

Калибраторы широкополосных осциллографов

Осциллограф является самым распространенным прибором для исследования и тестирования сигналов и многих систем и устройств. С преодолением осциллографами барьера по времени нарастания в 1 нс и полосы пропускания в 350 МГц резко возросли трудности с калибровкой и тестированием этих приборов. В статье, завершающей описание калибраторов [1], описаны основные пути преодоления этих трудностей и современное состояние в разработке и производстве специальных калибраторов для проверки широкополосных осциллографов.

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

Основные методы генерации импульсов сверхмалой длительности

Барьер по времени переключения в 1 нс оказался для классической схемотехники импульсных устройств на дискретных активных приборах (электронных лампах и транзисторах) практически непреодолимым [2, 3]. Так, из обычных биполярных транзисторов для построения генераторов с субнаносекундной длительностью фронта неэффективными оказались даже СВЧ биполярные транзисторы с частотой в единицы-десятки ГГц, работающие в обычном ключевом режиме работы. Высокая рабочая частота (до 10–20 ГГц) у них реализована только в резонансных схемах, работающих в сравнительно узком частотном диапазоне. В этом случае паразитные емкости транзисторов удается компенсировать индуктивными цепями.

Но этот метод не подходит для создания широкополосных импульсных генераторов, цепи которых не резонансные, а апериодические. Более того, наличие резонансных согласующих цепей в СВЧ-транзисторах ведет к сильному искажению формы коротких перепадов и возникновению у них паразитных колебательных процессов.

Известно, что минимальное время нарастания импульсов в импульсных схемах на биполярных транзисторах, подобных триггерам или мультивибраторам, примерно равно постоянной времени транзистора $\tau_T \approx \tau_\alpha$. Однако эта постоянная времени и граничная частота ($f_T = 1/\tau_T$) сильно зависят от тока эмиттера, поскольку накопленный в базе транзистора заряд первичных носителей вызывает смещение границы коллекторного перехода к контакту коллектора. В результате при больших токах эмиттера ширина базовой области растет, а $f_T(I_E)$ сильно падает. Эта зависимость дается в справоч-

ных данных на большинство транзисторов, а вызывающий ее физический эффект получил название эффекта Кирка.

Один из первых советских серийных генераторов наносекундных импульсов Г6-22 формировал импульсы с амплитудой до 15 В при длительности импульса 5 нс (длительность переднего фронта 3 нс, заднего — 2 нс) при частоте повторения 10–110 МГц. При этом прибор имел габариты 496×475×295 мм и массу 32 кг.

О трудностях применения обычной схемотехники, даже на основе специализированных и тщательно оптимизированных импульсных интегральных микросхем, говорит и более поздний опыт разработки советских генераторов импульсов Г5-78 и Г5-85 с временем нарастания импульсов 1 и 0,25 нс при максимальной амплитуде импульсов, соответственно, 5 и 2 В на стандартной нагрузке 50 Ом.

Маломощные полевые транзисторы (даже интегральные терагерцовые [3]) не позволяют создавать измерительные генераторы импульсов с амплитудой порядка 5 В на нагрузке 50 Ом при времени нарастания менее 1 нс. Причиной этого являются малые рабочие напряжения (порядка 1–2 В) и малые рабочие токи (доли мА) у таких микротранзисторов. Между тем для получения указанных уровней напряжения на стандартном сопротивлении 50 Ом нужен ток хотя бы в 100 мА.

Эти ограничения относятся и к интегральным гетеропереходным SiGe транзисторам — рекорсменам по скорости переключения, уверенно преодолевающим барьер по времени переключения в 1 пс. В составе монолитных микросхем они обеспечивают время переключения порядка единиц пс, но работу на реальную нагрузку в 50 Ом обычно не обеспечивают. К тому же в виде дискретных приборов они не выпускаются промышленностью. Это справедливо и для сверхскоростных GaAs биполярных транзисторов (НВТ).

Намного лучше ситуация с применением в импульсных устройствах высокого быстродействия мощных полевых кремниевых транзисторов с токами более 0,1 А и рабочими напряжениями в десятки и даже сотни В. Благодаря почти безынерционному полевому механизму управления током, многие из таких СВЧ-транзисторов уверенно переходят барьер по времени переключения в 1 нс. Правда, для этого нужно запускать сами транзисторы импульсами с длительностью фронта в единицы нс и амплитудой порядка 10 В. Однако время переключения сильноточных (десятки А) и высоковольтных (сотни В) мощных полевых транзисторов не меньше десятков нс, а их входная емкость достигает сотен и даже тысяч пФ.

Серийные GaAs полевые транзисторы с затвором на основе барьера Шоттки уверенно обеспечивают время переключения менее 1 нс при рабочих токах в доли — единицы ампер. Но уровень рабочих напряжений у них мал — менее 10 В. Препятствие к применению этих приборов (как и мощных кремниевых транзисторов) — в необходимости построения высокоскоростных схем запуска и дороговизна приборов.

В связи с этим традиционным является построение импульсных устройств с субнаносекундными длительностями фронтов импульсов на специальных активных приборах, основанных на новых малоинерционных физических явлениях, обеспечивающих получение сверхмалого времени переключения при достаточно высоких напряжениях и токах. Это туннельные диоды, лавинные транзисторы, электронно-оптические переключатели и др.

Есть ряд способов существенно уменьшить время нарастания импульсов, формируемых обычными полупроводниковыми приборами, такими как лавинные транзисторы, СВЧ биполярные и мощные полевые транзисторы. Так, уже давно применяются обострители перепадов на основе диодов

с накоплением заряда, которые позволяют формировать импульсы с временем нарастания порядка десятков пс [1]. Еще лучшие результаты получены от обострителей на арсенид-галлиевых диодах. Здесь возможно получение импульсов с временем нарастания и спада вплоть до 1 пс с амплитудой в десятки-сотни вольт. В ряде случаев хорошие результаты дают обострители на нелинейных линиях передачи.

Основная схема на туннельном диоде

Говорят, что новое — давно забытое старое. Одним из первых приборов, уверенно обеспечивших генерацию перепадов субнано- и даже пикосекундной длительности, стал туннельный диод (ТД) — прибор с N-образной ВАХ, порожденной практически безынерционным туннельным эффектом (рис. 1).

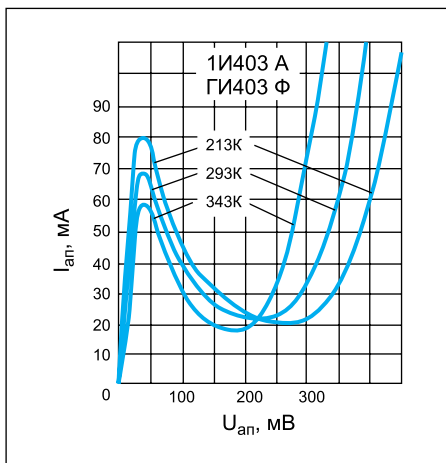


Рис. 1. ВАХ германиевого туннельного диода при разных значениях температуры

В наши дни специалисты знакомы с туннельными диодами лишь по коротким материалам учебников, хотя в 1960-х годах этим приборам были посвящены сотни книг и тысячи статей. Между тем туннельный диод лежит в основе большинства современных калибраторов для наиболее скоростных осциллографов и в этой роли широко применяется и сейчас. Основная схема включения туннельного диода показана на рис. 2.

Если учесть усредненную емкость C туннельного диода (совместно с емкостью монтажа и нагрузочной емкостью), то такая схема (рис. 2в) будет описываться следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{di}{dt} = \frac{E - iR - u}{L}$$

и

$$\frac{du}{dt} = \frac{i - I(u)}{C}. \quad (1)$$

Она может решаться численным методом, что детально описано в [2] с применением системы компьютерной математики Mathcad. Результаты математического моделирования показывают, что при использовании серийных Ge и GaAs туннельных диодов в корпусе таблеточного типа возможно получение импульсов с перепадами (фронтами) в десятки пс.

Предположим, что входной сигнал $E(t)$ формирователя синусоидальный. При увеличении входного сигнала линия нагрузки R_r (R на рис. 2в, в него входит выходное 50-омное сопротивление генератора) перемещается вверх, пока не достигнет положения А при входном сигнале, равном E_{12} (от 1,5 до 2,5 В). В этот момент рабочая точка 1 отрывается от ВАХ и скачком перемещается в положение 2. В результате формируется перепад напряжения с амплитудой около 0,25–0,5 В (для германиевых приборов) и малой (субнано-секундной) длительностью. Примерно вдвое больший перепад способны обеспечивать GaAs туннельные диоды.

Оценим хотя бы грубо длительность перепада напряжения при переходе рабочей точки из положения 1 в положение 2. Будем приближенно считать, что переключение идет током, равным пиковому току диода I_n . Тогда длительность перепада $\Delta t \approx C\Delta U/I_n$. Для германиевого туннельного диода 1И308К, специально созданного для формирователей импульсов с субнано-секундной длительностью фронтов, емкость диода $C = 5$ пФ, ток пика $I_n = 50$ мА, таким образом, при $\Delta U = 0,5$ В получим $\Delta t = 5 \times 10^{-12} \times 0,5 / 0,05 = 5 \times 10^{-11}$ с = 50 пс.

При уменьшении входного сигнала (в данном случае просто наложенного на напряжение питания) линия нагрузки начинает пере-

мещаться вниз, пока не займет критическое положение Б при уровне входного сигнала E_{34} (доли В). При этом рабочая точка 3 скачкообразно перемещается в положение 4, формируя также быстрый перепад напряжения отрицательной полярности. Амплитуда этого перепада немного меньше, чем положительного перепада, создаваемого при нарастании синусоидального напряжения.

Для получения реальной длительности фронтов порядка 20–50 пс необходима тщательная оптимизация конструкции простой схемы формирователя. Обычно это конструкция, выполненная в виде литого металлического корпуса с установленным в нем туннельным диодом, имеющим таблеточную конструкцию для уменьшения индуктивности. Отечественная промышленность еще в советские времена выпускала формирователи на туннельном диоде для стробоскопических осциллографов С1-91/4 и других приборов с полосой исследуемых частот до 18 ГГц. На рис. 3 показан внешний вид формирователя Ф-02 с СВЧ-узлами для подключения его к выходу генератора и входу стробоскопического осциллографа. Формирователь входит в состав блока генератора Я4С-89 и по своим характеристикам не уступает, а порою и превосходит параметры аналогичных приборов зарубежных фирм.

Для испытания формирователя целесообразно вначале опробовать его работу при синусоидальном входном сигнале, например от современного генератора Tektronix AFG 3101 (рис. 4) (1-ГГц осциллограф реального времени Tektronix DPO 4101). Маркерами помечены точки начала регенеративных процессов (кре-



Рис. 3. Внешний вид формирователя Ф-02 и СВЧ-узлов импульсного 50-омного тракта:

- 1 — переходник к входному разъему CNN;
- 2 — формирователь Ф-02;
- 3 — разъем выхода формирователя; 4 — тройник;
- 5 — выходной разъем; 6 — 50-омная заглушка

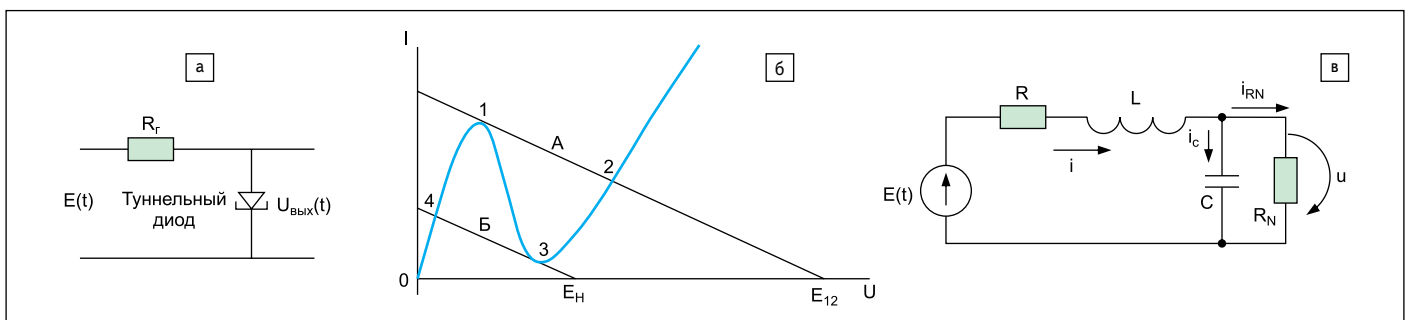


Рис. 2. а) Основная схема включения туннельного диода; б) выбор линий нагрузки; в) эквивалентная схема

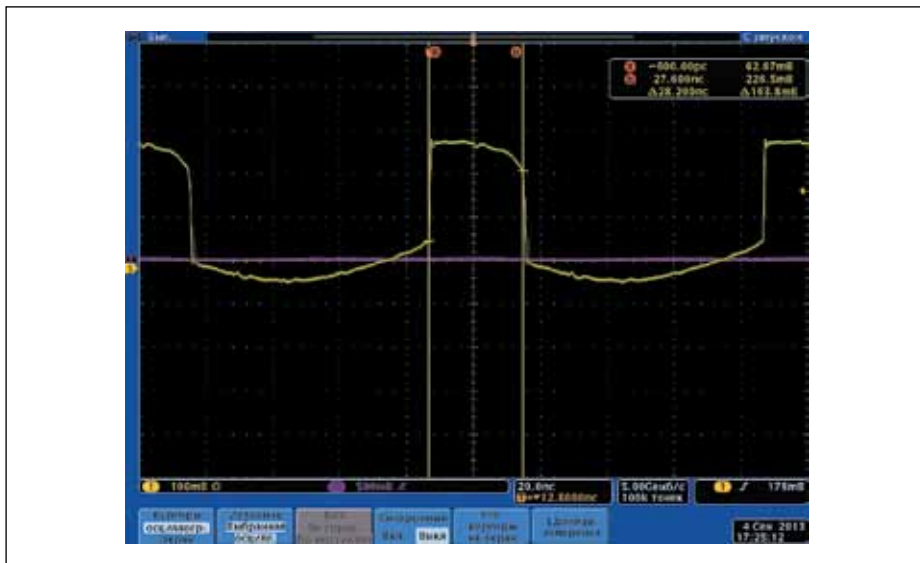


Рис. 4. Формирование из синусоиды сигнала разрывной формы (частота 10 МГц)

формирователей на туннельном диоде можно оценивать время нарастания скоростных осциллографов с полосой исследуемых частот от 0,1 до примерно 20 ГГц. При этом у осциллографов с полосой частот до 1 ГГц фактически оценивается предельная форма переходной характеристики — реакция на идеальный скачок. Стробоскопические осциллографы С7-24 имеют генератор перепада на туннельном диоде с длительностью 30 пс (40 пс вместе с осциллографом).

Генераторы импульсов — калибраторы осциллографов

Наблюдаемая на экране осциллографа осциллограмма зависит как от параметров сигнала, так и от параметров самого осциллографа. Чем шире полоса пропускания осциллографа и меньше его время нарастания, тем меньше погрешность измерений. Параметры сигнала сильно зависят от элементной базы и применяемых компонентов в исследуемых устройствах. На рис. 6 показаны графики типовой зависимости погрешности измерений от полосы частот осциллографа для различных типов интегральных схем и полупроводниковых приборов. Их необходимо учитывать и при разработке калибраторов.

Первыми серийными отечественными генераторами импульсов с субнаносекундными фронтами стали калибраторы осциллографов серии И1. Они были предназначены, в основном, для контроля переходных характеристик широкополосных и скоростных электронных осциллографов. Но их можно применять и для других целей, например запуска импульсных устройств.

Калибраторы И1-11/12 (рис. 7) предназначены для метрологической поверки стробоскопических осциллографов. В комплект генератора входят пять выходных формирователей импульсов, делитель напряжения, коаксиальная линия и соединительный высокочастотный кабель.

стики). Разумеется, можно в широких пределах менять частоту генератора и выходных импульсов.

Теперь для получения почти идеальных прямоугольных импульсов достаточно перевести AFG 3101 в режим генерации прямоугольных импульсов. При этом собственные перепады напряжения генератора с длительностью около 5 нс уменьшатся по длительности примерно в 100 раз и составят около 50 пс.

На рис. 5 показаны осциллограммы, снятые с помощью стробоскопической осциллографической системы на основе осциллографа С1-91/4 с 18-ГГц стробоскопическим преобразователем Я4С-100 и блоком стробоскопической развертки А4С-101. В состав генератора Я4С-89 входят еще два формирователя для формирования перепадов положительной Ф-00 (0,2 В, 50 пс) и отрицательной и Ф-02 (0,2 В, 70 пс) полярности. К генератору можно

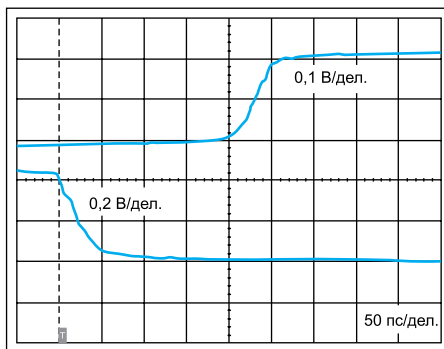


Рис. 5. Осциллограммы перепада, формируемого формирователем на туннельном диоде

подключать одновременно два формирователя с разной рабочей полярностью импульсов.

Благодаря очень малой длительности формируемых перепадов с помощью описанных

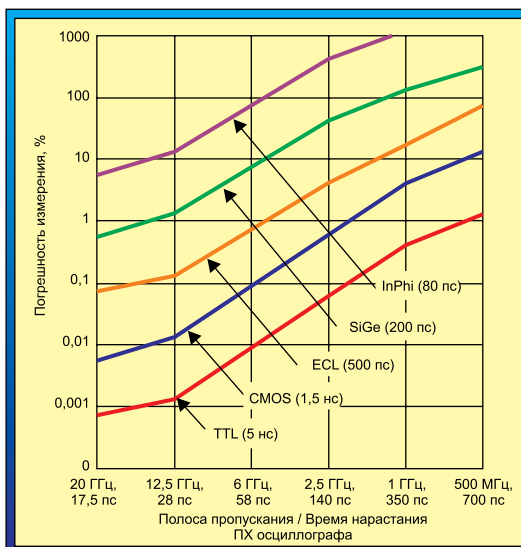


Рис. 6. Типовая зависимость погрешности измерений от полосы частот осциллографа для разных типов микросхем и полупроводниковых приборов

Если полоса пропускания осциллографа:	Увеличение фронта измеряемого сигнала составит:
Равна полосе частот, рассчитанной по фронту измеряемого сигнала	▶ 41%
В два раза выше полосы частот, рассчитанной по фронту измеряемого сигнала	▶ 12%
В три раза выше полосы частот, рассчитанной по фронту измеряемого сигнала	▶ 5%
В пять раз выше полосы частот, рассчитанной по фронту измеряемого сигнала	▶ 2%



Рис. 7. Внешний вид генератора импульсов калибратора И1-12

Основные технические данные калибратора И1-12:

- Полярность при использовании формирователем: положительная (Ф-00, Ф-01, Ф-03, Ф-04); отрицательная (Ф-02).
- Длительность фронта перепада напряжения: ≤ 50 пс (Ф-00, Ф-01, Ф-02); 100 ± 20 пс (Ф-03); 70 пс (Ф-04).
- Выброс на вершине: $\leq 5\%$.
- Неравномерность вершины: $\leq 2\%$.
- Максимальная амплитуда на внешней согласованной нагрузке 50 Ом: $\geq 0,2$ В (Ф-00, Ф-03, Ф-04), $\geq 0,4$ В (Ф-01, Ф-02).
- Длительность импульсов: 0,01–5 мкс.
- Погрешность установки длительности: $0,2t(0,2-5 \text{ мкс})$; 3 нс (0,01–0,2 мкс).
- Период повторения: 0,01–10 мс.
- Погрешность установки периода повторения: 0,1 Т.
- Фиксированные значения временного сдвига между основным импульсом и синхроимпульсом: 25, 50, 100, 200 нс.
- Паразитная модуляция временного сдвига: < 20 пс.
- Коэффициент отражения от выхода согласованных формирователей (Ф-00, Ф-03, Ф-04): 0,15.

На рис. 8 показана осциллограмма импульсов положительной и отрицательной полярности с выхода генератора-калибратора И1-12, снятая 1-Гц цифровым запоминающим осциллографом реального времени DPO4101 с собственным временем нарастания 0,35 нс. Форма импульсов далека от прямоугольной и весьма характерна для формирователей на туннельных диодах, применяемых в этом устройстве. Форма перепадов импульсов была уже представлена на рис. 6.



Рис. 8. Осциллограмма импульсов с выхода генератора-калибратора И1-12

Калибраторы И1-14, И1-15 являются настольными приборами, их внешний вид показан на рис. 9.



Рис. 9. Внешний вид генераторов-калибраторов И1-15

Основные технические характеристики приборов И1-14, И1-15:

- Полярность импульсов: положительная и отрицательная.
- Время нарастания импульсов: < 1 (И1-14) и $< 0,25$ нс (И1-15).
- Выброс на вершине: $\leq 3\%$.
- Неравномерность вершины: $\leq 1-3\%$.
- Максимальная амплитуда импульса: ≥ 20 В (И1-14) и ≥ 10 В (И1-15).
- Погрешность установки амплитуды импульсов: 0,1 от амплитуды.
- Диапазон регулировки амплитуды импульсов: 0–63 дБ (И1-14) и 0–43 дБ (И1-15).
- Длительность импульсов: 0,1–10 мкс.
- Погрешность установки длительности импульсов: 10%.
- Период повторения импульсов: 0,03–1 мкс.
- Питание: 220 В/50 Гц и 115 В/400 Гц, потребляемая мощность: 45 В·А.
- Габаритные размеры: 360×184×235 мм.
- Масса: 4 кг.

Генераторы пикосекундных импульсов серии 4000 фирмы Picosecond Pulse Lab

Компания Picosecond Pulse Lab (США) уже более четверти века занимается разработкой и производством метрологических приборов для измерений во временной области и тесно сотрудничает с Национальным Метрологическим Институтом США (NIST). Это позволило компании создать и выпустить на рынок целую серию генераторов пикосекундных импульсов (таблица).

Таблица. Технические параметры генераторов фирмы Picosecond Pulse Lab

Тип генератора	Время нарастания, пс	Амплитуда, В	Максимальная частота	Длительность импульса	Смещение, В	Форма сигнала
12010	125	2,5	0,8 ГГц	От 250 пс до 67 нс	-2...3,3	Импульс
12020	125	2,5	1,6 ГГц	От 250 пс до 67 нс	-2...3,3	Импульс
4005	5/9	5	1 МГц	16 нс	Нет	Перепад
4016	< 5	-5	500 кГц	5 нс	Нет	Перепад
10,050A	45	10	100 кГц	От 100 пс до 10 нс	Нет	Импульс
10,060A	55	10	100 кГц	От 100 пс до 10 нс	Нет	Импульс
10,070A	65	7,5	100 кГц	От 100 пс до 10 нс	± 5	Импульс
2600C	250	± 50	100 кГц	$< 1-100$ нс	Нет	Импульс
3500D	65	± 8	1 МГц	65 пс	± 5	Импульс
3600	70	-7,5	2,5 ГГц	70 пс	Нет	Импульс
4015D	12	-5	500 кГц	5 нс	Нет	Перепад
4050B	45	10	1 МГц	10 нс	Нет	Импульс
4500E	100	35	100 кГц	$< 1-250$ нс	Нет	Перепад
TD1107 и TD1110D	20–45	0,23	50 кГц	4 мкс	Нет	Перепад

Среди этой линейки непосредственной заменой самому «быстро-му» серийному отечественному генератору И1-12 (и блока Я4С-89) стала модель 4050 (рис. 10) [4]. Ее выходной формирователь построен на лавинном транзисторе и позволяет получить в двадцать раз большую амплитуду выходного импульса (10 В против 0,5 В у И1-12) при одинаковом времени нарастания 50 пс. Для формирования прямоугольного импульса в такой схеме генератора применяется отрезок коаксиального кабеля, длина которого и задает длительность выходного импульса в 10 нс.



Рис. 10. Внешний вид генератора перепада с длительностью 45 пс типа 4050 фирмы Picosecond Pulse Lab

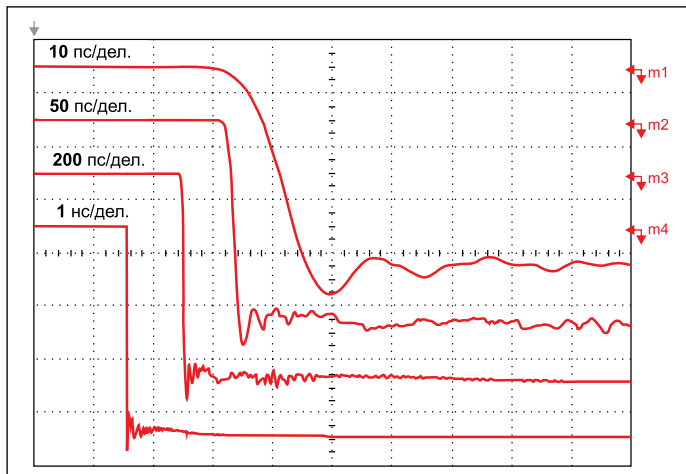


Рис. 13. Осциллограммы перепада времени нарастания у генератора-калибратора 4005 (масштаб по вертикали — 100 мВ/дел.)

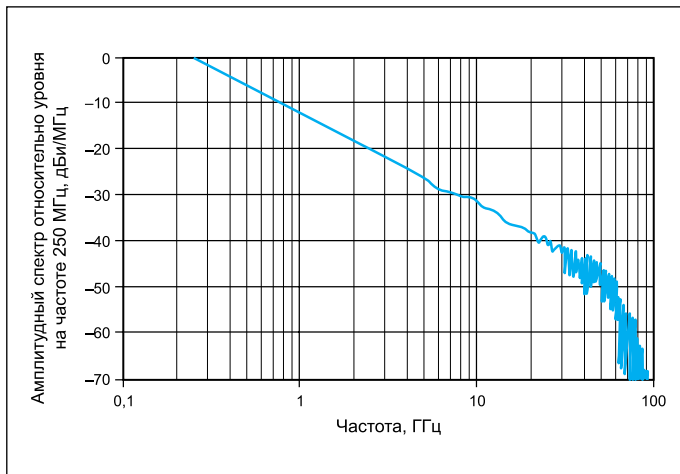


Рис. 14. Амплитудно-частотный спектр перепада времени нарастания у генератора-калибратора 4005

Естественно, что амплитуда испытательного импульса до 10 В открывает более широкие возможности по применению генератора. Параметры выброса и неравномерности модели 4050 также примерно в два раза лучше, чем у И1-12. На рис. 11 показаны осциллограммы перепадов генераторов Picosecond 4050 и И1-12. При этом использовался цифровой осциллограф LeCroy SDA 6000A с полосой пропускания 6 ГГц и частотой дискретизации 20 ГГц.

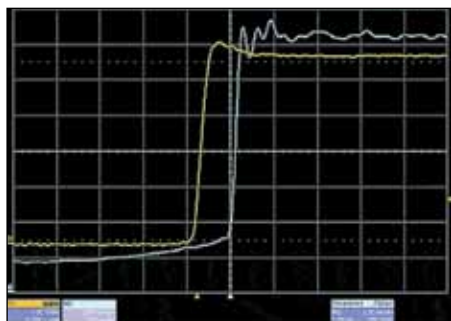


Рис. 11. Сравнение формы импульса от генератора Picosecond 4050 на лавинном транзисторе и генератора И1-12 на туннельном диоде

Наименьшую длительность перепада формирует генератор 4005. Его внешний вид с выносными блоками показан на рис. 12. Как нетрудно заметить, блоки формирования размещаются отдельно от основного модуля прибора — на рис. 12 они показаны



Рис. 12. Внешний вид генератора 4005 с 5-пс перепадом фирмы Picosecond Pulse Lab

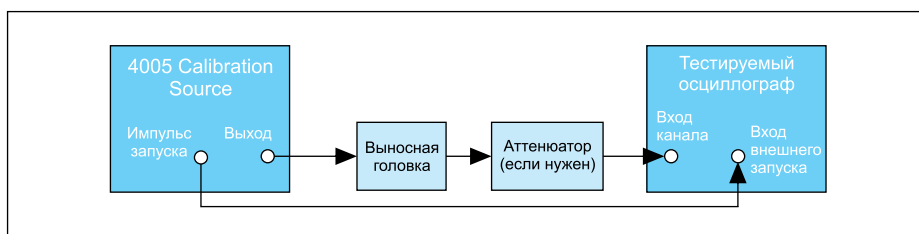


Рис. 15. Типичная блок-схема тестирования осциллографов на основе калибратора 4005

справа. Они подключаются прямо к входам осциллографов и позволяют избежать искажений формы импульсов или перепадов от соединительного коаксиального кабеля большой длины.

На основе модели 4005 создан генератор-калибратор времени нарастания — Model 4005/4006 Calibrator Source. По техническим условиям прибор обеспечивает получение перепада напряжения в 9 пс с фиксированной амплитудой в 300 мВ, 1,2 и 5 В на нагрузке 50 Ом при частоте повторения от 0,1 Гц до 1 МГц (возможен и внешний запуск). Типичный уровень джиттера — 1 пс (максимальный — 1,5 пс).

Какая элементная база используется для формирования 9-пс перепада этим калибратором, к сожалению, не сообщается. Судя по амплитудно-частотным характеристикам калибратора, головки выполнены на диодах с накоплением заряда и резким восстановлением. На рис. 13 представлены осциллограммы формируемого перепада, снятые с помощью сверхскоростного стробоскопического осциллографа фирмы Agilent с полосой пропускания вертикального тракта 70 ГГц и усреднением по 256 осциллограммам. Время спада перепада оценивается как 7,2 пс. Задержка внешнего запуска калибратора — около 60 пс.

Амплитудный спектр выходного перепада, рассчитанный с помощью системы компьютерной математики MATLAB [7], представлен на рис. 14. Из него можно сде-

лать вывод, что спектр близок к идеальному вплоть до частот 20–30 ГГц, а с повышением уровня шума — до 50 ГГц. Это и определяет максимальную полосу пропускания осциллографов, тестируемых с помощью данного калибратора (рис. 15).

Калибраторы осциллографов 5045 (5041) фирмы Time Electronics

Модель 5045 (5041) британской компании Time Electronics является одной из первых высокоточных многоцелевых калибраторов (рис. 16), специально созданных для калибровки различных типов осциллографов и таймеров/частотомеров [4]. Калибровка амплитуды в широких пределах достигается посредством сигнала постоянного тока или прямоугольного колебания в 1 кГц в диапазоне от 1 мВ до 220 В (для нагрузки в 50 Ом —



Рис. 16. Калибратор осциллографов Time Electronics 5045



Рис. 17. Калибратор осциллографов Fluke 5820A



Рис. 19. Калибратор осциллографов Fluke 9500

максимально 2 В). Девияция до $\pm 9,99\%$ позволяет осуществлять регулирование амплитуды и прямое считывание погрешности.

Временная погрешность в 0,1 ppm вполне достаточна для тестирования большинства осциллографов и таймеров. Она может быть уменьшена до 10^{-11} подключением рубидиевого генератора опорной частоты (опция 9762). Точный прямоугольный выходной сигнал калибратора обеспечивает длительность фронтов менее 300 пс, что позволяет осуществлять проверку переходных характеристик осциллографов с полосой пропускания до 600 МГц.

В стандартную комплектацию входит интерфейс Virtual Front Panel компании Time Electronics, установленный на базе операционной системы Windows. Он позволяет осуществлять дистанционное управление калибратором от ноутбука или ПК.

Для повышения точности контроля рабочей полосы частот и анализа частотного отклика дополнительно предлагается модуль выровненного по амплитуде синусоидального выходного сигнала. Этот модуль работает в частотном диапазоне от 100 МГц до 2 ГГц. Установка амплитуды 0,5, 1 и 1,5 В от пика до пика обеспечивает точный анализ тракта вертикального отклонения тестируемого осциллографа. Для калировки токовых щупов осциллографа применяются внешний адаптер, преобразующий амплитудный выход в токовый (от 0,1 до 100 мА от пика до пика с погрешностью 0,2%), постоянный ток или сигнал 1 кГц.

Для автоматизации процесса калировки осциллографа калибратором можно управлять с помощью ПО EasyCal компании Time Electronics, что сокращает время калировки, обеспечивает согласованные результаты и создает сертификаты в соответствии с международными стандартами качества.

Основные характеристики калибратора TE-5045:

- Время прогрева: 1 ч до заявленной точности.
- Время настройки: меньше 5 с.
- Стандартные интерфейсы: GPIB (IEEE-488), RS-232, USB.
- Диапазон рабочих температур: $+15 \dots +25$ °C.
- Питание: 100–230 В AC, 50/60 Гц.

- Потребляемая мощность: 60 Вт.
- Размеры Ш×Г×В: 450×272×152 мм.
- Масса: 8,2 кг.

Калибраторы осциллографов фирмы Fluke

В последние годы прорыв в разработке калибраторов, как настольных, так и переносных, совершила фирма Fluke [6]. В ее многофункциональные калибраторы часто входят в качестве дополнительных опций и блоки калировки осциллографов [1]. На базе многофункциональных калибраторов серии 5000 создан калибратор осциллографов Fluke 5820A (рис. 17).

Этот специализированный калибратор в базовой комплектации обеспечивает полную проверку осциллографов с полосой до 600 МГц, а в расширенной — до 2,1 ГГц. Проверка возможна на постоянном токе и импульсном сигнале, а также на синусоидальном высокочастотном сигнале. Калибратор использует головки с временем нарастания импульсов 300 или даже 150 пс. Прибор может работать с внешним генератором сигналов с частотой до 2,4 ГГц, а также с внешним генератором опорной частоты 10 МГц. Специальный модуль расширяет число выходов до пяти, что позволяет, например, тестировать все четыре канала четырехканальных

осциллографов (рис. 18). Точность проверки развертки составляет 0,33 ppm. Прибор имеет габариты 432×178×473 мм, его масса — 20 кг, потребляемая мощность — 250 В·А.

Компания Fluke поставляет на рынок и ряд специальных моделей калибраторов осциллографов — модели серии 9500 В 600/1100/3200 [7] (рис. 19), которые давно известны специалистам. Цифры в конце указывают на максимальную полосу частот, контролируемых калибраторами, в МГц. В России калибраторы осциллографов поставляются, например, российской фирмой «ПриСТ» [8].

Приборы этой серии обеспечивают:

- Полную проверку осциллографов (входного импеданса, времени нарастания, АЧХ, входных делителей, параметров развертки и др.) без участия оператора с применением программного обеспечения MetCal.
- Возможность частичной модернизации пользователем.
- До пяти каналов одновременного вывода с использованием активных головок любого типа.
- Калировку основных параметров осциллографов (рис. 20).
- Постоянное напряжение, регулируемое в пределах ± 200 В, с погрешностью $0,025\% + 25$ мкВ.
- Импульсное напряжение с амплитудой до 210 В и частотой от 10 Гц до 100 кГц.
- Получение сглаженных синусоидальных сигналов до 6 ГГц и перепадов с длительностью до 25 пс.
- Применение технологии активных головок, устраняющей соединительные коаксиальные кабели и уменьшающей искажения малых по длительности перепадов.
- Полную совместимость с программным обеспечением MET/CAL Plus, работающим с интерфейсом IEEE-488 и обеспечивающим высокое качество метрологического обеспечения с минимальными затратами и документальной регистрацией результатов калировки.

Калибраторы могут использовать четыре типа активных головок для широкополосных осциллографов с полосой 600, 1100, 3200 и 6000 МГц. Они выполнены на разной элементной базе и отличаются значением амплитуды выходного перепада и из-



Рис. 18. Рабочее место, оснащенное калибратором осциллографов Fluke 5820A

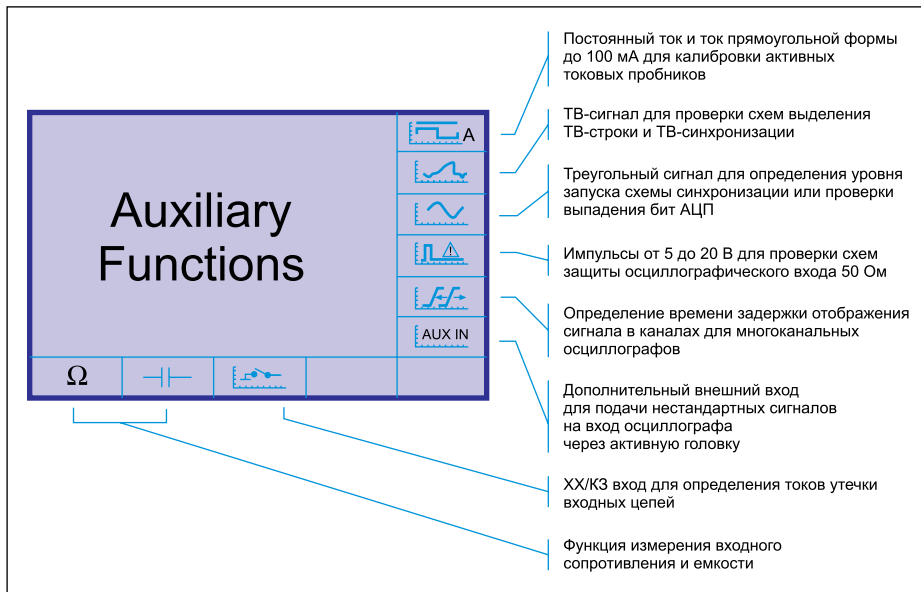


Рис. 20. Меню калибратора Fluke 9500 и его функции



Рис. 21. Активная головка Fluke 9530 с длительностью перепада 25 пс

меряемыми параметрами. Активная головка Fluke 9530 (рис. 21), например, позволяет получать синусоидальные сигналы от 0,1 Гц до 6,4 ГГц и фронт импульсов до 70 пс. В отличие от большинства калибраторов, амплитуда импульсов не фиксирована, а может меняться от 4,44 мВ до 3,1 В. Головка также измеряет импеданс входа, к которому она подключена.

Головка Fluke 9530 обеспечивает время нарастания импульсов 150 и 500 пс и синусоидальные сигналы с частотой до 3,2 ГГц.

Наиболее скоростная активная головка Fluke 9550 на туннельном диоде дает перепад с длительностью не более 25 пс и амплитудой 425–575 мВ (с погрешностью ±3 мВ и диапазоном частот от 10 Гц до 1 МГц). Ее можно применять для тестирования осциллографов с полосой до 14 ГГц. Внешний вид всех головок одинаков.

Калибратор обеспечивает возбуждение одновременно пяти активных головок с их прямым подключением к входам осциллографа. Это позволяет создавать измерительные системы для контроля многоканальных осциллографов с управлением от ПК, заданием программы испытаний и обработкой результатов с помощью систем компьютерной математики (рис. 22). Размеры калибратора — 133×427×440 мм, вес — 12 кг. Размер активной головки — 65×31×140 мм, вес — 0,41 кг. Потребляемая калибратором мощность — 400 В·А.



Рис. 22. Измерительная система для калибровки многоканальных осциллографов

Построение АЧХ осциллографов с помощью анализатора спектра с трекинг-генератором

Обычно калибраторы снимают АЧХ осциллографов по точкам. Но часто возникает необходимость построить АЧХ в виде графика. Для этого можно применить широкополосный генератор качающейся частоты, генератор с цифровым синтезом синусоидального сигнала или анализатор спектра с трекинг-генератором. Для широкополосных осциллографов последний вариант построения АЧХ может оказаться наиболее дешевым и простым.

При этом АЧХ строится прямо на экране тестируемого осциллографа (рис. 23). В данном случае применен дешевый анализатор спектра АКТАКОМ АКС-1301 с опцией трекинг-генератора с частотой выходного сигнала от 100 кГц до 3 ГГц. Синяя полоса показывает зависимость двойной амплитуды синусоидального сигнала от частоты, диапазон изменения которой задается анализатором спектра. Собственно АЧХ представляется как верхняя огибающая осциллограммы. Сигнал от трекинг-генератора имеет заметную неравномерность зависимости амплитуды от частоты, и она также отражается в построенной АЧХ.

Литература

1. Дьяконов В. П. Многофункциональные калибраторы — новый класс измерительных приборов // Компоненты и технологии. 2013. № 10.
2. Дьяконов В. П. Сверхскоростная твердотельная электроника. ДМК-Пресс, 2013.
3. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике. М.: ДМК-пресс, 2011.
4. Model 4005 Calibrator Source. Preliminary Product Specification. Picosecond Pulse Labs.
5. www.timeelectronics.ru
6. www.fluke.com
7. Дьяконов В. П. MATLAB и Simulink для радиоинженеров. М.: ДМК-Пресс, 2011.
8. www.prist.ru

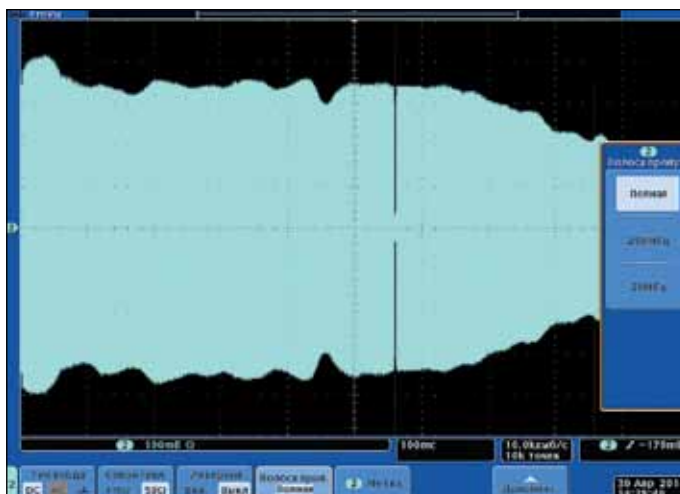


Рис. 23. АЧХ 1-ГГц осциллографа Tektronix DPO 4101 в полной полосе частот