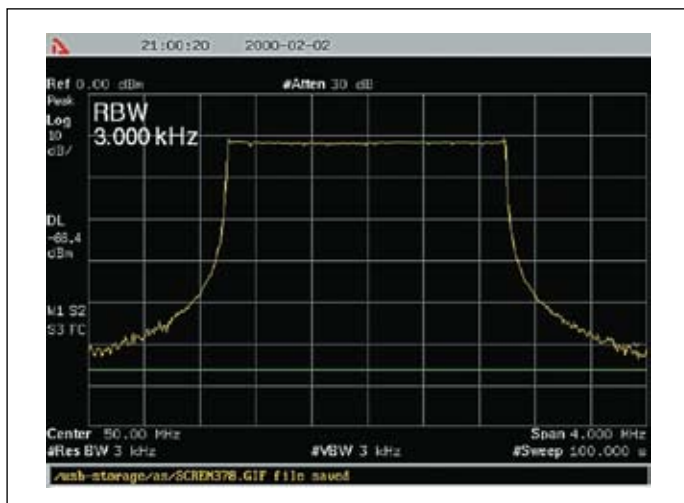


Рис. 16. Окно анализатора спектра АКС-1301 с установками для просмотра АЧХ в диапазоне от 49 до 51 МГц после оптимизации установок анализатора

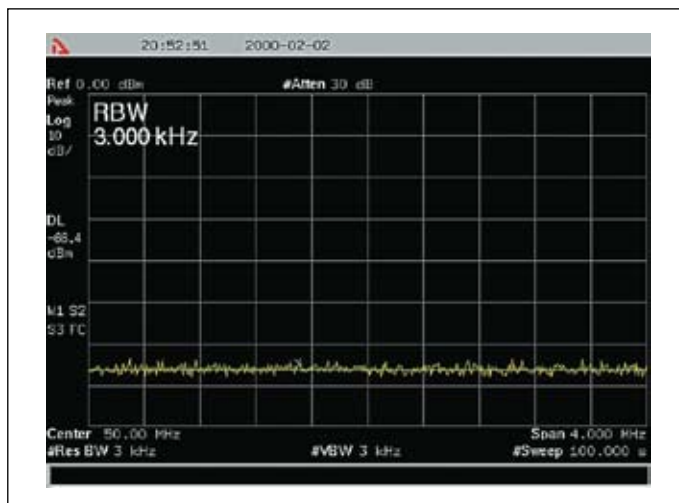


Рис. 17. Окно анализатора спектра АКС-1301 с установками рис. 14 при отсутствии сигнала (видна шумовая полоса и линия дисплея)

Вначале рассмотрим такое применение для тестирования сравнительно узкополосных устройств. Для примера создадим с помощью генератора AFG3101 сигнал, частота которого линейно меняется от 49 до 51 МГц за 10 мс. Для этого в окне генератора (рис. 2) достаточно заменить частоты Start и End на 49 и 51 МГц соответственно.

Теперь рассмотрим, как осуществить установки массового анализатора спектра АКТАКОМ АКС-1301 [7] для контроля АЧХ в этом узком диапазоне частот. Если просто подключить выход генератора к входу анализатора спектра, то на экране будет виден упорядоченный (при синхронной работе развертки генератора и анализатора) или случайный набор пиков спектра, показанный на рис. 14. Можно заметить, что пики находятся в заданной области частот генератора. Однако они дают отдельные, причем случайные, отсчеты АЧХ, а не сам полный ее график.

Если отсчетов достаточно много и АЧХ фильтров пересекаются, то, используя пиковый детектор анализатора, можно получить почти непрерывную АЧХ в требуемой полосе частот, намного более широкой, чем полоса RBW выбранного фильтра. Этот полезный прием показан на рис. 15. Главное в данном случае — выбрать время анализа спектра Sweep значительно большим, чем время качания частоты у ГКЧ. В нашем примере время анализа выбрано вручную равным 50 с, и на экране (рис. 15) отчетливо видна АЧХ системы генератор — анализатор с полочкой в области частот от 49 до 51 МГц. Пиковый детектор обычно применяется по умолчанию.

Уменьшив полосы частот RBW и VBW анализатора и увеличив время анализа до 100 секунд, можно получить еще более качественную (гладкую) АЧХ системы генератор — анализатор, показанную на рис. 16. Рабочий участок АЧХ тут выглядит почти как идеальная горизонтальная прямая.

Широкое горизонтальное плато на рис. 15 и рис. 16 — это и есть область частот, которую можно частично или полностью использовать при применении анализатора спектра в качестве построителя АЧХ. Можно убедиться в том, что границы плато меняются в соответствии с изменением границ качания частоты (рис. 13). Естественно, с помощью анализатора спектра можно выбрать более узкий рабочий диапазон частот в пределах этого участка.

Чтобы определить динамический диапазон такого построителя АЧХ, нужно проделать еще один опыт — построить спектральную линию при отключенном генераторе. Это показано на рис. 17. Полученная внизу линия спектра — это шумовая дорожка анализатора, характеризующая минимальный уровень сигналов, которые способен различить анализатор. На основе рис. 15 и рис. 16, где показана линия дисплея, установленная в середину шумовой дорожки, можно сделать вывод, что динамический диапазон (разность высоты

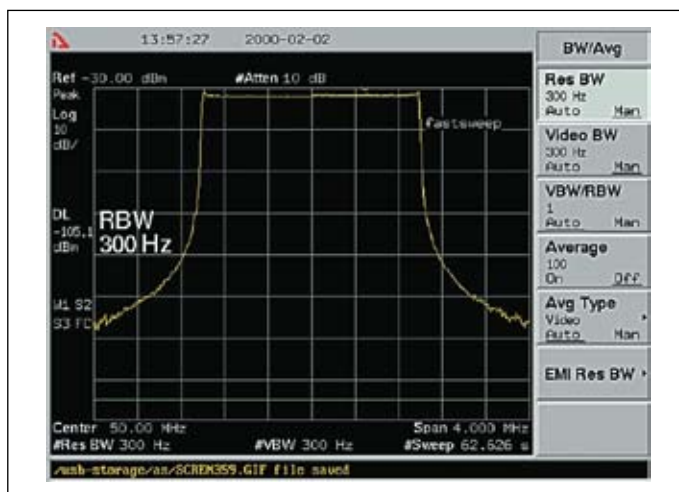


Рис. 18. Окно анализатора спектра АКС-1301 с установками для просмотра АЧХ в диапазоне от 49 до 51 МГц при минимизации полос фильтров

плато и линии дисплея) составляет не менее 55 дБ. Это очень хороший, хотя и не максимально возможный показатель.

Уменьшив полосы частот RBW и VBW до минимально возможных значений в 300 Гц, можно значительно уменьшить шум анализатора и получить АЧХ, представленную на рис. 18. Динамический диапазон системы генератор — анализатор в этом случае достигает значений более 70 дБ. Это очень высокий показатель для измерителей АЧХ. Для уменьшения времени построения АЧХ можно вручную уменьшить параметр Sweep (время перестройки частоты анализатора). Если это нарушает естественные установки анализатора, то на экране появляется сообщение FastSweep (слишком быстрая развертка). Обычно это вполне допустимо.

Снятие АЧХ осциллографических пробников с помощью ГКЧ и анализатора спектра

Аналогичным образом можно настроить анализатор спектра для просмотра АЧХ в широком диапазоне частот. На рис. 19 показана АЧХ системы генератор — анализатор в полосе частот от 1 кГц до 100 МГц. Как видно, и в данном случае в рабочей полосе частот АЧХ практически идет горизонтально, а динамический диапазон составляет около 60 дБ. Он меньше, чем при узкой полосе, и это вполне естественно: как известно, уровень шума увеличивается с ростом полосы отображаемых анализатором частот. Напоминаем, что это идеальный



Рис. 19. Окно анализатора спектра АКС-1301 с установками для просмотра АЧХ в диапазоне от 0 до 100 МГц

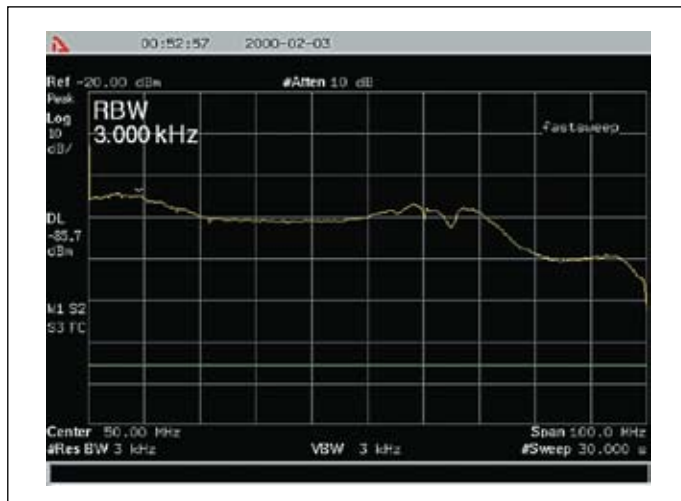


Рис. 20. АЧХ дифференциального пробника Pintek DP-150pro, полученная с помощью анализатора спектра АКС-1301 и генератора AFG3101 (делитель ×10)

случай: 50-омный выход генератора подключен к 50-омному входу анализатора спектра через 50-омный коаксиальный кабель.

При таких установках система генератор — анализатор позволяет осуществлять просмотр АЧХ многих реальных объектов. При этом высокая чувствительность анализатора спектра позволяет выявить различные факторы, влияющие на форму АЧХ и ее равномерность. Так, четко выявляется несогласование импедансов тестируемого устройства с выходом генератора и входом анализатора, неидеальность разъемов, повреждения и невысокое качество соединительных кабелей, внешние и внутренние помехи, просачивание сигнала генератора через паразитные емкости устройства (даже выключенного) и т. д. АЧХ, приближающиеся к идеальным (рис. 19, например), на практике получить очень трудно и для этого надо тщательно устранять все причины возникновения неравномерности АЧХ.

В качестве примера рассмотрим АЧХ высоковольтного дифференциального пробника Pintek DP-150pro. Она показана на рис. 20 для установки делителя в положение ×10. Как и следовало ожидать, в области низких частот кривая АЧХ просела примерно на 20 дБ (это соответствует ослаблению делителя в 10 раз). Хотя АЧХ не идеальна, в полосе частот до 70 МГц ее неравномерность не превышает ±3 дБ и имеет два более глубоких спада, начинающихся с частот 70 и 95 МГц. При этом АЧХ подобна снятой на рис. 11 с применением генератора и осциллографа.

Далее рассмотрим АЧХ пробника с установкой делителя в положение ×30 (рис. 21). Теперь в области низких частот АЧХ просела из-за уменьшения коэффициента передачи делителя. В целом неравномерность АЧХ уменьшилась, что соответствует описанию пробника.

Однако при дальнейшем уменьшении коэффициента деления можно наблюдать четкое снижение уровня АЧХ только в области низких частот (примерно до 45 МГц). На более высоких частотах поведение АЧХ не меняется, и это является показателем того, что на таких частотах сигнал просто просачивается на выход делителя через паразитные емкости (рис. 22). Это подтверждается наблюдением АЧХ в положении делителя ×1000 и даже OFF (пробник отключен от источника питания).

Снятие АЧХ с помощью анализатора спектра с трекинг-генератором

Многие современные унифицированные анализаторы спектра имеют опцию встроенного цифрового трекинг-генератора, который вырабатывает почти синусоидальный сигнал, частота которого меняется в тех же пределах, что и частота перестройки анализатора спектра. Разумеется, современный измерительный цифровой генератор имеет больше возможностей, чем трекинг-генератор: независимую установку частот и их качания, отсутствие искажений на низ-

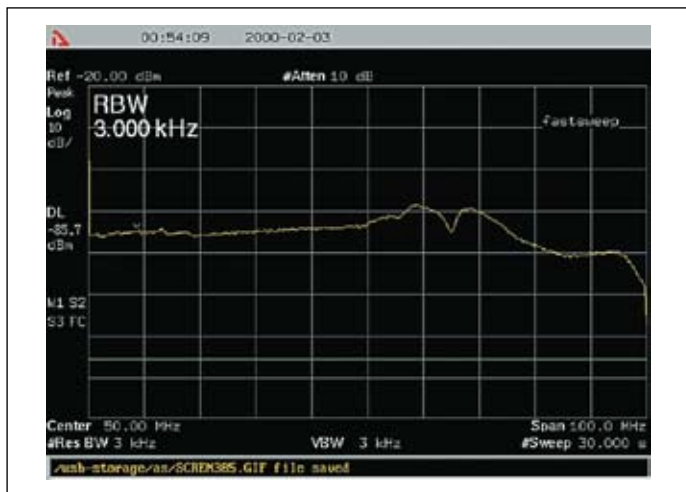


Рис. 21. АЧХ дифференциального пробника Pintek DP-150pro, полученная с помощью анализатора спектра АКС-1301 и генератора AFG3101 (делитель ×30)

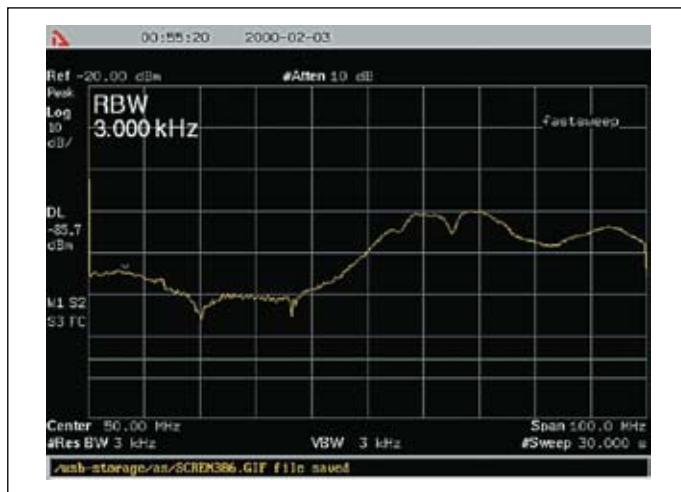


Рис. 22. АЧХ дифференциального пробника Pintek DP-150pro (делитель в положении ×1000)

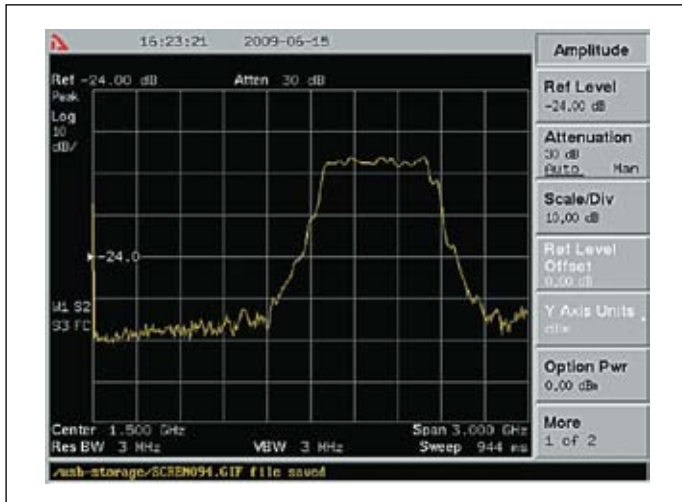


Рис. 23. Пример построения АЧХ коэффициента передачи СВЧ полосового фильтра

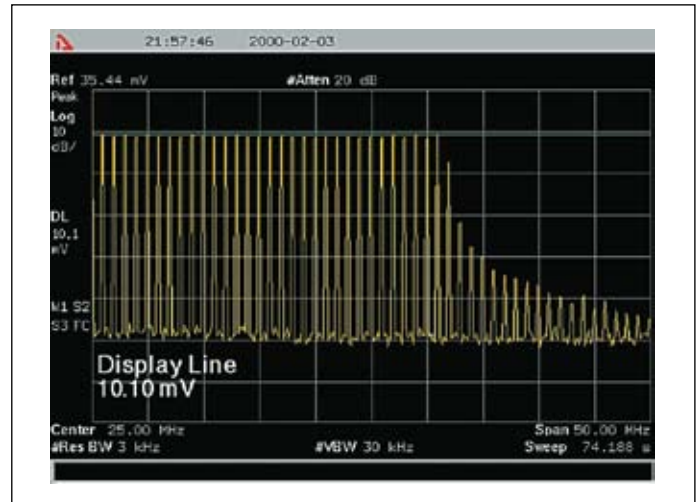


Рис. 25. Спектр сигнала $\sin(t/\tau)/(t/\tau)$ при частоте его повторения 1 МГц и амплитуде 1 В

ких частотах, более чистый сигнал, широкий диапазон регулировки уровней и т. д. Тем не менее трекинг-генератор является мощным средством расширения возможностей анализатора спектра, превращающим его в построитель АЧХ.

Нижняя граничная частота у трекинг-генераторов различных анализаторов спектра лежит в пределах от десятков герц до десятков мегагерц. Например, у трекинг-генератора анализатора спектра АКС-1301 она равна 150 кГц при уровне сигнала от 0 до -50 дБ, а у новейших бюджетных китайских анализаторов спектра DSA 1020/1030 фирмы RIGOL она составляет 10 МГц при уровне сигнала от 0 до -20 дБ.

Обычно анализатор спектра с трекинг-генератором имеет важную функцию — калибровку тракта трекинг-генератор — анализатор. При калибровке выход генератора подключается к входу анализатора отрезком коаксиального кабеля. После запуска калибровки обычно неравномерная АЧХ системы становится почти идеально равномерной и горизонтальной. Таким образом, происходит почти идеальная нейтрализация неравномерности АЧХ тракта трекинг-генератор — анализатор спектра.

По завершении калибровки (а она повторяется при изменении основных настроек анализатора спектра по частоте и уровню) нужно отключить кабель выхода генератора и подключить его к тестируемому устройству. А выход последнего надо подключить к входу анализатора. На рис. 23 показан пример построения АЧХ СВЧ полосового фильтра с полосой частот примерно от 1,6 до 2,4 ГГц. Динамический диапазон при измерении АЧХ составляет около 40 дБ, что для такой широкой полосы очень неплохо.

Некоторые анализаторы спектра, например АКС-1301, способны измерять обратные потери 4-полосников и коэффициенты отражения. Для точного измерения этих параметров анализаторы имеют опцию — мост

для измерения обратных потерь. С этой опцией также проводится калибровка, а затем измерение этих параметров [7].

Как видно из приведенных примеров, применение трекинг-генератора особенно эффективно при исследовании СВЧ-компонентов и возможно в полной полосе частот анализатора спектра (до 3 ГГц у использованного прибора). При этом, в отличие от более низкочастотных измерений, время построения АЧХ при автоматической установке параметров прибора оказывается достаточно малым — 944 мс.

Использование спектров импульсных сигналов

Для построения АЧХ зачастую возможно использование спектров импульсных сигналов. Такие сигналы не требуют изменения частоты в ходе перестройки анализатора спектра и осуществляют не последовательное, а параллельное тестирование исследуемых устройств. На вход устройства подается не один синусоидальный сигнал с меняющейся частотой, а сразу множество сигналов (спектр) с постоянными частотами гармоник.

Естественно, в первую очередь для этого логично применять сигналы, дающие равномерный спектр в определенном диапазоне частот. Уникальным является сигнал вида $\sin(t/\tau)/(t/\tau)$, теоретически обеспечивающий строгое постоянство уровня гармоник спектра до частоты $f_{\max} = 1/\tau$. Современные цифровые генераторы сигналов произвольной формы, как правило, способны создавать такой сигнал (рис. 24).

Оценим его спектр, создаваемый генератором AFG3101 (рис. 25). Сигнал при такой частоте дает 31 гармонику с уровнем 10,1 мВ каждая. В данном случае у анализатора обновлено измерение уровня гармоник в единицах напряжения, а не мощности. Спектр сигнала практически идеально равномерен вплоть до частоты чуть выше 30 МГц. Такой

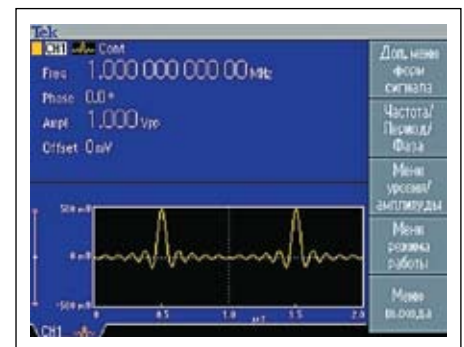


Рис. 24. Установки генератора AFG3101 для получения сигнала вида $\sin(t/\tau)/(t/\tau)$

спектр можно успешно использовать для тестирования во всем диапазоне длинных, средних и коротких волн.

Схемы для создания такого сигнала мало известны и не распространены. Куда проще получить сигналы в виде почти прямоугольных импульсов с большой скважностью. В качестве примера на рис. 26 показан спектр трапецеидального импульса с длительностью полки 10 нс и фронтов 4 нс. Спектр построен для диапазона частот от 0 до 100 МГц. Если считать допустимым спад уровня гармоник до -3 дБ, то полоса частот почти равномерного спектра лежит в пределах до 40 МГц.

Увеличив полосу частот RBW фильтра до 1 МГц, можно построить огибающую спектра. Этот случай показан на рис. 27.

Пример построения огибающей спектра трапецеидального импульса в широкой полосе частот (до 500 МГц) показан на рис. 28. В данном случае отчетливо видны периодически повторяющиеся спады огибающей спектра, характерные для почти прямоугольных импульсов.

Импульсные сигналы можно использовать для тестирования линейных устройств, например, фильтров из компонентов L, C и R, резонаторов и т. д. Однако их применение для тестирования устройств на активных компонентах не всегда разумно из-за возможности

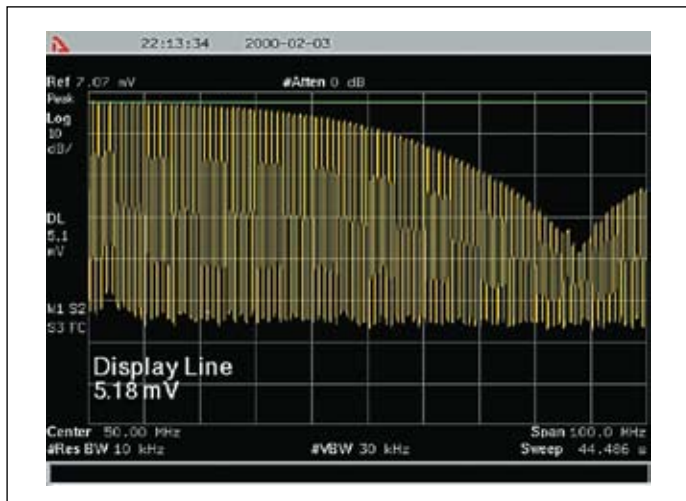


Рис. 26. Спектр трапецидального импульса

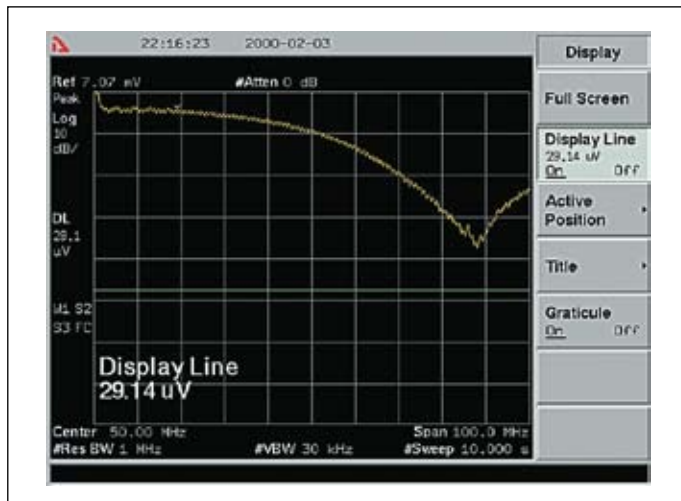


Рис. 27. Пример построения огибающей (АЧХ) спектра трапецидального импульса в диапазоне частот до 100 МГц

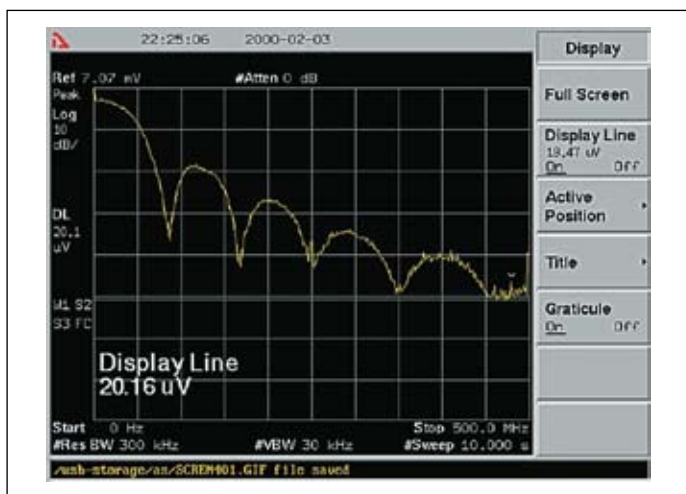


Рис. 28. Пример построения огибающей (АЧХ) спектра трапецидального импульса в диапазоне частот до 500 МГц

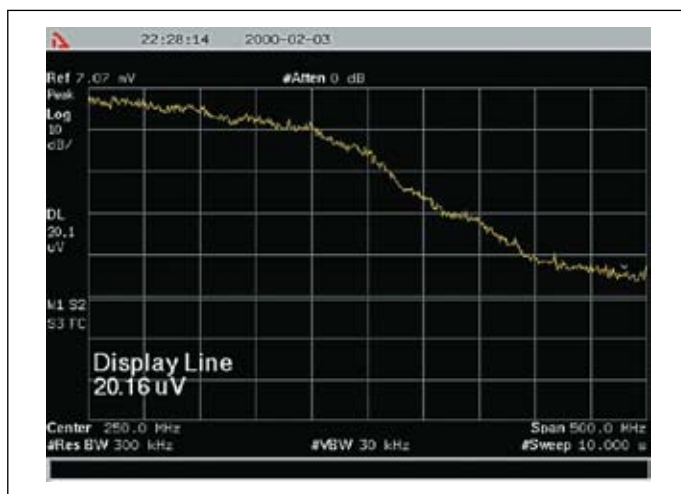


Рис. 30. Огибающая спектра шумового сигнала

перегрузки таких устройств импульсами, амплитуда которых многократно превышает амплитуду создаваемых ими гармоник. Однако стоит отметить, что такое тестирование близко к реальным условиям работы многих устройств, когда на их входе действует множество сигналов одновременно.

Использование спектра шума

Еще одним методом испытания различных устройств является тестирование их сигналом в виде широкополосного шума. Установки генератора AFG3101 на получение такого шума показаны на рис. 29. Здесь приведен и вид шумового сигнала с разверткой во времени. Единственным параметром шума является его амплитуда.

Спектр такого шума сплошной, а не дискретный. Поэтому с помощью шума в принципе можно выявить тонкие особенности АЧХ, невидные при дискретном характере спектра. На рис. 30 показано построение

огибающей спектра шумового сигнала от генератора AFG3101 в диапазоне частот от 0 до 500 МГц. При уровне спада огибающей -3 дБ реализуется частотный диапазон равномерного спектра примерно до 200 МГц. Это вдвое больше, чем максимальная частота данного генератора в режиме ГКЧ.

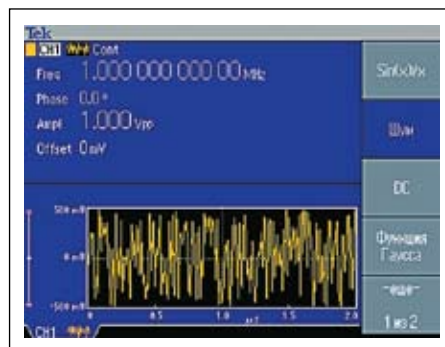


Рис. 29. Установки генератора AFG3101 для генерации шума

На рис. 31 показана АЧХ высоковольтного дифференциального пробника DP-150pro, снятая с помощью шумового сигнала в полосе частот от 0 до 500 МГц.

АЧХ на частоте около 100 МГц содержит подозрительный короткий пик. Для выяснения его природы была снята шумовая дорожка при уменьшении амплитуды сигнала до 0. Она показана на рис. 32. В диапазоне частот от 0 до 150 МГц отчетливо видны пики электромагнитных помех, причем особенно большой из них приходится на частоту около 100 МГц. Он вызван работой местной УКВ радиовещательной станции.

Моделирование компонентов в MATLAB с построением их АЧХ

На всех этапах проектирования компонентов важная роль принадлежит их математическому моделированию. Особенно это относится к начальному этапу проектирования, когда руки разработчика не дошли до создания

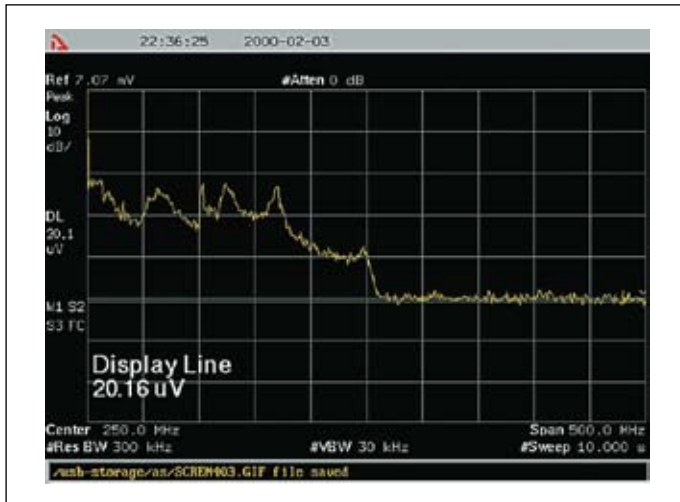


Рис. 31. АЧХ высоковольтного дифференциального пробника DP-150pro, снятая с помощью шумового сигнала в полосе частот от 0 до 500 МГц

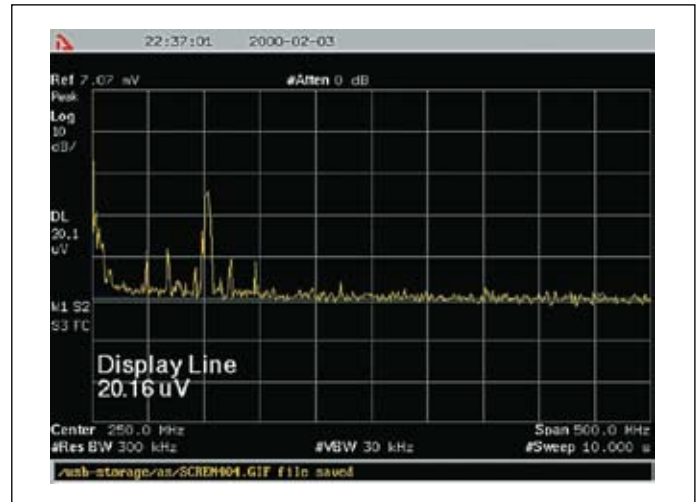


Рис. 32. Спектр сигнала с выхода пробника при отсутствии входного сигнала

макетных образов компонентов. Сравнение результатов моделирования с натурным испытанием компонентов, описанным выше, способно выявить немало тонкостей работы, учет которых позволяет повысить качество проектируемых изделий и обеспечить их должную функциональность.

Применительно к радиочастотным цепям высокую наглядность математического моделирования дает пакет расширения RF Blockset матричной системы MATLAB с пакетом визуально-ориентированного блочного математического моделирования Simulink [8]. В этой системе можно отлаживать все описанные выше методы исследования радиочастотных компонентов. Ограничимся примером построения АЧХ двух полосовых фильтров (рис. 33) с применением для этого генератора шума Random Noise и анализато-

ров спектра на основе быстрого преобразования Фурье FFT.

Заключение

Как показано выше, построение АЧХ различных тестируемых устройств возможно различными методами, некоторые из которых не получили широкого распространения из-за малой известности и кажущихся трудностей реализации. Однако появление современных цифровых приборов (генераторов сигналов, осциллографов и анализаторов спектра) позволяет по-новому взглянуть на реализацию таких специальных методов. В ряде случаев их реализация оказывается более простой и дешевой, чем обычное снятие АЧХ с помощью ГКЧ, детектора и осциллографа. При этом существенно расширя-

ется диапазон частот тестирования и динамический диапазон по уровню. Наиболее перспективным выглядит построение АЧХ путем использования огибающей спектра, которую могут строить современные цифровые анализаторы спектра с применением как ГКЧ, так и импульсов с фиксированной частотой повторения и встроенных в анализаторы спектра трекинг-генераторов. Эти методы тестирования легко поддаются математическому моделированию с помощью систем компьютерной математики, например MATLAB+Simulink, и образуют комплекс средств для исследования и тестирования различных компонентов и устройств. ■

Литература

1. Кузнецов В. А., Долгов В. А., Коневских В. Н. и др. Измерения в электронике: Справочник / Под редакцией В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. М.: ДМК-Пресс, 2009.
3. Дьяконов В. П. Развитие серии генераторов произвольных функций AFG3000 компании Tektronix и их применение // Компоненты и технологии. 2009. № 11.
4. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: СОЛОН-Пресс, 2007.
5. Дьяконов В. П. Осциллографы компании Tektronix закрытой архитектуры // Компоненты и технологии. 2009. № 12.
6. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: СОЛОН-Пресс, 2009.
7. Афонский А. А. Новые анализаторы спектра АКТАКОМ // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2008. № 2.
8. Дьяконов В. П., Пеньков А. А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике / Справочник. М.: Горячая линия – Телеком, 2009.

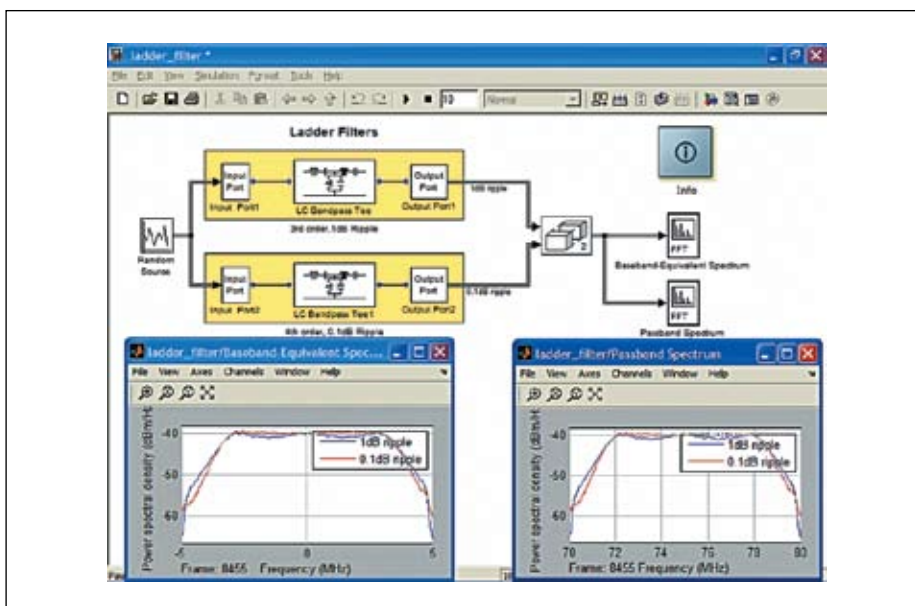


Рис. 33. Пример построения АЧХ двух полосовых фильтров в системе MATLAB+Simulink с применением генератора шума и анализаторов спектра на выходе фильтров