

# СОВРЕМЕННЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБНИКИ И ИХ ГРАМОТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

## MODERN OSCILLOSCOPE PROBES AND ITS CORRECT APPLICATION

Афонский А. А. (Afonsky A. A.), Дьяконов В. П. (Dyakonov V. P.), д.т.н., профессор

Осциллографы наших дней имеют обычно несколько входов со стандартным коаксиальным (BNC) или специализированным разъемом, конструкция которого зависит, прежде всего, от полосы частот тракта вертикального отклонения [1,2]. У широкополосных осциллографов входное сопротивление может выбираться равным 50 Ом для наблюдения сигналов в режиме согласования или быть большим — чаще всего 1 МОм с параллельной емкостью в единицы-десятки пФ. При подаче сигнала прямо 50-омный (или высокоомный) вход обычно реализуется стандартная чувствительность и полоса частот осциллографа. Однако, как правило, исследуемый объект располагается на некотором удалении от осциллографа и для подключения к нему последнего приходится использовать специальные согласующие устройства — пробники.

Со времен применения массовых аналоговых осциллографов с узкой полосой частот исследуемых сигналов (до десятков МГц) у большей части пользователей осциллографами сохранилось такое снисходительно-пренебрежительное отношение к применению осциллографических пробников. Нередко они используются без учета прямого назначения и ряда технических характеристик этих важных устройств. Часто при работе с одним осциллографом используются пробники от другого осциллографа. Даже примитивная коррекция пробников проводится нерегулярно.

Такое отношение к пробникам, к сожалению, является следствием примитивности лабораторного оборудования многих наших школ, ВУЗов и университетов, в которых до сих пор можно встретить старые (порой, давно списанные) осциллографы времен расцвета СССР, метрологическое обеспечение которых давно уже не проводится. Пробники изнашиваются намного быстрее осциллографов и, по существу, являются заменяемыми в процессе эксплуатации устройствами. Неквалифицированный ремонт пробников не гарантирует сохранение их метрологических и частотно-временных параметров.

В наше время такое отношение к применению осциллографов и пробников совершенно недопустимо и свидетельствует о низкой профессиональной подготовке тех, кто по старинке работает с осциллографами. И связано это с резким улучшением метрологических, частотно-временных и иных показателей современных осциллографов и совершенствованием

пробников, которые превратились в специализированные, весьма тонкие и порою дорогие устройства. Так, стоимость некоторых типов пробников (к счастью, далеко не всех) может достигать нескольких тысяч долларов. От пробников часто в решающей мере зависит не только погрешность измерения параметров сигнала, но и просто корректность отображения формы наблюдаемых сигналов. Фактически пробники стали неотъемлемой частью осциллографа, вынесенной за пределы его корпуса.

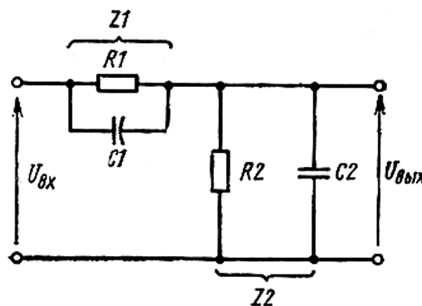


Рис. 1. Схема компенсированного делителя

Чаще всего дешевые пробники входят в комплект осциллографа и производятся той же фирмой, которая выпускает осциллографы. Но и в этом случае поставляемые с современными многоканальными осциллографами пробники нередко составляют заметную часть стоимости этих приборов. Некоторые фирмы выпускают пробники, которые могут использоваться с различными (в основном, бюджетными) осциллографами. Ниже детально рассмотрены основные виды пробников, применяемых для работы с современными (в основном, цифровыми) осциллографами.

Обычно пробники используются для реализации следующих важных целей:

- удаленного подключения осциллографа к объекту исследования;
- уменьшения чувствительности каналов вертикального (иногда и горизонтального) отклонения и исследования сигналов повышенного уровня (пассивные пробники);
- развязки измерительных цепей от узлов осциллографа (оптические пробники);
- большого ослабления сигнала и исследования сигналов в высоковольтных цепях (высоковольтные пробники);
- увеличения входного сопротивления и уменьшения входной емкости (компенсированные делители и пробники-повторители);
- коррекции амплитудно-частотной характеристики системы пробник-осциллограф;

- получения осциллограмм тока (токовые пробники);
- выделения противофазных сигналов и подавления синфазных сигналов (дифференциальные пробники);
- повышения чувствительности осциллографов (активные пробники);
- специальных целей (например, согласования выходов источников широкополосных сигналов с 50-омным входом осциллографа).

Простейшим и давно применяемым типом пробников являются пассивные пробники с компенсированным делителем напряжения (рис. 1). Делитель напряжения строится на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ , причем  $R_2$  может быть просто входным сопротивлением осциллографа.

Параметры делителя на постоянном токе вычисляются по формулам:

$$R_{BX} = R_1 + R_2, \text{ и } K_D = R_2 / (R_1 + R_2).$$

Например, если  $R_2 = 1$  МОм и  $R_1 = 9$  МОм, то имеем  $R_{BX} = 10$  МОм и  $K_D = 1/10$ . Таким образом, входное сопротивление увеличено в 10 раз, но в 10 раз падает и уровень напряжения, поступающего на вход осциллографа.

В общем случае (на переменном токе) для коэффициента передачи делителя можно записать выражение:

$$K_D = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + j\omega\tau_1 + j\omega\tau_2}, \quad (1)$$

где  $\tau_1 = R_1 C_1$  и  $\tau_2 = C_2 R_2$ .

Если  $\tau_1 = \tau_2$ , то значение  $K_D$  определяется из (1) как:

$$K_D = R_2 / (R_1 + R_2). \quad (2)$$

Таким образом, при равенстве постоянных времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  коэффициент передачи делителя перестает зависеть от частоты и равен его значению на постоянном токе. Такой делитель называют компенсированным. Емкость  $C_2$  — это общая емкость кабеля, монтажа и входная емкость осциллографа. Практически, для достижения условия компенсации емкость  $C_1$  (или  $C_2$ ) нужно подстраивать, например с помощью подстроечного конденсатора переменной емкости — триммера (рис. 2.). Регулировка выполняется специальной пластиковой отверткой, входящей в

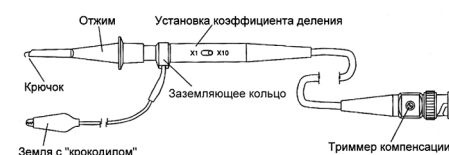
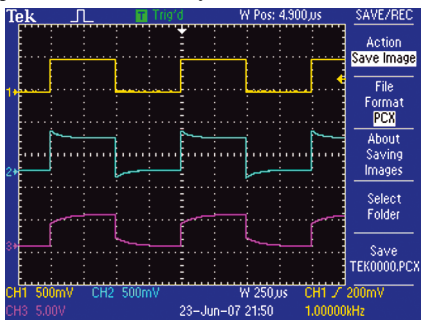


Рис. 2. Конструкция стандартного пассивного пробника HP-9250 на основе частотно-компенсированного делителя

комплект аксессуаров пробников. Он включает в себя разные наконечники, переходники, цветные наклейки и другие полезные «мелочи».

При компенсации искажения прямоугольного импульса (меандра), обычно генерируемого встроенным в осциллограф калибратором, отсутствуют (рис. 3). При спаде вершины импульса наблюдается недокомпенсация, а при нарастании — перекомпенсация. Характер осциллограмм при этом также показан на рис. 3 (сняты осциллографом TDS2024 с пробником P2200 [3]). Рекомендуется проводить компенсацию при максимально большом изображении осциллограммы соответствующего канала.



**Рис. 3. Осциллограммы импульсов калибратора осциллографа Tektronix TDS2024 при разной степени компенсации (сверху вниз): нормальной компенсации, перекомпенсации и недокомпенсации**

Рекомендация 1. При работе с многоканальным осциллографом применяйте пробники индивидуально для каждого канала. Для этого пометьте (если это уже не сделано на заводе) пробники наклейками разного цвета, обычно соответствующими цветам линий осциллограмм.

Для делителя 1:10 резистор  $R_1$  должен быть равен  $9R_2$ . Это означает, что емкость  $C_1$  должна быть в 9 раз меньше входной емкости  $C_2$ . Входная емкость делителя определяется последовательным соединением  $C_1$  и  $C_2$ :

$$C_{\text{вх дел}} = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2) \approx C_1 \quad (3)$$

Приближенное значение справедливо при  $K_d \gg 1$  и  $C_1 \ll C_2$ . При  $K_d = 10$  входная емкость делителя почти в 10 раз меньше входной емкости осциллографа. Следует помнить, что в  $C_2$  входит не только истинная входная емкость осциллографа, но и емкость  $C_1$  увеличивается на величину емкости монтажа. Поэтому на самом деле уменьшение входной емкости делителя по сравнению с входной емкостью осциллографа будет не столь заметным. Тем не менее, именно это и объясняет заметное уменьшение искажений фронтов импульсов при работе с делителем.

Рекомендация 2. Если чувствительность осциллографа по входу Y позволяет наблюдать сигнал с делителем, то всегда применяйте его. Это заодно является и средством защиты входов от больших напряжений.

Увеличение активной составляющей входного сопротивления делителя не всегда полезно, поскольку ведет к изменению нагрузки на испытываемое устройство и получению разных результа-

тов при отсутствии делителя и при его применении. Поэтому делители часто проектируются так, чтобы входное сопротивление осциллографа оставалось неизменным как при работе без делителя, так и при работе с ним. В этом случае делитель не увеличивает входное сопротивление осциллографа, но все же уменьшает входную емкость.

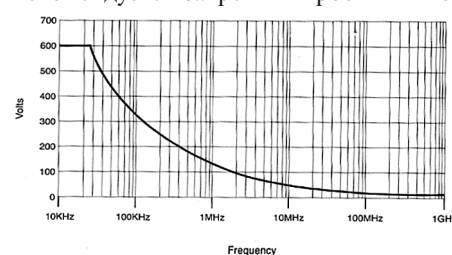
Большинство пробников позволяет увеличить максимальное исследуемое напряжение на постоянном токе и низкой частоте с десятков вольт до 500-600 В. Однако на высоких частотах реактивная мощность (и активная, выделяемая на сопротивлении потерь конденсаторов пробника) резко растет и нужно снижать максимальное напряжение на входе пробника (рис. 4). Если не учитывать это обстоятельство, то можно просто сжечь пробник!

Рекомендация 3. Не превышайте уровень максимального напряжения на входе пробника на высоких частотах сигнала. Это может привести к перегреву пробника и выходу его из строя.

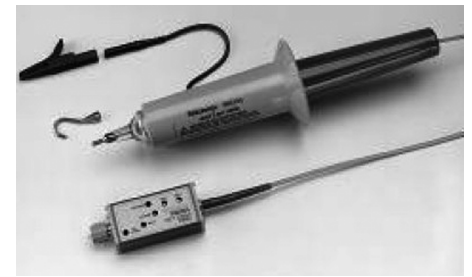
Разновидностью пассивных пробников являются высоковольтные пробники [4]. Обычно они имеют коэффициент деления 1/100 или 1/1000 и входное сопротивление 10 МОм или 100 МОм. Мало-мощные резисторы делителя пробника обычно выдерживают без пробоя напряжения до 500-600 В. Поэтому в высоковольтных пробниках резистор  $R_1$  (и конденсатор  $C_1$ ) приходится выполнять с применением последовательно включенных компонентов. Это увеличивает размеры измерительной головки пробника.

Вид высоковольтного пробника Tektronix P6015A показан на рис. 5. Пробник имеет корпус с хорошей изоляцией с выступающим кольцом, предотвращающим соскальзывание пальцев к цепи, осциллограмма напряжения которой снимается. Пробник можно использовать при напряжении до 20 кВ на постоянном токе и до 40 кВ при импульсах большой скважности. Частотный диапазон осциллографа с таким пробником ограничен 75 МГц, что с избытком достаточно для измерений в высоковольтных цепях.

Рекомендация 4. При работе с высоковольтными пробниками соблюдайте максимально возможные меры предосторожности. Вначале подключите провод заземления, а лишь затем подключите иглу пробника к точке, осциллограмму напряжения на которой нужно получить. Рекомендуется закрепить пробник и во-



**Рис. 4. Зависимость максимального напряжения на входе пробника от частоты**



**Рис. 5. Внешний вид высоковольтного пробника Tektronix P6015A**

обще убрать руки от него при проведении измерений.

Высоковольтные пробники выпускаются как для цифровых, так и аналоговых осциллографов. Например, для уникальных широкополосных аналоговых осциллографов серии АСК-7000 и АСК-8000 выпускается пробник HV-P30 с полосой частот до 50 МГц, коэффициентом деления 1/100, максимальным напряжением синусоиды (от пика до пика) 30 кВ и максимальным напряжением импульсного сигнала до 40 кВ. Входное сопротивление пробника 100 МОм, входная емкость 7 пФ, длина кабеля 4 м, выходной разъем BNC. Другой пробник HV-P60 с коэффициентом деления 1/2000 может применяться при максимальных напряжениях до 60 кВ для синусоиды и до 80 кВ для импульсного сигнала. Входное сопротивление пробника 1000 МОм, входная емкость 5 пФ. О серьезности этих изделий красноречиво говорит их высокая цена — около 66 000 и 124 000 рублей.



**Рис. 6. Пассивный пробник P2200 с встроенным фильтром низких частот в положении переключателя деления напряжений 1/10**

Часто пассивные пробники используются для коррекции амплитудно-частотной характеристики осциллографов. Иногда это коррекция, рассчитанная на расширение полосы частот, но чаще решается обратная задача — сужение полосы частот для уменьшения влияния шума при наблюдении сигналов малого уровня и устранении быстрых выбросов на фронтах импульсных сигналов. Такими пробниками (P2200) комплектуются массовые осциллографы серий Tektronix TDS1000B/2000B. Внешний вид их показан на рис. 6.

*Продолжение следует*



# СОВРЕМЕННЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБНИКИ И ИХ ГРАМОТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

## MODERN OSCILLOSCOPE PROBES AND ITS CORRECT APPLICATION

Афонский А. А. (Afonsky A. A.), Дьяконов В. П. (Dyakonov V. P.), д.т.н., профессор

(Продолжение, начало см. № 5-2007)

Основные параметры пробников приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 хорошо видно, что применение пробника с коэффициентом деления 1/1 целесообразно только при исследовании низкочастотных устройств, когда достаточно полосы частот до 6,5 МГц. Во всех других случаях целесообразно работать с пробником при коэффициенте деления 1/10. При этом входная емкость уменьшается до 110 пФ до примерно 15 пФ, а полоса частот расширяется с 6,5 МГц до 200 МГц. Осциллограммы меандра с частотой 10 МГц, показанные на рис. 7, получены с помощью осциллографа TDS2024В с пробниками P2200. Они хорошо иллюстрируют степень искажения осциллограмм при коэффициенте деления 1/10 и 1/1. В обоих случаях использовалось стандартное включение пробников с зацепляющейся насадкой и длинным проводом заземления (10 см) с крокодилем. Меандр с временем нарастания 5 нс был получен от генератора Tektronix AFG3101.

Таблица 1  
ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПАСИВНЫХ ПРОБНИКОВ P2200

$K_d$	$R_{вх}$ , МОм	$C_{вх}$ , пФ	$f_{макс}$ , МГц	$U_{макс}$ , В
1/1	1	110	6,5	150
1/10	10	13-17	200	300

Нетрудно заметить, что в обоих случаях осциллограммы наблюдаемого сигнала (а он у генераторов AFG3101 на частоте 10 МГц близок к идеальному и имеет гладкие вершины без намека на «звон») сильно искажены. Однако характер искажения разный. При положении делителя 1/10 форма сигнала близка к меандру и имеет фронты малой длительности, но искажена затухающими колебаниями, возникающими из-за индуктивности длинного заземля-

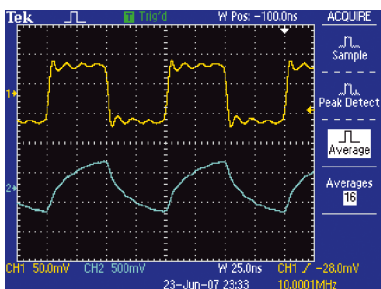


Рис. 7. Осциллограммы импульсов (меандра) с частотой 10 МГц при коэффициенте деления 1/10 (верхняя осциллограмма) и 1/1 (нижняя осциллограмма)

ющего провода (рис. 8). А в положении делителя 1/1 затухающие колебания пропали, но явно заметно значительное возрастание постоянной времени системы «пробник-осциллограф». В результате вместо меандра наблюдаются пилообразные импульсы с экспоненциальными нарастанием и спадом.

Рекомендация 5. Пробники с встроенной коррекцией надо применять строго по их назначению с учетом сильного различия частотных характеристик при разном положении делителя напряжения.

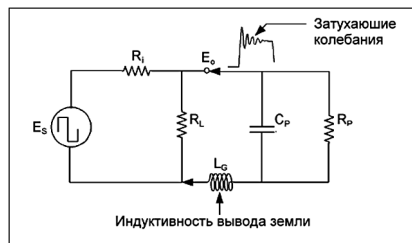


Рис. 8. Схема включения пробника к нагрузке RL

Приведем типовые данные схемы (рис. 8): внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_i=50$  Ом, сопротивление нагрузки  $R_L \gg R_i$ , входное сопротивление пробника  $R_p=10$  МОм, входная емкость пробника  $C_p=15$  пФ. При таких параметрах элементов схемы она вырождается в последовательный колебательный контур, содержащий сопротивление  $R \approx R_i$ , индуктивность земляного провода  $L \approx L_G$  (порядка 100-120 нГн) и емкость  $C \approx C_p$ .

Если на вход такого контура подать идеальный перепад напряжения  $E$ , то временная зависимость напряжения на  $C$  (и входе осциллографа) будет иметь вид:

$$u(t) = E \left[ 1 - e^{-\alpha t} \left( \frac{\alpha}{\delta} \sin(\delta t) + \cos(\delta t) \right) \right], \quad (4)$$

где  $\alpha = R/2L$ , и  $\delta = \sqrt{1/LC - R^2/4L^2}$ .

Расчеты показывают, что эта зависимость может иметь значительный выброс при больших  $L$  и малых  $R$ , что и наблюдается на верхней осциллограмме рис. 7. При  $\alpha/\delta=1$  этот выброс составляет не более 4% от амплитуды перепада, что является вполне удовлетворительным показателем. Для этого величину  $L=L_G$  надо выбирать равной:

$$L = CR^2/2. \quad (5)$$

Например, если  $C=15$  пФ и  $R=50$  Ом, то  $L=19$  нГн. Для уменьшения  $L$  до такой величины (с типовой порядка 100-120 нГн для земляного провода длиной 10 см) надо укоротить

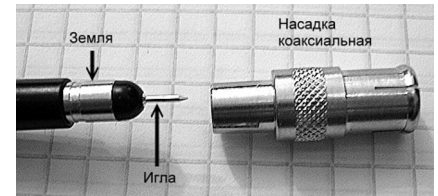


Рис. 9. Головка пробника со снятым наконечником (слева) и переходник к коаксиальному разъему (справа)

земляной (возможно и сигнальный) провод до длины менее 2 см. Для этого следует снять насадку с головки пробника и отказаться от использования стандартного земляного провода. Начало пробника в этом случае будет представлено контактной иглой и цилиндрическим земляной полоской (рис. 9) с малой индуктивностью.

Эффективность применяемых для борьбы со «звоном» мер иллюстрирует рис. 10. На нем показаны осциллограммы 10 МГц меандра при обычном включении пробника и включении со снятой насадкой и без длинного провода земли. Хорошо видно практически полное устранение явных затухающих колебательных процессов на нижней осциллограмме. Небольшие колебания на вершине связаны с волновыми процессами

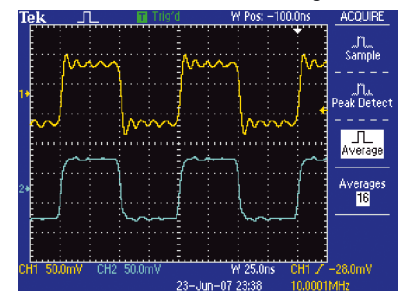


Рис. 10. Осциллограммы 10 МГц меандра при обычном включении пробника (верхняя осциллограмма) и включении со снятой насадкой и без длинного провода земли (нижняя осциллограмма)

в соединительном коаксиальном кабеле, который в таких пробниках работает без согласования на выходе, что порождает отражения сигнала.

Рекомендация 6. Для получения осциллограмм с предельно малыми временами нарастания и «звоном» примите меры по предельному уменьшению индуктивности измеряемой цепи: удалите насадку пробника и подключайте пробник с помощью иглы и цилиндрической заземляющей вставки. Примите все возможные меры по уменьшению индуктивности цепи, сигнал в которой наблюдается.

Важными параметрами системы пробник-осциллограф является время нарастания системы (на уровнях 0,1 и 0,9) и полоса частот или максимальная частота (на уровне спада чувствительности на 3 дБ). Если воспользоваться известным значением резонансной частоты контура

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

то можно выразить значение  $R$  через резонансную частоту контура, определяющую предельную частоту тракта отклоняющей системы:

$$R = \frac{1}{f_0 C \sqrt{2\pi}} = \frac{0,22}{f_0 C}. \quad (6)$$

Нетрудно доказать, что время достижения напряжением  $u(t)$  значения  $E$  амплитуды перепада будет равно:

$$t_p = 2,2RC. \quad (7)$$

Это значение обычно и принимают за время установления пробника с оптимальной переходной характеристикой. Общее время нарастания осциллографа с пробником можно оценить как:

$$t_0 = \sqrt{t_{осц}^2 + t_p^2}, \quad (8)$$

где  $t_{осц}$  — время нарастания осциллографа (при подаче сигнала прямо на вход соответствующего канала). Верхняя граничная частота  $f_{макс}$  (она же и полоса частот) определяется как

$$f_{макс} = 0,35/t_0. \quad (9)$$

К примеру, осциллограф имеющий  $t_0 = 1$  нс имеет  $f_{макс} = 350$  МГц. Иногда множитель 0,35 увеличивают до 0,4-0,45, поскольку АЧХ многих современных осциллографов с  $f_{макс} > 1$  ГГц отличается от гауссовской, для которой характерен множитель 0,35.

Не стоит забывать о еще одном важном параметре пробников — времени задержки сигнала  $t_z$ . Это время определяется, прежде всего, погонным временем задержки (на 1 м длины кабеля) и длиной кабеля. Оно обычно составляет от единиц до десятков наносекунд.

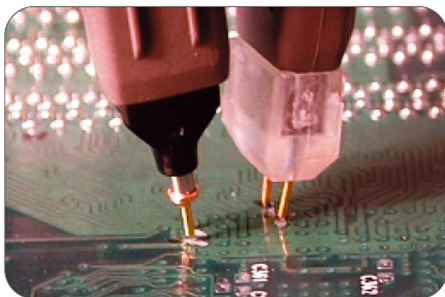


Рис. 11. Подключение пробника к контактным площадкам печатной платы исследуемого устройства

Рекомендация 7. Чтобы задержка не влияла на взаимное расположение осциллограмм на экране многоканального осциллографа нужно использовать во всех каналах пробники одного типа с кабелями одинаковой длины.

Подключение пробников к нужным точкам исследуемых устройств может

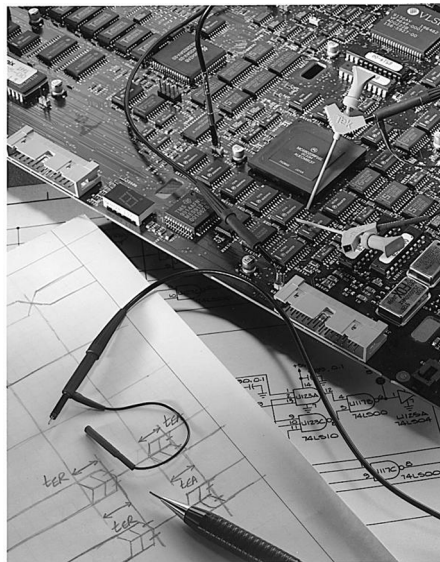


Рис. 12. Специальные наконечники пробников для подключения к микросхемам и контактным выводам печатных плат

осуществляться с помощью различных наконечников, насадок, зацепков и «микро-крокодилов» которые часто входят в комплект аксессуаров пробника. Однако чаще всего наиболее точные измерения выполняются при подключении с помощью первичной иглы пробника (см. рис. 11) или двух игл. При разработке высокочастотных и импульсных устройств на печатной плате для этого предусматриваются специальные контактные площадки или металлизированные отверстия.

Особенно актуально в наше время подключение пробников к контактным площадкам миниатюрных печатных плат, гибридных и монолитных интегральных микросхем [4]. Держать в руках пробники в этом случае неудобно, а соскальзывание иглы с контактной площадки может вызвать замыкание или даже механическое повреждение устройства. Специальные аксессуары — крепления — позволяют подключать пробники к ножкам микросхем и контактным выводам печатных плат даже при их малых размерах (рис. 12).

Рекомендация 8. Продумывайте способ подключения пробника к контрольным точкам исследуемого устройства (схемы) и фиксации измерительной головки пробника. Непродуманное применение пробника может не только сильно исказить осциллограмму в контрольной точке, но и повредить испытуемое устройство, например микросхему.

Конструкции пассивных пробников и приспособлений к ним (аксессуаров) постоянно совершенствуются. На рис. 13 показано начало эволюции пробников ведущей в разработке и производстве осциллографов корпорации Tektronix [5]. Пока описанные выше пробники относились к их первому поколению — на основе стандартного 50-омного коаксиального разъема BNC (рис. 13, а).

С ростом полосы частот пробника приходится применять улучшенные изолирующие и проводящие материалы и специальные цепи коррекции переходной и частотной характеристик. Кроме того, возникла необходимость передачи осциллографу данных о типе применяемых пробников о меняющихся в ходе работы коэффициентах деления.

Некоторые осциллографы, например Tektronix TDS1000B/2000B, способны распознавать коэффициенты деления обычных пробников. Есть пробники, например, пассивные Tektronix P6105A, P6106, P6158, конструкция разъема которых предусматривает выдачу сигнала (Readout) о коэффициенте деления пробника (рис. 13, б). На рис. 14 показан внешний вид одного из таких пассивных пробников P6109.



Рис. 13. Интерфейсы пробников XX века корпорации Tektronix

Однако более мощные осциллографы могут работать с большим набором пробников, поэтому задача распознавания их и их коэффициентов деления приобрела актуальный характер. В связи с этим компанией Tektronix была создана специальная архитектура и конструкция пробников, обеспечивающая двухсторонний обмен информацией между осциллографом и пробником, необходимый не только для точной передачи преобразованных пробником сигналов и данных о пробнике на вход осциллографа, но и передачу данных от осциллографа к пробнику при дистанционном управлении устройствами.



Рис. 14. Внешний вид пассивного пробника P-6109 с выводом Readout

Выпускаются пассивные, активные, дифференциальные и оптические пробники этого типа. Широкое применение нашли и пробники с интерфейсом TekProbe, созданные в 1986 г. (рис. 13, в). Для съема данных об установленном коэффициенте деления используются пружинящие штыри-пины с остриями, контактирующие с контактными площадками входного разъема осциллографа. Аналогичные по назначению пробники выпускаются и другими производителями осциллографов.

Особым видом пробников являются «оптические пробники». Есть два вида таких пробников: для приема оптического излучения (например, от лазерных



импульсных источников излучения) и пробники, использующие оптроны (комбинацию светодиода и фотодиода) для осуществления гальванической развязки от земли осциллографа. Часто этого достаточно для снятия осциллограммы напряжения между двумя любыми точками устройства (схемы). На рис. 15 показан внешний вид оптических пробников Tektronix P6701B.

Рекомендация 9. Для измерений напряжений между двумя контрольными точками устройства (схемы) можно использовать пробники с гальванической (оптической) развязкой от земли осциллографа. Учтите, что есть альтернативный вариант таких измерений с помощью дифференциальных пробников (см. ниже). Однако они применяются при исследовании низковольтных устройств.

Часто возникает необходимость в осциллографировании не напряжений, а токов. Для этого используется включение в разрыв цепи низкоомного шунта и преобразование тока в напряжение в соответствии с формулой  $U=RI$ . Например, если чувствительность осциллографа равна 5 мВ/дел, то при сопротивлении шунта  $R=1$  Ом получаем чувствительность по току 5 мА/дел. Этот метод имеет целый ряд недостатков:

- шунт включается в разрыв цепи, что требует отключения устройства и проведения монтажных работ;
- прецизионный шунт является дорогим и редким изделием;



Рис. 15. Внешний вид оптических пробников Tektronix P6701B

- при измерении больших токов шунт надо делать очень низкоомным;
- возможен разогрев шунта;
- даже малая индуктивность шунта создает большую постоянную времени  $L/R$ , что удлиняет фронты наблюдаемых импульсов тока и ограничивает полосу наблюдаемых частот.

В связи с этим были созданы бесконтактные токовые пробники, принцип действия которых основан на регистрации магнитного поля, появляющегося вокруг проводника при пропускании через него тока  $I$  (рис. 16). Для повышения чувствительности головка пробника выполняется в виде токового трансформатора, принцип действия которого хорошо известен.

На рис. 17 показан внешний вид токового пробника TSP202 с интерфейсом TekProbe с максимальным измеряемым током (постоянным и

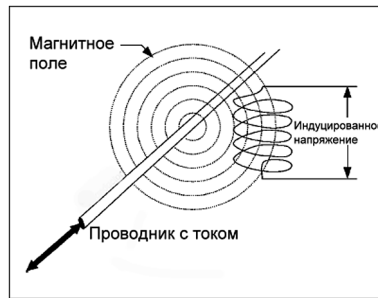


Рис. 16. Принцип контроля тока в проводнике по его магнитному полю

переменным) до 15 А. Измерительная головка пробника построена по аналогии с токовыми клещами, давно применяемыми в мультиметрах с бесконтактным измерением тока с помощью токового трансформатора. Но она более миниатюрна и предназначена для измерения умеренных токов.

С помощью отжима «токовых клещей» их можно разомкнуть и вставить в отверстие провод, ток в котором измеряется и наблюдается. Для увеличения чувствительности и измерения малых токов можно создать обмотку из провода, содержащую несколько витков (рис. 18). Для измерения суммарных и разностных токов возможна вставка в отверстие измерительной головки двух проводников. Значения чувствительности для того или иного способа измерений можно найти в описании пробника. При использовании специального калибратора тока погрешность измерения тока после калибровки составляет  $\pm 1\%$  для токов от 0,05 до 5 А и  $\pm 2\%$  для токов от 5 до 15 А.

При отказе от измерения постоянно-го тока можно существенно расширить диапазон измеряемых токов. Tektronix, к примеру, выпускает токовые пробники A621 с диапазоном токов от 0,1 до 2000 А в диапазоне частот от 5 Гц до 50 кГц с диаметром токовых клещей 54 мм. Такие пробники используются для контроля токов в мощных энергетических установках, например подстанциях и силовых трансформаторах.

Рекомендация 10. При измерениях средних и больших токов (от единиц мА до тысяч А) разумно применять специальные бесконтактные токовые пробники на основе датчиков магнитного поля, возникающего вокруг проводника с током. Повышение чувствительности достигается созданием обмотки датчика из одного или нескольких витков. Обращайте внимание

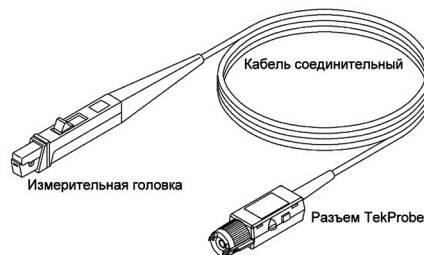


Рис. 17. Токовый пробник Tektronix TSP202 с интерфейсом TekProbe

на такие важные параметры токовых датчиков, как диапазон измеряемых токов, погрешность измерений и частотный диапазон (он обычно уже, чем у пробников напряжения).

В 2001 г. корпорацией Tektronix были созданы пробники класса TekConnect™ (рис. 19, а), а затем в 2006 г. — новейшие пробники типа TekVPI™ [5] (рис. 19, б). Такие пробники применяются в новейших осциллографах серий DPO/MO4000 и DPO7000 корпорации Tektronix.

Выпускаются разнообразные пробники с интерфейсом TekConnect™. В основном, пробники этого класса предназначены для широкополосных осциллографов корпорации Tektronix. Так, в конце 2006 г. были выпущены дифференциальные пробники этого класса P7380SMA и P7313SMA с полосой частот 8 ГГц и 13 ГГц (рис. 20). Времена нарастания их переходной характеристики составляют 55 пс и 40 пс при отсчете на уровнях 10%

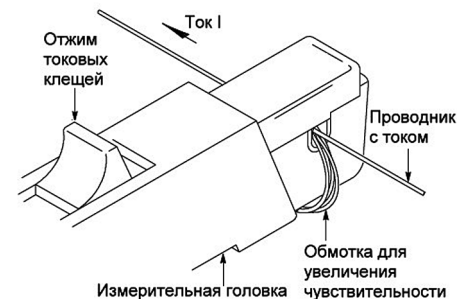


Рис. 18. Измерительная головка пробника Tektronix TSP202

и 90% и 35 пс и 25 пс при отсчете на уровнях 20% и 80%. Это позволяет использовать пробники при испытании высокоскоростных импульсных и логических схем. Более подробно дифференциальные пробники рассматриваются ниже.

Новые осциллографы корпорации Tektronix серий DPO4000/7000 используют новейшую и наиболее перспективную архитектуру и конструкцию пробников типа TekVPI™ (рис. 19,б). Это пробники нового поколения [5]. Они обеспечивают интеллектуальный двухсторонний интерфейс, удобство подключения к осциллографу с фиксацией с помощью защелки, сохранение высочайшей точности вычислений и выполнение любых функций пробников различного класса. Пробники имеют удобные средства настройки и диагностики, что снижает требования у квалификации пользователей осциллографами. Светодиодные индикаторы на блоке компенсации, подключаемом к осциллографу, дают наглядную цветовую информацию о работе пробника. Интерфейс осциллографов на основе Windows имеет контекстное меню, также дающее полную информацию о пробниках и их установках. Это меню можно вызвать специальной кнопкой на блоке компенсации.

Продолжение следует

# СОВРЕМЕННЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБНИКИ И ИХ ГРАМОТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

## MODERN OSCILLOSCOPE PROBES AND ITS CORRECT APPLICATION

Афонский А. А. (Afonsky A. A.), Дьяконов В. П. (Dyakonov V. P.), д.т.н., профессор

(Окончание, начало см. № 5, 6-2007)

Одним из первых с интерфейсом TekVPI™ был выпущен токовый пробник ТСР0030 (рис. 21). Он обеспечивает осциллографирование токов от 1 мА до 30 А с пиковой импульсной нагрузкой до 50 А. Полоса частот этого пробника до 120 МГц, он обеспечивает подключение к любому осциллографу серий DPO4000 и DPO7000 без применения источника питания пробника. Пробник широко используется при тестировании и отладке электротехнических и энергетических устройств малой и средней мощности.

Интерфейсы пробников Tektronix XXI века

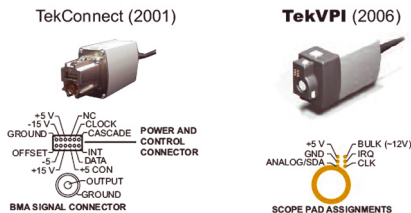


Рис. 19. Новейшие интерфейсы пробников корпорации Tektronix XXI века

Уже давно нашли применение активные пробники, в измерительную головку которых помещается повторитель или усилитель. Первые такие пробники содержали повторитель на биполярном и полевом транзисторе с коэффициентом передачи близким к 1. Главным назначением таких пробников было снижение входной емкости до единиц пФ и



Рис. 20. Широкополосные пробники P7380SMA и P7313SMA с интерфейсом TekConnect

повышение входного сопротивления до единиц-десятков МОм. Широкого применения такие пробники не нашли из-за большого и нестабильного напряжения сдвига нуля и большой погрешности.

Однако в настоящее время микроэлектронная промышленность освоила массовое серийное производство широкополосных (с частотами до единиц ГГц и выше) интегральных усилителей с входной емкостью в доли пФ. Это при-

вело к разработке многих типов активных пробников, как на основе таких усилителей, так и специализированных широкополосных усилителей, созданных специально для таких пробников.

Тут уместно отметить, что наибольшую полосу частот и наименьшее время нарастания можно получить только при использовании режима согласования линии передачи пробника (кабеля). До сих пор они рассматривались как сосредоточенные элементы с общей емкостью. Однако, на самом деле кабели



Рис. 21. Токовый пробник ТСР0030 с интерфейсом TekVPI

и иные (например, микрополосковые) линии передачи являются распределенными и характеризуются погонной (на единицу длины) индуктивностью  $L_1$  и емкостью  $C_1$ . Величины

$$R_n = \sqrt{L_1 / C_1} \text{ и } t_1 = \sqrt{L_1 C_1}$$

называют волновым сопротивлением и погонной временной задержкой линии с распределенными постоянными. В измерительной технике используются кабели с волновым сопротивлением 50 Ом, а в телевизионной — 75 Ом.

Если линия (кабель) согласованы со стороны источника сигнала и осциллографа (т. е. нагружены на сопротивление, равные  $R_n$ ), то характер передачи сигналов качественно меняется: по кабелю, представляющему собой распределенную линию передачи, движется бегущая волна сигнала и искажения его почти отсутствуют. У хорошего кабеля время нарастания составляет всего несколько пикосекунд. При отсутствии согласования на входе или выходе ли-

нии происходит отражение волн от мест рассогласования и форма импульсов сильно искажается.

Рекомендация 11. При особо ответственных измерениях в области сверхмалых времен (доли-единицы наносекунд) используйте характерную для СВЧ технике согласованных по волновому сопротивлению трактов с применяемыми в них коаксиальными линиями передачи (кабелями), аттенуаторами, тройниками, 50-омными заглушками и т. д.

Однако и такая передача сигнала идеализирована и не учитывает наличие входной сосредоточенной емкости осциллографа, не являющейся емкостью кабеля. Например, такая емкость с величиной 10 пФ при входном сопротивлении осциллографа 50 Ом означает наличие постоянной времени  $\tau_{вх} = 0,5$  нс и минимальное время нарастания на



Рис. 22. Внешний вид пробника с комплектом аксессуаров TAP1500/2500/3500

уровнях 0,1 и 0,9 экспоненциального перепада равное  $2,2 \tau_{вх} = 1,1$  нс. Таким образом исследование субнаносекундных процессов становится фактически невозможным, даже если полоса частот осциллографа намного превышает 1 ГГц. Сказанное относится и к пробникам, входная емкость которых имеет порядок 10 пФ, что характерно для большинства описанных выше пробников.

Есть и еще одна проблема — низкое входное сопротивление в 50 Ом недопустимо сильно загружает цепи устройств, выполненных на современных высокоскоростных интегральных микросхемах (см. таблицу 2). Возникает задача создания пробников, имеющих входное сопротивление порядка десятков кОм и выше и очень малую входную емкость — менее 1 пФ. Это возможно только в случае выноса входных каскадов осциллографических усилителей прямо к точкам схем, напряжения в которых измеряются и наблюдаются. Это возможно только при построении пробников как

Таблица 2  
ТИПИЧНЫЕ ВРЕМЕНА НАРАСТАНИЯ И ПОЛОСЫ ЧАСТОТ ОСЦИЛЛОГРАФОВ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТРОЙСТВ НА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМАХ

Тип микросхем	Типичное время нарастания	Типичная полоса частот
TTL	2 нс	175 МГц
CMOS	1,5 нс	230 МГц
GTL	1 нс	350 МГц
LVDS	400 пс	850 МГц
ECL	100 пс	3,5 ГГц
GaAs	40 пс	8,75 ГГц
Si-Ge гетеропереходные	менее 1 пс	более 350 ГГц



активных устройств с миниатюрным усилителем в измерительной головке. Передача сигнала с выхода измерителя к осциллографу выполняется по согласованному 50-омному тракту.

Современные цифровые осциллографы достигли частотного предела в 20 ГГц для наблюдения сигналов в режиме реального времени и до 100 ГГц в стробоскопическом режиме и в режиме эквивалентной частоты стробирования [1, 2]. Таким образом, они могут использоваться для детального исследования переходных процессов практически во всех импульсных и логических микросхемах (см. табл. 2) за исключением микросхем на

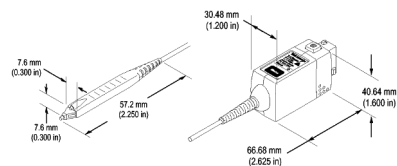


Рис. 23. Конструкция измерительной головки и разъема для подключения осциллографа пробников TAP1500/2500/3500

гетерропереходных Si-Ge, имеющих рабочие частоты более 0,35 ТГц и времена переключения менее 1 пс. Такие транзисторы созданы, например, корпорацией Intel для новых поколений микропроцессоров [7]. Кроме того, такая технология используется при создании стробирующих устройств и скоростных аналого-цифровых преобразователей современных цифровых осциллографов [1,2].

Корпорация Tektronix выпускает множество активных пробников для своих цифровых скоростных осциллографов. Несмотря на наличие в них усилителя, пробники обычно выполняются с коэффициентом деления 1/10 и их основное назначение — уменьшение входной емкости до значений порядка 1 пФ и менее. Одними из первых широкополосных пробников с интерфейсом

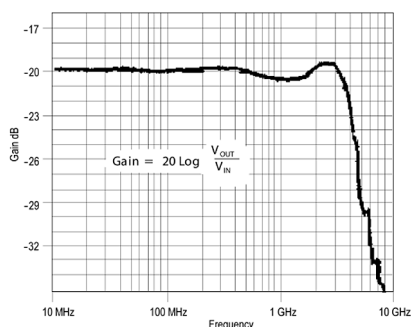


Рис. 24. АЧХ пробника TAP3500

стали пробники TAP1500/2500/3500 с полосой частот 1,5 ГГц, 2,5 ГГц и 3,5 ГГц. Внешний вид пробника с комплектом аксессуаров показан на рис. 22. В состав аксессуаров пробников входит около трех десятков игл, зацепов, пружинных контактов и цветных ободков.

Конструкция измерительной головки и разъема для подключения осциллографа показана на рис. 23. Обратите внимание на миниатюрность подключающего

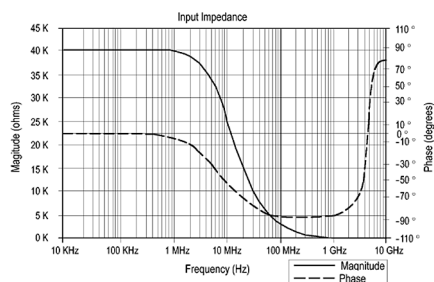


Рис. 25. Зависимость магнитуды и фазы импеданса пробников TAP2500/3500

узла измерительной головки и предельное сокращение длины сигнального и земляного выводов. Они выполнены в расчете на возможность легкого подключения к выводам микросхем, контактными площадкам и штырям колодок.

АЧХ пробников снятая с помощью генератора качающейся частоты с выходным сопротивлением 50 Ом имеет неравномерность менее 1 дБ вплоть до граничной частоты. На рис. 24 показана типичная АЧХ пробника TAP3500 с граничной частотой 3,5 ГГц. Спад коэффициента передачи пробника на этой частоте составляет -3 дБ относительно начального уровня 20 дБ.

Входное сопротивление пробников TAP2500/3500 составляет 40 кОм (у TAP1500 — 1 МОм), а входная емкость 0,8 пФ. Однако, учитывая быстрое падение емкостного сопротивления (в соответствии с формулой  $X_C = 1/(2\pi fC)$ )

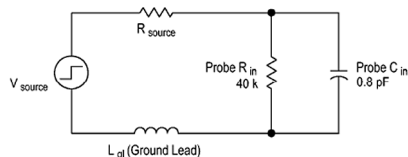


Рис. 26. Эквивалентная схема измерительной головки пробников TAP2500/3500

входной импеданс близок к 40 кОм только на частотах до 1 МГц (рис. 25). Далее начинается спад импеданса до очень малых значений уже на частоте около 1 ГГц. Это, как и характер изменения фазы импеданса надо учитывать при выполнении измерений на СВЧ.

Благодаря малым размерам активной части измерительной головки можно отказаться от учета распределенного характера ее компонентов и использовать обычную измерительную

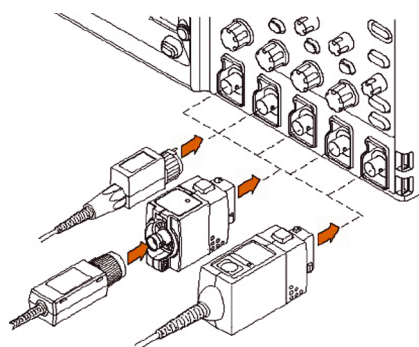


Рис. 27. Применение с интерфейсом TekVPI пробников различного типа

схему, показанную на рис. 26. Значения индуктивности земляного вывода уже обсуждались при обсуждении эквивалентной схемы пассивных пробников (рис. 8). Применение эквивалентной схемы рис. 26 позволяет на рабочих частотах пробников использовать обычные методы анализа цепей с сосредоточенными постоянными.

Поскольку на входе пробника используется маломощный усилитель, то диапазон входных напряжений ограничен пределами от -4 В до +4 В (у TAP1500 — от -8 до +8 В), уровни напряжения отсечки составляют -10 В и +10 В, а максимально возможное (без повреждения пробников) напряжение не должно превышать 30 В любой полярности. Времена нарастания пробников

до 267 пс у TAP1500, 140 пс у TAP2500 и 130 пс у TAP3500.

Рекомендация 12. Не применяйте более широкополосные пробники, чем нужно. Учтите, что чем меньше полоса частот пробника, тем шире динамический диапазон напряжений, на который рассчитан пробник.



Рис. 28. Адаптер TPA-BNC

Интерфейс TekVPI™ замечателен тем, что он допускает использование пробников других типов (рис. 27). Это повышает универсальность применения осциллографов и способствует более рациональному применению довольно дорогих пробников.

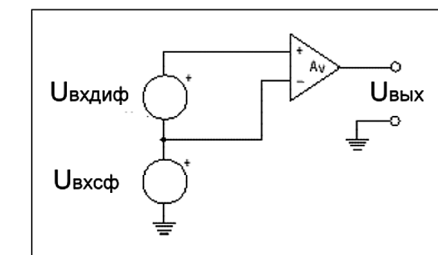


Рис. 29. Схема включения дифференциального усилителя

Для пробников класса TekProbe второго поколения разработан специальный модуль (адаптер) согласования TPA-BNC. Его внешний вид показан на рис. 28. Его применение также показано на рис. 27.

Наиболее совершенными пробниками на сегодняшний день являются активные дифференциальные пробники. Основное их назначение — исследование разности напряжений в двух точках независимо от среднего их потенциала. Различают два режима работы пробника: дифференциальный (противофазный) и синфазный. В дифференциальном режиме выходное напряжение дифференциального пробника задается выражением:

$$U_{\text{вых}} = K_d(U_{1\text{вх}} - U_{2\text{вх}}), \quad (10)$$

где  $K_d$  — дифференциальный коэффициент передачи.

В синфазном включении на оба входа подается напряжение  $U_{12\text{вх}}$  и

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{сф}} U_{12\text{вх}}. \quad (11)$$

В идеале  $K_d \gg 1$  и  $K_{\text{сф}} = 0$ , т. е. дифференциальный усилитель усиливает только разность входных напряжений. На практике отличие  $K_{\text{сф}}$  от 0 учитывают коэффициентом подавления синфазной составляющей

$$K_{\text{Псф}} = K_d / K_{\text{сф}}. \quad (12)$$

Его часто выражают в децибелах. Реальные значения  $K_{\text{Псф}}$  равны 40-60 дБ. Упрощенная схема включения дифференциального усилителя с источниками противофазного и синфазного сигналов показана на рис. 29. Выходное напряжение ее равно:

$$U_{\text{вых}} = K_d U_{\text{вхдиф}} + K_{\text{сф}} U_{\text{вхсф}}. \quad (13)$$

Желательно, чтобы второй член в выражении (13) был как можно меньше величины.

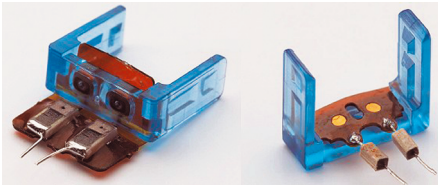


Рис. 30. Насадки для измерительной головки дифференциальных пробников

Промышленность выпускает массу интегральных операционных усилителей с огромными значениями  $K_d$  (от тысяч до многих миллионов) и  $K_{\text{Псф}}$ . Однако полоса частот их редко достигает десятков и еще реже сотен МГц. Поэтому интегральные усилители общего назначения для пробников широкополосных осциллографов не подходят. Разработчики осциллографов вынуждены создавать свои собственные сверхскоростные дифференциальные усилители на уникальной элементной базе.

Поскольку современные осциллографы имеют достаточную чувствительность, то ее повышение пробниками не актуально. Куда важнее (даже при исследовании высоковольтных устройств и цепей) обеспечить измерение именно разности напряжений в двух точках. Поэтому Tektronix выпускает серию высоковольтных дифференциальных пробников P5200/5205/5210 с различными коэффициентами деления

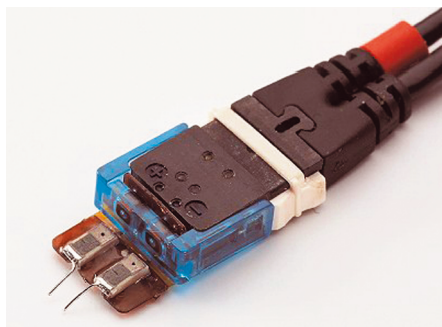


Рис. 31. Пример крепления насадки к измерительной головке

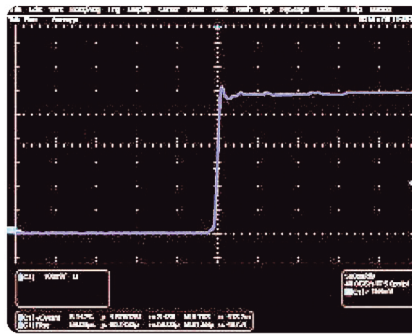


Рис. 32. Осциллограмма переходной характеристики дифференциального 8-ГГц пробника

напряжения (от 1/50 до 1/1000) и максимальными уровнями напряжения до 2200 В. Входное сопротивление пробников 4 МОм или 8 МОм, входная емкость 7 пФ.

Еще более важно построение широкополосных дифференциальных пробников с невысокими уровнями напряжений, предназначенными для работы с устройствами на высокоскоростных интегральных микросхемах. Такие пробники могут даже ослаблять напряжение, но должны иметь дифференциальный вход и как можно меньшие (до 1 пФ) входные емкости. Иными словами они должны повышать входной импеданс  $Z$  для уменьшения шунтирования измеряемых цепей. Такие пробники называют Z-Active Differential Probes [6]. Примером таких пробников являются пробники P7380SMA и P7313SMA с полосой частот 8 ГГц и 13 ГГц (рис. 20). Естественно, что столь широкополосные и пробники уникальны и дороги.

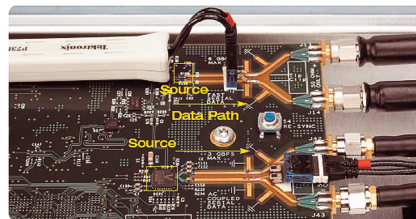


Рис. 33. Подключение измерительной головки к микрополосковой линии на печатной плате высокоскоростного устройства

В работе [6] детально описана конфигурация измерительной головки дифференциальных пробников с помощью разнообразных насадок. На рис. 30 показаны две из множества насадок, обеспечивающих вставку разделительных безиндуктивных конденсаторов, согласующих резисторов различного типа, отрезков проводов разной длины и т. д. Они позволяют обеспечить оптимальное включение пробника P7380, обеспечивающее нужные частотные и временные свойства.

Крепление насадки на измерительной головке показано на рис. 31. В нем прослеживается предельное уменьшение длины сигнальных цепей пробника, но достигаемое применением стандартных массовых компонентов.

Рекомендация 13. Предельно тщательно обдумайте способы подключения

широкополосных пробников к контрольным точкам исследуемых схем. По возможности применяйте только фирменные аксессуары для таких подключений. Только в этом случае можно гарантировать точность частотно-временных параметров при исследовании сигналов.

Об эффективности таких мер можно судить по осциллограмме переходной характеристики пробника с граничной частотой 8 ГГц, показанной на рис. 32. При длительности переходной характеристики 60 пс выброс на вершине составляет всего 4,6%.

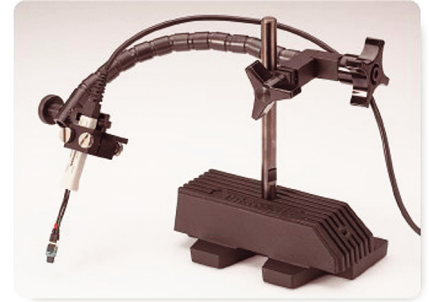


Рис. 34. Применение механического манипулятора для фиксации положения измерительной головки пробника

Измерительная головка пробников этого типа разделена на две части, соединенные отрезками гибкого коаксиального кабеля. Это хорошо видно из рис. 33, на котором показано крепление измерительной головки на печатной плате высокоскоростного устройства. Съемная часть измерительной головки подключена к микрополосковой линии, сигнал на которой исследуется. Большое число насадок позволяет реализовать множество и других подключений к различным компонентам исследуемых устройств — печатных плат и микросхем.

Для надежной фиксации пробников на печатных платах и микросхемах используются также специальные механические «руки» (рис. 34) позволяющие установить пробник в нужное место и зафиксировать его положение даже на гладких площадках.

При исследовании микросхем и миниатюрных устройств на них их разработки, а иногда и производства,



Рис. 35. Станция подключения пробников 2020H/V



требуется фиксация положения и точное подключение нескольких пробников. Для этого созданы специальные станции подключения, например показанная на рис. 35 станция 2020H/V фирмы Probing Solution, Inc.

Рекомендация 14. При исследовании интегральных микросхем и миниатюрных плат цифровых устройств используйте специальные средства для фиксации положения измерительных головок пробников — вплоть до механических манипуляторов, рук и станций подключения.

В заключении надо отметить, что в последнее время получили распространение осциллографы смешанных сигналов, совмещающие функции обычных цифровых осциллографов и логических анализаторов. Для исследования аналоговых и обычных цифровых сигналов в них используются описанные выше пробники. А для исследования логических сигналов, представляемых уровнями логического нуля и единицы, применяются специальные многоканальные пробники с миниатюрными измерительными головками с малой входной емкостью.

Многие платы современных цифровых устройств имеют специальные разъемы, на которые выведены контрольные сигналы, подлежащие тестированию. Для подключения осциллографов смешанных сигналов к таким разъемам служат специальные пробники-соединители. Например, это пробник R6419, внешний вид которого показан на рис.37. Входная емкость каждого канала у этого пробника меньше 0,7 пФ.

Рекомендация 15 (главная). Используйте пробники, наиболее полно отвечающие решению ваших задач. Помните, что нет хороших осциллографов без надлежащих пробников. Пробники — это важная часть осциллографа, это — его руки!



Рис. 37. Пробник-соединитель R6419

Литература

1. Дьяконов В. П. Современная осциллография и осциллографы. — М.: СОЛОН-Пресс, 2005, 320 с.
2. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые

электронные измерения. Под ред. проф. В. П. Дьяконова. — М.: СОЛОН-Пресс, 2005, 544 с.

3. Серия TDS1000B и TDS2000B. Цифровой запоминающий осциллограф. Руководство по эксплуатации. — Tektronix, 2006, 218 с.

4. ABCs of Probes. Tektronix ([www.tektronix.com](http://www.tektronix.com))

5. TekVPI™ Technology Delivers Versatility and Ease-of-Use in New Probe Interface Architecture. Tektronix ([www.tektronix.com/probes](http://www.tektronix.com/probes))

6. Z-Active™ Differential Probes: Best Practices. Tektronix ([www.tektronix.com/accessories](http://www.tektronix.com/accessories))

7. Дьяконов В. П. Intel. Новейшие информационные технологии. Достижения и люди. — М. СОЛОН-Пресс, 2004, 416 с. ☐

*Precision measurements start at the probe tip. The right probes matched to the oscilloscope are vital to achieving the greatest signal fidelity and measurement accuracy. In this article, the author tells about the strengths and weaknesses of probes, and about how to select the right probe for different applications. He also considers some important tips for using probes properly.*



Рис. 36. Многоканальный пробник для логических сигналов

ДАТЧИКИ  
ПОТЕНЦИОМЕТРЫ  
ДЖОЙСТИКИ



В основе автоматизации любого оборудования лежит использование различных датчиков и преобразователей. Особенно актуальной является проблема увеличения производительности небольших и недорогих машин. Более чем 40 лет MEGATRON представляет на мировом рынке экономичные механические и электрические преобразователи (датчики).



КАТАЛОГИ ПРОДУКЦИИ НА САЙТЕ [WWW.IRIT.RU](http://WWW.IRIT.RU)



«ИРИТ»: Москва, 115211,  
Каширское шоссе, дом 55, корпус 1  
Телефон/факс: (495) 781-79-97  
E-mail: sale@irit.ru  
Internet: http://www.irit.ru

**Самый полный обзор  
измерительных приборов,  
представленных на российском рынке  
в настоящее время**

**Серия «Библиотека инженера»  
А.А. Афонский и В.П. Дьяконов  
«Измерительные приборы  
и массовые электронные измерения»**



**Актуальная информация  
за минимум средств!**

**354 руб.**

**По вопросам приобретения  
книги обращайтесь  
по тел. (495) 344-67-07  
или пишите  
на E-mail: editor@kipis.ru**