

# Особенности экспериментального определения динамических характеристик микросхем для построения IBIS-моделей

Николай ЛЕМЕШКО,  
к. т. н.  
nlem83@mail.ru

**В статье рассматриваются особенности измерения динамических параметров цифровых интегральных схем для построения их IBIS-моделей. Дается краткое представление о назначении и возможностях использования IBIS-моделей, обозначаются стандартные динамические характеристики, требующие измерения. Предлагается модель оценки влияния частотных свойств пробников-делителей и осциллографов на отображение импульсных временных функций, основанная на энергетическом критерии. Приведен пример измерений динамических характеристик для микросхемы в составе кольцевого генератора импульсов.**

## Введение

Расширение функциональности радиоэлектронных средств (РЭС) достигается совершенствованием их аппаратной и программной части. Сложность используемых схемных решений уже давно не позволяет реализовывать большую часть РЭС на дискретных компонентах, и поэтому предпочтительнее отдается микросхеменной технологии, особенно в сфере цифровой электроники.

Крупные фирмы, выпускающие РЭС широкого потребления, существуют в условиях жесткой конкуренции, заставляющей их оптимизировать процесс проектирования и жизненный цикл своей продукции. Проектные организации стремятся использовать передовую элементную базу, поскольку это позволяет создать более функциональные и качественные электронные устройства [1]. По этой причине рынок интегральных компонентов характеризуется не менее напряженной конкуренцией, требующей четкого сбережения коммерческой тайны.

С другой стороны, развитие микроэлектронной технологии сопровождается расширением номенклатуры цифровых интегральных схем (ЦИС), значительным усложнением их электрических свойств, повышением функциональности и рабочих частот [2]. Это обстоятельство привело к изменению содержания процесса проектирования. В частности, после концептуальной проработки устройства выполняется его логическое построение с использованием систем

поведенческого моделирования, например с применением языка VHDL [3]. Повышение рабочих частот стало причиной проявления проблемы целостности сигналов [4], решение которой достигается комплексом схемных и топологических мер.

По этим причинам возникла необходимость в разработке нового формата спецификации для интегральных компонентов, который отвечает требованиям полноты передачи информации об их электрических свойствах, не раскрывает схемных решений ЦИС и пригоден для непосредственного использования в средствах автоматизации, в частности, при анализе целостности сигналов. Таким форматом стал IBIS (Input/Output Buffer Information Specification), данные которого гармонично дополняют представляемые изготовителями ЦИС справочные сведения.

Модели, формируемые в системах автоматизации проектирования (САПР) на основе этого формата, получили название IBIS-моделей. Их используют преимущественно при электрическом моделировании линий передачи на печатных платах в целях анализа целостности сигналов. Данные для построения спецификации в IBIS-формате могут быть получены экспериментально либо с применением полных моделей ЦИС. Первый метод предпочтителен и используется наиболее часто, поскольку не требует наличия труднодоступной информации и специальных вычислительных комплексов для моделирования полных схем ЦИС в целях извлечения требуемых параметров.

Одним из центральных вопросов в сфере экспериментального построения IBIS-моделей является совершенствование методов измерения динамических характеристик ЦИС, чему и посвящена настоящая статья.

## Представление об IBIS-моделях и основах их использования

Спецификация в формате IBIS имеет жесткую структуру, что обеспечивает возможность ее автоматизированной обработки [5, 6]. На ее основе строятся модели, представляющие собой совокупность схем замещения входных и выходных каскадов ЦИС. Классическая теория IBIS предполагает, что сигналы на выходах формируются за счет внутреннего тактирования выходного каскада, а входные сигналы анализируются пользователем. Таким образом, IBIS-модели описывают только электрические свойства входных и выходных буферов, и этого вполне достаточно для анализа целостности сигналов.

На рис. 1 представлены схемы IBIS-моделей входного и выходного буферов ЦИС. Элементы C\_pkg, L\_pkg и R\_pkg представляют собой физические характеристики вывода ИМС — емкость, индуктивность и активное сопротивление, C\_comp — это обобщенная емкость буфера, отражающая его инерционные свойства.

Сопrotивление R<sub>n</sub> является нелинейным. Оно не входит в стандартную IBIS-модель, но бывает часто необходимо, так как моделирует входную вольт-амперную характери-

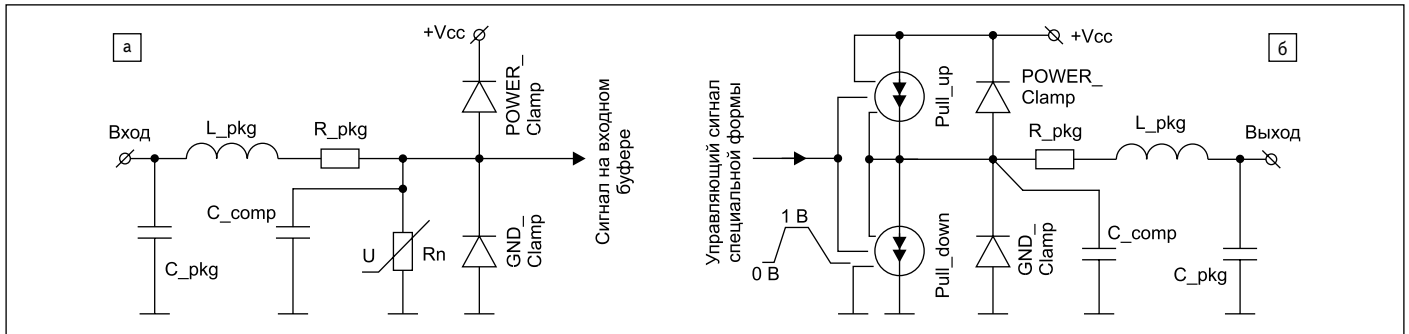


Рис. 1. IBIS-модель буфера ЦИС: а) входного; б) выходного

стику для данного типа логики (ТТЛ, ЭСЛ и др.). Для КМОП-логики сопротивление  $R_n$  не используется, так как токи затворных цепей МДП-транзисторов очень малы.

Диоды  $GND\_Clamp$  и  $POWER\_Clamp$  используются, например, в ЦИС на основе КМОП-логики. Если напряжение на входе или выходе выходит за интервал от 0 до напряжения электропитания  $+V_{cc}$ , то через один из диодов будет протекать ток. Эти элементы являются защитой от перенапряжения и способствуют гашению паразитных резонансных явлений, возникающих в элементах печатного монтажа.

Моделирование ЦИС выполняется путем введения в схему моделей буферов ЦИС, линий передачи и вспомогательных элементов. Паразитные связи элементов печатного монтажа обычно моделируются емкостями или взаимными индуктивностями.

Представленные модели буферов ИМС позволяют достаточно точно моделировать процессы передачи и приема сигналов при их трансляции линиями печатного узла, что и требуется для численного исследования целостности сигналов. Однако в обычном виде они не позволяют полностью моделировать даже элементарные логические единицы, поскольку не предусматривают связи между моделями буферов. Эта проблема решается совместным использованием поведенческих (логических) моделей и IBIS, а на уровне схемного моделирования она может быть решена на основе теории нормированных сигналов [5, 6].

Важно подчеркнуть, что применение IBIS-моделей не ограничивается решением проблем целостности сигналов. Оно расширяется возможностью анализа статических режимов, переходных процессов, помехоустойчивости и другими применениями.

**Особенности экспериментального исследования динамических характеристик микросхем и требования к измерительным средствам**

Стандарт, регламентирующий содержание IBIS-описания ЦИС [7], предписывает включать в его состав следующие динамические характеристики выходных буферов:

- время нарастания/спада напряжения в интервале 20–80% его изменения при активной нагрузке выхода;
- формы фронтов/спадов при использовании специальных нагрузочных схем.

Первые из отмеченных параметров характеризуют быстродействие ЦИС. При их измерении нагрузка может быть симметричной, нагрузочные резисторы могут подключаться одновременно к шине питания и заземления.

Формы фронтов и спадов описываются по точкам и при использовании в САПР аппроксимируются кусочно-линейными функциями. Схема, используемая для их измерений, приведена на рис. 2. В ней учтены паразитные характеристики измерительной оснастки — емкость  $C$  и индуктивность  $L$ , которые рассматриваются как характеристики нагрузки, но не относятся к измерительным средствам. Опорное напряжение  $V_{ref}$  выбирается в интервале питающих напряжений. Условия измерений в обоих случаях прописываются в спецификации, причем в [7] отмечается, что наилучшим случаем является отсутствие реактивной составляющей нагрузки выходных буферов. При составлении спецификации считается, что в ней указаны все параметры, влияющие на результаты измерений, причем эти параметры присваиваются только измерительной оснастке. Дополнительным параметром, который часто используется при моделировании элементарных ЦИС, но не приводится в IBIS-описании, является задержка распространения сигналов.

Основной особенностью измерения динамических характеристик ЦИС является то, что цифровые сигналы не следует рассматривать как средство передачи логического состояния. Извлекаемой информацией является их форма, и поэтому она должна передаваться

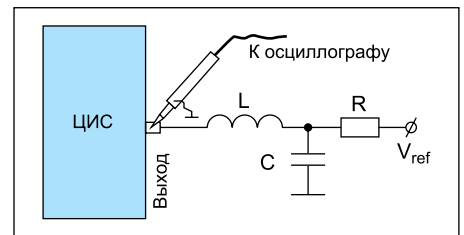


Рис. 2. Схема измерений динамических параметров выходных буферов ЦИС

средствами измерений с минимальными искажениями. По этой причине основным требованием к используемым измерительным средствам является минимизация их влияния на результаты измерений. Для предъявления обоснованных требований к измерительному оборудованию, в первую очередь осциллографу, следует построить модель внесения погрешностей в исследуемый сигнал. Практика измерений в области IBIS показала рациональность использования пробников с делителями напряжения, чем достигается существенное снижение входной емкости, увеличение входного сопротивления, расширение полосы пропускания (до двух порядков) и уменьшение общего влияния на ЦИС.

Перед выполнением измерений пробники-делители проходят процедуру калибровки, которая заключается в настройке соотношения между регулируемой емкостью пробника  $C_1$  и входной емкостью  $C_2$  осциллографического канала (рис. 3). Она состоит в подаче на вход осциллографа прямоугольных калибровочных импульсов и регулировки  $C_1$  до достижения ими формы, минимально отличающейся от идеальной. Это соответствует равенству постоянных времени цепей  $R_1C_1$  и  $R_2C_2$ . Далее это условие считается выполненным.

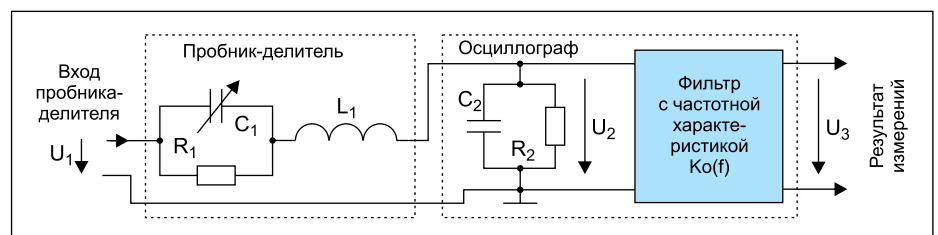


Рис. 3. Модель для оценки погрешности, вносимой пробником и осциллографическим каналом

На рис. 3 в качестве  $R_1$  и  $R_2$  обозначено активное сопротивление делителя и входное сопротивление осциллографа, индуктивность  $L$  характеризует положительную реактивность пробника. Частотные свойства пробника-делителя совместно с осциллографическим входом могут быть описаны комплексным коэффициентом деления, зависящим от частоты  $f$ :

$$\dot{K}_d(f) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + j2\pi fL - 4\pi^2 f^2 R_2 C_2 L} \quad (1)$$

Для упрощения дальнейшего анализа следует наделять осциллографический канал идеальными свойствами, в частности, следует считать, что все погрешности, не связанные с ограничением полосы пропускания, не оказывают значительного влияния на отображаемый сигнал. Частотные свойства осциллографического тракта, как отмечается в [8], могут быть описаны по аналогии с фильтрами нижних частот высоких порядков с гауссовой либо максимально плоской характеристикой. Поскольку современные приборы характеризуются минимальной неравномерностью частотной характеристики, то целесообразно остановиться на втором варианте и рассмотреть свойства осциллографа как фильтра нижних частот с характеристикой Баттерворта. Она имеет вид:

$$K_o(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^{2m}}},$$

где  $m$  — порядок фильтра,  $f_c$  — граничная частота фильтра по уровню  $-3$  дБ (полоса пропускания осциллографа). Функция (2) не учитывает вариаций изменения фазы, однако это допустимо в приближенном анализе, поскольку гармоники импульсных сигналов с частотами, значительно превосходящими несущую гармонику, будут иметь небольшую амплитуду, а приращение фазы будет являться монотонной функцией частоты. Тогда полная передаточная функция будет иметь вид:

$$\dot{K}(f) = \frac{\dot{U}_3}{\dot{U}_1} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^{2n}}} \times \frac{R_2}{R_1 + R_2 + j2\pi fL - 4\pi^2 f^2 R_2 C_2 L} \quad (2)$$

Рассмотрим последовательность прямоугольных импульсов  $g(t)$ , являющуюся четной функцией времени с амплитудой  $A$  и длительностью, равной половине периода  $T$ , соответствующего частоте основной гармоники  $f_1$ . Разложение такой функции в ряд Фурье [9] имеет только четные коэффициенты:

$$a_n = \frac{2A}{\pi n} \sin\left(\frac{\pi n}{2}\right),$$

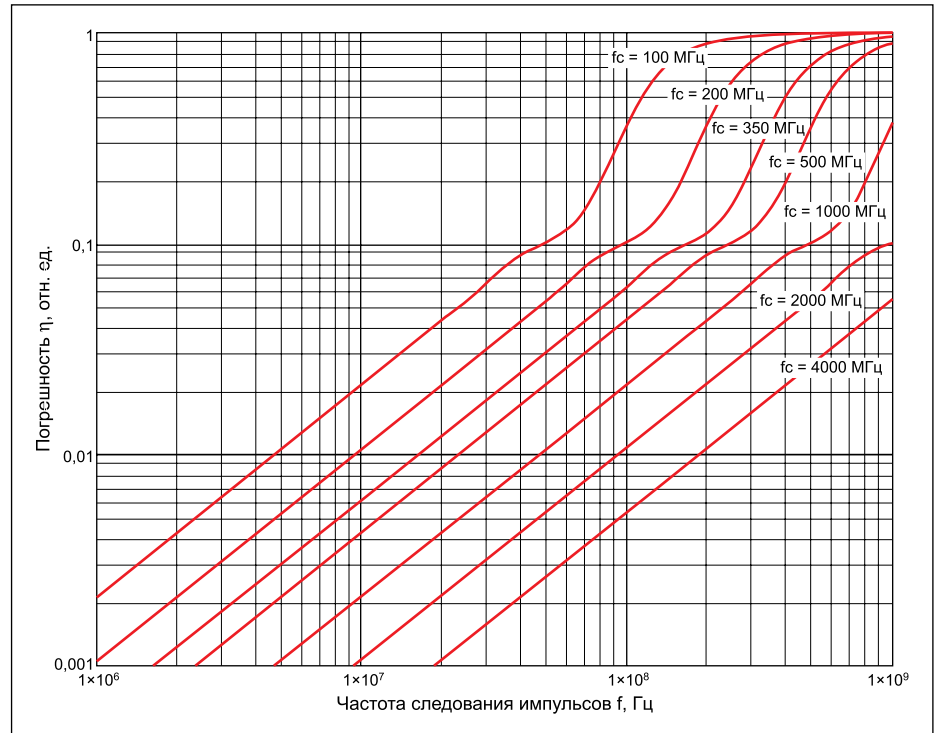


Рис. 4. Зависимости погрешности от частоты следования прямоугольных импульсов для разных полос пропускания осциллографов

где  $n$  — номер гармоники, причем  $a_0 = A$ . Для оценки искажения сигнала в схеме на рис. 3 целесообразно применить энергетический критерий. Для этого следует воспользоваться равенством Парсевала [10]:

$$0,5 a_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 = \frac{1}{T} \int_{-T}^T (g(t))^2 dt, \quad (3)$$

которое следует из равенства энергии сигнала и составляющих его гармоник.

Каждая гармоника с частотой  $f_n = n f_1$  будет претерпевать ослабление до уровня  $|K(n f_1)|$ . Соответственно, левая часть равенства (3) после прохождения сигнала  $g(t)$  через схему на рис. 3 станет меньше, что будет характеризовать его искажение. С учетом упрощения интегральной характеристикой погрешности, не учитывающей постоянную составляющую сигнала, будет являться функция:

$$\eta(f_1) = 1 - \sqrt{\frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^N \left( \frac{\sin^2(n\pi/2)}{n} |K_d \times \dot{K}(n f_1)|^2 \right)}, \quad (4)$$

где  $N$  — количество учитываемых гармоник, в пределе стремящееся к бесконечности,  $K_d$  — номинальный коэффициент масштабирования пробника-делителя.

Для выполнения оценочных расчетов следует определиться с ориентировочными значениями параметров  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$  и  $L$  в уравнении (2). Для современных осциллографов значение входных сопротивления  $R_2$  и емко-

сти  $C_2$  составляют 1 МОм и порядка 15 пФ соответственно. Для пробника-делителя с коэффициентом преобразования 1:10 ( $K_d = 10$ ) сопротивление  $R_1$  составит 9 МОм. Значение индуктивности  $L$  лежит в интервале 2–50 нГн [7] в зависимости от качества изготовления измерительной установки и пробников. Примем  $L = 25$  нГн. При столь малых реактивных характеристиках измерительной цепи квадратичным членом функции частоты в знаменателе (2), описывающем резонансные явления, можно пренебречь.

На рис. 4 представлены зависимости  $\eta(f_1)$ , построенные для значений полосы пропускания 100, 200, 350, 500, 1000, 2000 и 4000 МГц. Частота и погрешность отложены в логарифмическом масштабе для улучшения отображения графиков. При расчете учитывались 300 гармоник прямоугольного сигнала.

В теории моделирования допустимой считается погрешность не более 10%. С другой стороны, в практике построения IBIS-моделей можно рекомендовать использовать методы и средства измерений, обеспечивающие погрешность порядка 1%, тогда точность результатов моделирования, вносящего собственные методические погрешности, будет значительно выше. Анализ представленных зависимостей позволяет установить, что в принятых приближениях погрешности не выше 10 и 1% достигаются при соотношении  $f_1/f_c < 0,47$  и  $f_1/f_c < 0,047$ , что соответствует 2-й и 21-й гармонике в пределах полосы пропускания осциллографа. При этом следует помнить, что предложенная модель не учитывает ряда дополнительных погрешностей, присущих измерительной установке.

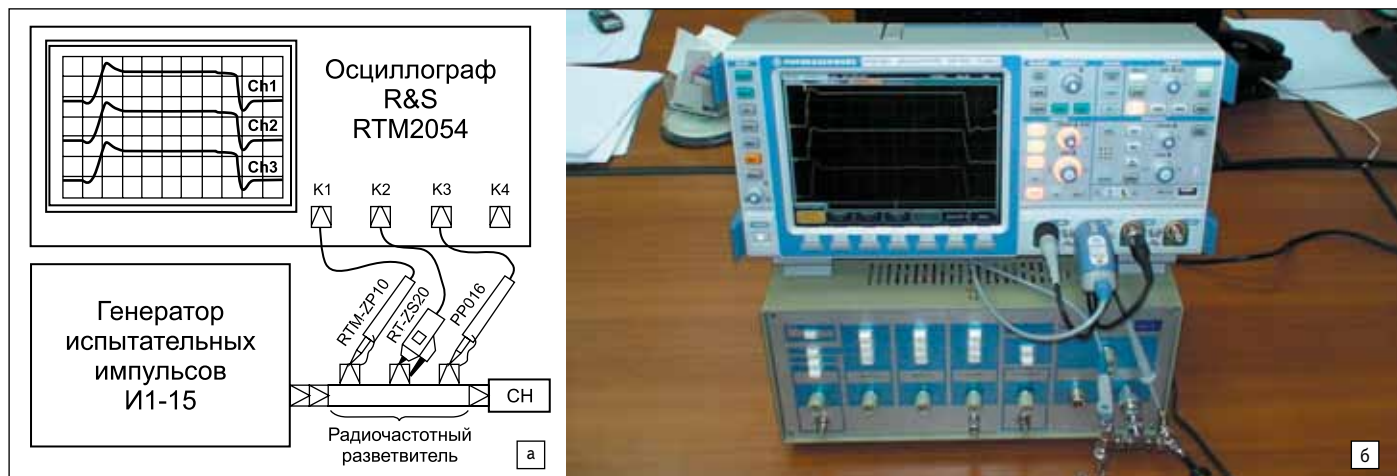


Рис. 5. Измерительная установка для сравнения пробников: а) схема; б) фотография

Полученные результаты подчеркивают важность правильного выбора средств измерений при экспериментальном построении ИВИС-моделей.

**Пример экспериментального определения динамических характеристик ЦИС**

Перед выполнением основных измерений следует качественно оценить влияние выбора пробников на результаты измерений формы сигналов. Для этого можно использовать схему, приведенную на рис. 5а. Она содержит генератор испытательных импульсов И1-15, осциллограф R&S RTM2054 с полосой пропускания 500 МГц и четыре канала, радиочастотный несогласованный разветвитель с четырьмя выходами. На один из его выходов устанавливалась согласованная нагрузка сопротивлением 50 Ом. Фотография измерительной установки приведена на рис. 5б.

Для сравнения были выбраны:

- пассивный пробник R&S RTM-ZP10 с полосой рабочих частот до 500 МГц;
- активный пробник R&S RT-ZS20 с полосой рабочих частот до 1500 МГц;
- пассивный пробник PP016 фирмы LeCroy с полосой рабочих частот до 350 МГц.

Генератор И1-15 формировал импульсы с длительностью и периодом около 75 нс и 10 мкс соответственно, что обеспечивало сква-



Рис. 6. Результат измерений при сопоставлении свойств пробников

ность не менее 130 и формирование широкополосного спектра. Согласно техническому описанию [11], формируемые импульсы имеют длительность фронта не более 0,25 нс, длительность среза не более 10 нс и выброс с амплитудой не более 3% установившегося значения с длительностью не более 10 нс.

Результат измерений представлен на рис. 6. Пробник R&S RTM-ZP10 подключался к каналу 1, активный пробник R&S RT-ZS20 — к каналу 2, пробник PP016 — к каналу 3. Все они работали в режиме с коэффициентом деления 1:10. Как видно из представленных осциллограмм, пробники R&S RTM-ZP10 и PP016 дают визуально одинаковую форму сигналов, однако для первого скорость нарастания и спада оказывается выше и обеспечивается лучшая детализация отображения за счет большей полосы. Сопоставление пассивного пробника R&S RTM-ZP10 и активного пробника R&S RT-ZS20 позволяет отметить значительно большую равномерность и лучшее приближение к паспортному описанию импульса во втором случае, что достигается за счет минимизации индуктивно-емкостных свойств пробника. В случае использования активного пробника на фронте сигнала виден перепад, в то время как в других случаях он не отображается.

Таким образом, правильный выбор пробников наряду с приборами и режимами измерений оказывает первостепенное влияние на правильность измерения временных параметров сигналов. Здесь можно рекомендовать использование активных пробников, обладающих лучшими частотными характеристиками.

Рассмотрим в качестве примера измерения динамических характеристик элементов 2И-НЕ в составе ЦИС К561 ЛА7, выполненной по КМОП-технологии. Для их проведения был изготовлен кольцевой генератор импульсов со схемой, приведенной на рис. 7. Схема смон-

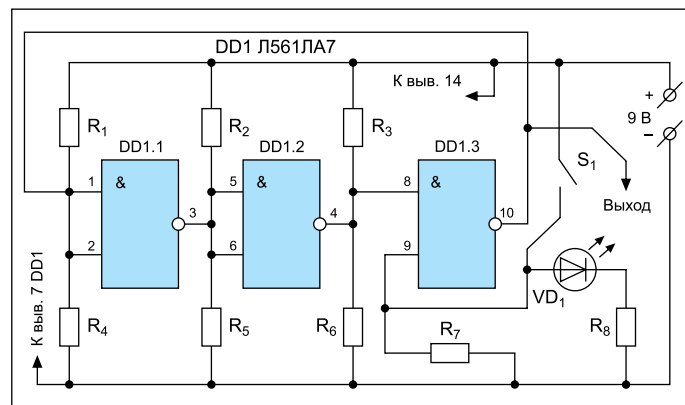


Рис. 7. Принципиальная схема кольцевого генератора импульсов

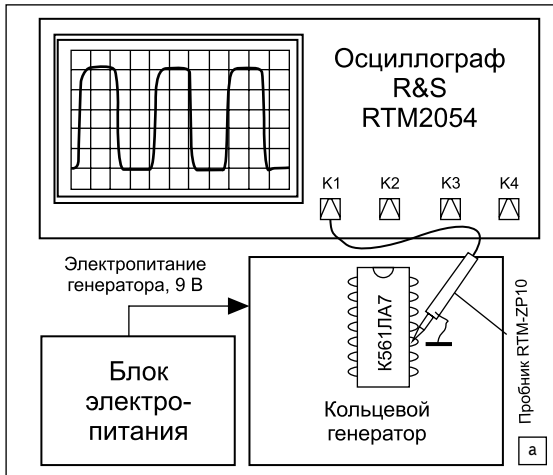


Рис. 8. Измерительная установка: а) схема; б) внешний вид

тирована на небольшом фрагменте монтажного поля с минимальной длиной соединений.

В приведенной схеме резисторы  $R_1$ – $R_6$  имеют сопротивление 10 кОм и служат для создания симметричной нагрузки выхода каждого логического элемента. Генерация импульсов выполняется при замкнутом ключе  $S_1$ , в противном случае она блокируется. О включении генератора сигнализирует свечение светодиода  $VD_1$ . Резисторы  $R_7$  и  $R_8$  имеют номинал 750 Ом. Выходное напряжение снимается с вывода 10 микросхемы. Схема кольцевого генератора позволяет измерять время нарастания/спада и формы фронтов/спадов, а также задержку распространения сигналов в единичном логическом элементе.

Схема и фотография измерительной установки приведены на рис. 8. Измеряемый сигнал снимался с выхода 10 микросхемы и подавался на вход осциллографа R&S RTM2054 через пробник R&S RTM-ZP10 с дополнительно подключенным заземлением. Форма генерируемого импульсного сигнала приведена на рис. 9. С использованием функции автоматических измерений измерены частота генерации, длительности фронта и спада по критерию изменения напряжения в интервале 20–80% его изменения, составившие соответственно 7,134 МГц, 11,8 нс, 8,8 нс. По частоте генерации может быть рассчитана собственная задержка для единичного логического элемента, в данном случае составляющая 23,4 нс.

Форма фронтов и спадов измеряется по той же схеме. Здесь целесообразно использовать курсорные измерения для отсчета времени и напряжения. В качестве примера на рис. 10 показано курсорное измерение длительностей фронта и спада по отмеченному выше кри-



Рис. 9. Осциллограмма выходного сигнала кольцевого генератора

терию. Для получения временной функции напряжения, описывающей фронт или спад, первый маркер устанавливается на его начало, и относительно него измеряются время и напряжение. Возможности синхронизации осциллографа R&S RTM2054 позволяют добиться

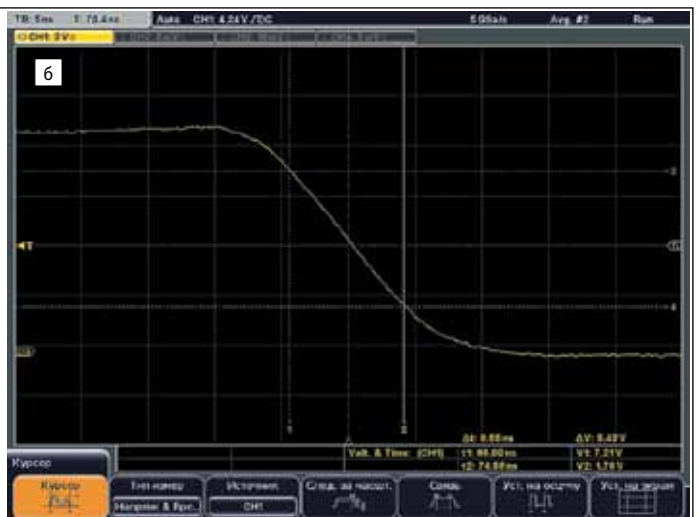


Рис. 10. Измерение длительности: а) фронта; б) спада выходного сигнала кольцевого генератора при помощи курсорных измерений

устойчивого отображения фронтов и спадов даже для сложных, немонотонных сигналов.

Важно отметить, что точность измерений форм фронтов и спадов во многом зависит от точности установки временных и амплитудных курсорных линий, которая должна четко выдерживаться. Например, при небольшом намеренном сдвиге второго курсора, как это показано на рис. 106, измеренное время спада составило 8,55 нс, в то время как точное его значение равно 8,8 нс. Наиболее простым способом устранить возможность ошибки при измерении скоростей нарастания и спада является использование автоматических измерений, предусмотренных в осциллографах серии R&S RTM.

Представленный пример свидетельствует о том, что использование функции автоматических измерений осциллографов, в частности R&S RTM2054, позволяет упростить и в значительной степени автоматизировать измерения динамических параметров цифровых микросхем, в том числе в целях построения их IBIS-моделей.

## Заключение

Использование экспериментальных методов определения динамических характеристик ЦИС для построения их IBIS-моделей не допускает формальных подходов и требует тщательного подбора измерительного оборудования, в отдельных случаях — его дополнительного исследования. Погрешности, внесенные в IBIS-модель, могут проявляться при ее использовании с эффектом накопления, например вызывать ошибки в расчете переходных процессов при моделировании с использованием САПР. Это может стать причиной последующего критического нарушения целостности сигналов в экспериментальном образце РЭС, в то время как при моделировании оно выявлено не будет.

Таким образом, рассмотренные динамические характеристики следует получать с использованием измерительных средств и оснастки, в совокупности обеспечивающих минимальное влияние на исследуемые интегральные компоненты и характеризующихся допустимыми частотными ограничениями. ■

## Литература

1. Кечиев Л. Н., Шнейдер В. И. Современные проблемы обеспечения ЭМС и целостности сигналов электронных модулей быстродействующих цифровых электронных средств // Технологии ЭМС. 2004. № 4.
2. Новожилов О. П. Основы цифровой техники. М.: Радиософт. 2004.
3. Библио П. Н. Основы языка VHDL. М.: Солон-Пресс. 2002.
4. Кечиев Л. Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ». 2007.
5. Лемешко Н. В., Кечиев Л. Н. Моделирование цифровых устройств с использованием IBIS-описания интегральных схем. М.: МИЭМ. 2006.
6. Лемешко Н. В. IBIS-модели интегральных схем в проектировании электронных устройств. Германия, Саарбрюкен: ИД LAMBERT Academic Publishing. 2013.
7. IBIS-standart, ver. 6.0. 2013. [http://eda.org/ibis/ver6.0/ver6\\_0.pdf](http://eda.org/ibis/ver6.0/ver6_0.pdf)
8. МакТиг М. Оптимальная амплитудно-частотная характеристика осциллографа. [http://www.astena.ru/news\\_osc.html](http://www.astena.ru/news_osc.html)
9. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа. 2003.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука. 1974.
11. Генератор испытательных импульсов И1-15. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Документ ГВ3.264.107 ТО. 1985.