

Применение глазковых диаграмм при разработке изделий электронной техники

Идея создания визуального образа для визуального исследования при сохранении всех пропорций и размеров, как наиболее оптимальный и читабельный способ достижения определенной цели была предложена в начале XIX века Уильямом Плэйфером (Шотландия). Его труды впервые содержали диаграммы, аргументируя ценность использования графических элементов.

**Юрий Рубцов¹
Дарья Дормидошина¹
Юрий Евстифеев¹
Владимир Верчёнов¹
Даниил Романов¹**

В современном период, более полувека назад, для анализа качества сигналов в электрических цепях ИЭТ была применена глазковая диаграмма (ГД). Специалистам нужен был способ оценки искажений, вносимых электрическими цепями. Они подавали принимаемый сигнал на вход осциллографа, синхронизируя его развертку с тактовой частотой данных. В результате на экране получалось характерное наложение множества сигналов, имитируя открытый глаз. Так появился и сам термин — «глазковая диаграмма». В дальнейшем с развитием вычислительной техники, в качестве осциллографа начали применяться монитор компьютера. Однако приборный способ получения анализа качества сигналов в электрических цепях ИЭТ длителен и трудоемок, даже с применением автоматизированных систем научных исследований (АСНИИ), поэтому в разработке ИЭТ все более широкое распространение получали САПР с различными методами моделирования, в том числе и ГД. В статье указаны стандарты, регламентирующие применение ГД для проверки качества разработок ИЭТ, дано общее описание ГД, методы и результаты их применения, перспективы развития этого направления для проектирования корпусов микросхем и построения библиотек ВЧ-моделей для САПР.

Ключевые стандарты и положения

В ГОСТ ИЕС 60050-723-2017 [1] ГД определена как осциллограмма в форме «глаза», получаемая из суперпозиции форм волны сигнала из последовательных временных интервалов, каждый из которых назначен одному цифровому элементу. ГД используют для индикации запасов по амплитуде и времени, существующих для декодирования цифрового сигнала. Данный ГОСТ введен для унификации терминологии в области связи, в частности, для стандартизации

определений, касающихся телефонных сетей, услуг связи и аппаратуры. Он обеспечивает единое понимание технических терминов между специалистами разных стран, устраняя двусмысленность в документации и при проектировании сетей связи.

В ГОСТ Р 52595-2006 [2] ГД определена как интерференционная картина, возникающая при наложении большого числа периодов цифрового сигнала. Документ распространяется на цифровые соединительные линии, служащие для передачи сигналов изображения и звукового сопровождения телевизионных программ без компрессии по протоколу последовательного цифрового интерфейса и устанавливает основные параметры цифровых соединительных линий для передачи телевизионных программ и методы их измерений; [2] описывает требования к анализу ГД как методу оценки качества цифровых сигналов, показывающий джиттер (дрожание) сигнала, помехи и искажения.

В [3] с требованиями по анализу проектов печатной платы (ПП) с точки зрения целостности сигналов ГД определена как графическое представление цифрового сигнала, где на один график накладывается большое число интервалов передачи цифровой информации, что позволяет визуально или с помощью графической маски анализировать качество передачи данных. Стандарт регламентирует моделирование процессов, происходящих в линии передачи сигнала на ПП, экстракцию S-параметров данной линии с помощью вычислительных алгоритмов, 2D- и 3D-моделирование с учетом структуры слоев, параметров диэлектрика и топологии ПП, построение графиков вносимых потерь мощности (Insertion Loss) и возвратных потерь мощности (Return Loss) на заданном диапазоне частот. Оценка качества линии передачи сигнала формируется из двух критериев: оценки вносимых потерь Insertion Loss и оценки возвратных потерь Return Loss. Если параметры Insertion

¹ АО «ЦКБ «Дейтон»

и Return Loss укладываются в рамки установленных значений, то построение ГД нецелесообразно. Если график Return Loss находится в диапазоне от -10 до -5 дБ, рекомендуется приступить к построению ГД передаваемого сигнала и подбору оптимальной величины предсказаний, вводимых АМІ блоком IBIS-модели, описанным в [4, 5]. Для построения ГД передаваемого сигнала система моделирования должна иметь блок, позволяющий обеспечить представление линий передачи данных на системном уровне абстракции. На таком уровне вся линия передачи данных делится на участки. Каждый участок представляется блоком, который содержит виртуальную модель в формате IBIS, SPICE или S-параметров, порядок разработки и применения которых описан в [6–8]. Блоки связываются в виде цепочки или графа и формируют линейную структуру. При моделировании строят график передачи последовательных переключений источника сигналов из состояния логической единицы в состояние логического нуля и обратно, для разных последовательностей нулей и единиц. В [3] представлены требования по наличию разработчиков РЭА ГД.

В [9] ГД определена как тип отображения формы сигнала, который показывает общие характеристики цифрового сигнала путем наложения всех полученных отсчетов на общую временную ось с интервалом в одну единицу ширины. [9] — международный стандарт, определяющий процедуры испытаний подсистем волоконно-оптической связи, в частности для измерения параметров оптических глазковых диаграмм, формы волны и коэффициента экстинкции (мере ослабления интенсивности излучения при прохождении через среду, обусловленная поглощением и рассеянием). [9] заменяет версию 2008 года, уточняя методы тестирования и добавляя новые определения. Такой стандарт обеспечивает оценку соответствия цифровых сигналов заданной маске формы волны. Определяет требования к параметрам ГД: времени нарастания и спада, амплитуду модуляции.

В [10] ГД определена как «глазообразный» осциллографический шаблон, полученный путем суперпозиции сигналов из последовательных временных интервалов, каждый из которых соответствует одной цифре. ГД используется для обозначения амплитудных и временных запасов, доступных для декодирования цифрового сигнала.

В соответствии с рекомендациями IPC [11] по проектированию и тестированию высокоскоростных печатных плат, ГД применяется для оценки целостности сигнала, выявления джиттера, межсимвольных помех шумов, а также используется для подтверждения того, что спроектированная по нормам плата IPC ИЭТ обеспечивают требуемую целостность сигнала.

JEDEC (Joint Electron Devices Engineering Council — Сообщество инженеров, специализирующихся в области электронных устройств) установило базовые спецификации, комплексные протоколы тестирования для ИЭТ. Это объемные документы, например, JEDEC STANDARD, DDR5 SDRAM JESD79-5 на 465 страницах публикует требования к тестированию микросхем DDR5 SDRAM, в том числе методом наложения масок к ГД. Однако многие методы все еще находятся в стадии разработки, что приводит к непоследовательности подходов к тестированию на основе ГД и затрудняет анализ данных. Поэтому нами более детально изучаются понятия, приемы и методы ГД.

Общее описание глазковых диаграмм и методы применения

ГД накладывается на форму сигнала на протяжении многих циклов. В качестве входного сигнала используется псевдослучайный поток двоичных последовательностей (PRBS — Pseudo-Random Bit Stream). Форма сигнала каждого цикла синхронизируется с общим эталоном синхронизации, тактовым сигналом.

Глазковая диаграмма дает визуальное представление о неопределенности напряжения и синхронизации, связанной с сигналом. Идеально ГД выглядела бы как прямоугольник. Однако в реальности элементы ИЭТ не идеальны, поэтому форма ГД усложняется.

PRBS формируется с помощью компьютерных программ, в которых применяется математические алгоритмы для имитации случайности. PRBS программа генерирует последовательность двоичных чисел, синхронизированных тактовым сигналом, аппроксимируя сигнал случайных чисел. Фронт сигнала может быть положительным или

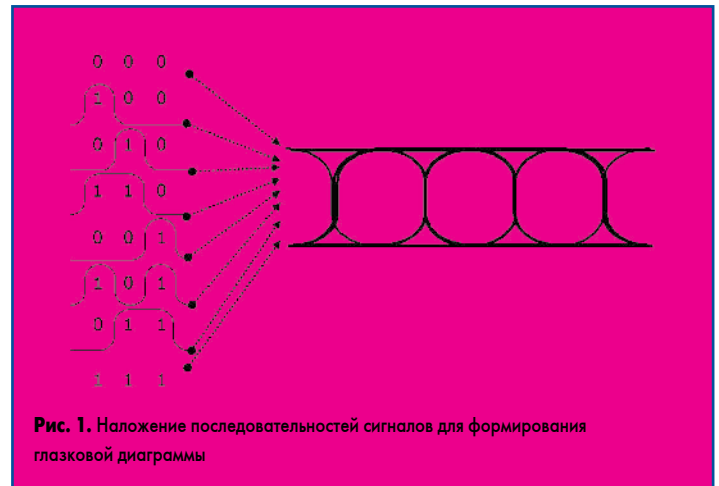


Рис. 1. Наложение последовательностей сигналов для формирования глазковой диаграммы

отрицательным, но результирующий сигнал (импульс или бит), появляющийся после прохождения через проектируемое ИЭТ, может быть любым. Сигналы накладываются друг на друга. И их наложение создает ГД.

Последовательность PRBS используется для имитации моделей IBIS, SPICE для элементов ИЭТ и на приемнике формируется ГД, визуализирующая качество сигнала и правильность проекта ИЭТ. Для получения количественной оценки целостности проходимого сигнала используются параметры ГД, которые сравниваются с данными технического задания на разработку.

Качество разрабатываемого ИЭТ в части целостности обрабатываемого сигнала можно определить, используя маску соответствия, наложенную на ГД. Типичная маска включает в себя как временные, так и амплитудные ограничения.

Шаблон маски может быть сконфигурирован на основе спецификаций для ИЭТ, в которой средняя часть маски состоит из спецификаций времени прохождения сигнала и порогового напряжения. Маски также могут быть адаптированы для проверки определенных параметров. Применяя тест маски к ГД, можно быстро определить, соответствует ли сигнал общим требованиям к его целостности.

Анализ ГД включает в себя выборки напряжения и времени данных, полученных в какой-либо точке ГД. На рис. 1 последовательности сигналов (слева) наложены друг на друга для получения окончательной ГД (справа).

Глазковая диаграмма может показать:

- шум синхронизации или дрожание сигнала, определяемые по горизонтали;
- шум или отражения сигнала, определяемые по вертикали; единичный интервал или длительность импульса, эквивалентная расстоянию между центрами пересечений;
- пиковое напряжение;
- выброс и снижение пикового значения сигнала;
- положение сигнал обратного хода выше или ниже пикового значения;
- время нарастания/спада, измеряемое от времени фронта нарастания/спада;
- сравнительная задержка между двумя или более сигналами.

Дрожание сигнала (джиттер) возникает, когда восходящий или нисходящий его фронт происходит в моменты времени, отличающиеся от идеальных. Некоторые фронты возникают раньше, некоторые позже.

В цифровой ИЭТ все сигналы передаются относительно тактового сигнала. Отклонение сигналов в результате отражений, межсимвольных помех, перекрестных помех, изменений технологического напряжения, температуры и других факторов приводит к джиттеру. Иногда джиттер носит случайный характер.

Влияние согласования сигнала отчетливо видно на созданных ГД. При неправильном согласовании ГД выглядит ограниченной или напряженной; при улучшенных схемах согласования глазковая диаграмма становится более расслабленной (открытой). Плохо согласованная линия передачи сигнала также создает многократные отражения.

Пример применения глазковой диаграммы — анализ сигналов микросхем оперативной памяти DDR (Double Data Rate). Сигналы чтения

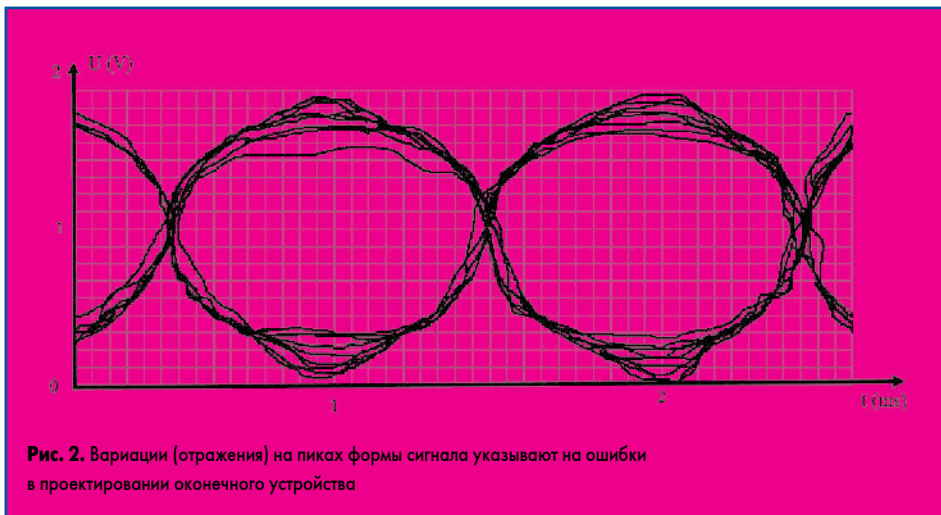


Рис. 2. Вариации (отражения) на пиках формы сигнала указывают на ошибки в проектировании оконечного устройства

или записи DQ (Data Input/Output) объединяются в ГД на основе опорного тактового сигнала, восстановленного из фронта строба DQS (Data Strobe — сигнал синхронизации в DDR, используемый для точной фиксации данных при чтении и записи). Составная глазковая диаграмма может показать точное содержание и распределение джиттера в DDR.

Составная ГД может точно показать содержание и распределение джиттера в интерфейсе памяти, поскольку сигналы DQ привязаны к тактовому сигналу, а также показать отражения от неправильного выбора драйвера и внутрикристалльных оконечных устройств (ODT — On-Die-Terminations), как показано на рис. 2.

Глазковые диаграммы могут показывать ошибки в высокоскоростных последовательных каналах связи. Влияние чрезмерно длинных отрезков переходных отверстий для высокоскоростной дифференциальной пары ослабляет высокочастотные гармоники, что приводит к спаду времени нарастания сигнала, искажению сигнала, уменьшению полосы пропускания и закрытию «глаза» ГД.

Отражения значительно уменьшаются за счет устранения шлейфа. Создание шлейфа с обратной стороны является распространенной практикой на ПП для минимизации длины шлейфа при битрейтах выше 3 Гбит/с (1,5 ГГц). Однако при скоростях передачи более 10 Гбит/с (5 ГГц), такого приема недостаточно для снижения джиттера и частоты битовых ошибок.

Анализ ГД не то же самое, что анализ частоты битовых ошибок (BER — Bit Error Rate), но оба метода часто используются совместно. Процент частоты битовых ошибок рассчитывается как количество битовых ошибок в единицу времени. Фактором являются ошибки синхронизации битов, а также искажения, помехи и шум. Процент частоты битовых ошибок связан с коэффициентом ошибок по битам ГД и зависит от ошибок в исследуемом объекте. Желаемое значение, может быть, как можно меньше (до 10–12 или ниже).

Коэффициент битовых ошибок BER является отношением ошибочно принятых битов к общему количеству переданных битов N.

ГД представляет собой составной сигнал, который указывает на полосу пропускания

канала, затухание, джиттер, отражения, сравнительную задержку и изменения времени нарастания/спада. Измерения ГД могут показать общую целостность сигнала в тракте данных. Они предоставляют мгновенные визуальные данные, которые разработчики ИЭТ могут использовать для проверки целостности сигнала и выявления проблем на ранних этапах проектирования.

Результаты применения ГД

В ходе исследований проводилось моделирование высокоскоростного интерфейса GMI в составе металлокерамического корпуса при тактовой частоте 125 МГц и целевом уровне битовых ошибок (BER) = 10^{-12} .

Для оценки качества передачи данных применен метод построения ГД с использованием IBIS-AMI-моделей приемопередатчиков и S-параметров межсоединений. Данный подход, в отличие от инструментальных осциллографических измерений, позволяет ав-

томатизировать анализ целостности сигнала на этапе проектирования. IBIS-AMI модели включают RLC-параметры корпуса [12], что позволило с высокой точностью воспроизвести влияние паразитных эффектов на целостность сигнала (рис. 3). Межсоединения описывались S-параметрами в формате Touchstone (рис. 4б): для одиночных сигнальных линий использовалась двухпортовая сеть (.s2p), для дифференциальных пар — четырехпортовая (.s4p).

Ключевым этапом моделирования стало обоснование частотного диапазона анализа S-параметров. Для корректного восстановления формы фронтов цифрового сигнала спектр модели должен охватывать высшие гармоники, несущие основную энергию перепада. Для сигнала с тактовой частотой 125 МГц граница анализа была установлена на уровне пятой гармоники (625 МГц), что обеспечивает баланс между точностью воспроизведения искажений и вычислительной сложностью (рис. 4а). Выбор данной частоты обусловлен тем, что вклад спектральных составляющих за пределами пятой гармоники в передаваемый сигнал пренебрежимо мал для исследуемого класса устройств.

Результаты моделирования представлены на рис. 5–7 в виде глазковых диаграмм и графиков плотности распределения сигнала для линий TXD1, TXD3 и TXD5 интерфейса GMI. Графики плотности (Eye Density Plot) отображают статистическое распределение амплитуды во времени, где области высокой концентрации (красные/желтые зоны) указывают на стабильность уровней, а «окно» приема формируется зонами минимальной плотности (синие области).

На основе данных моделирования установлено, что все исследованные одиночные сигнальные линии интерфейса GMI формируют



Рис. 3. Структурная модель канала передачи данных, используемая при моделировании

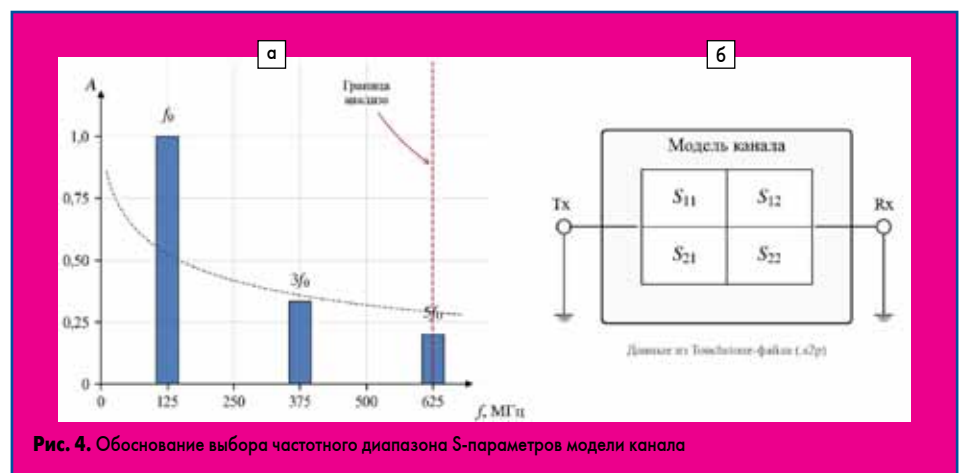


Рис. 4. Обоснование выбора частотного диапазона S-параметров модели канала

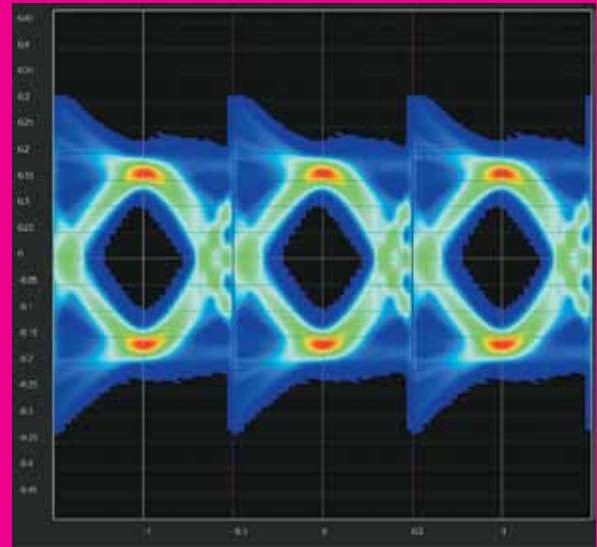
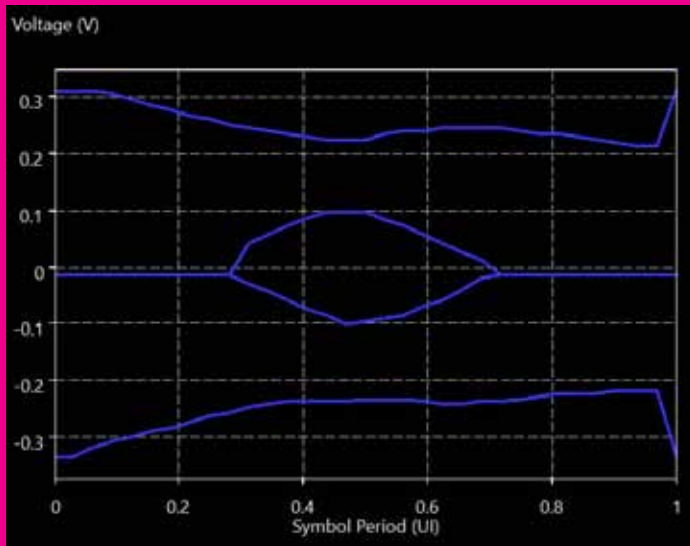


Рис. 5. ГД TXD1 и график плотности ГД для TXD1 (Eye Width = 0,31 UI, Eye Height = 163 мВ)

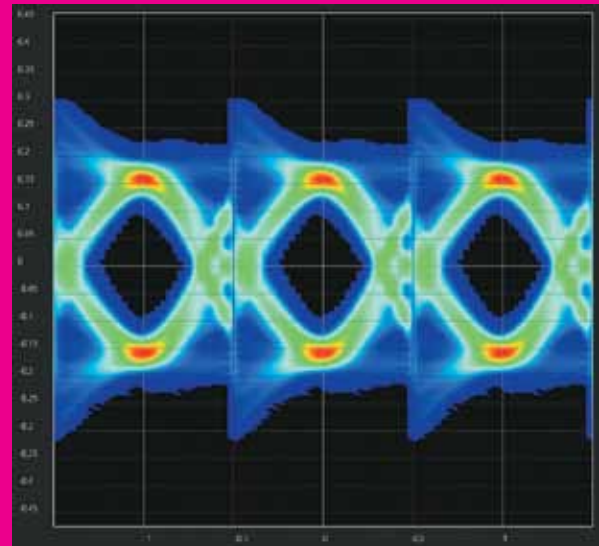
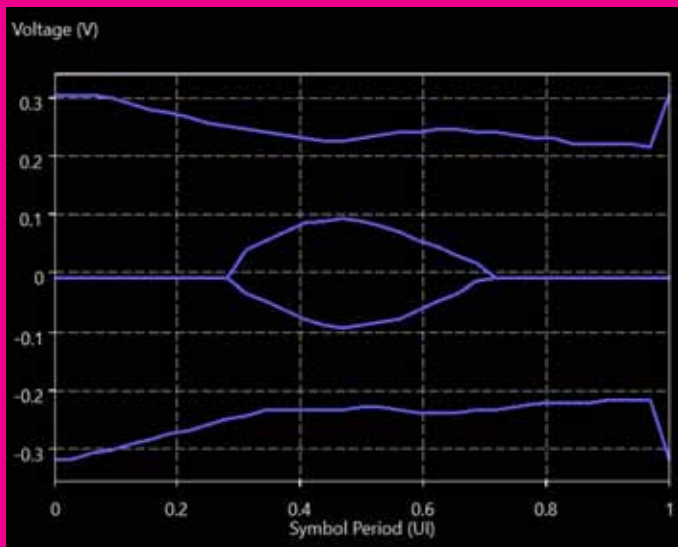


Рис. 6. ГД TXD3 и график плотности ГД для TXD3 (Eye Width = 0,32 UI, Eye Height = 153 мВ)

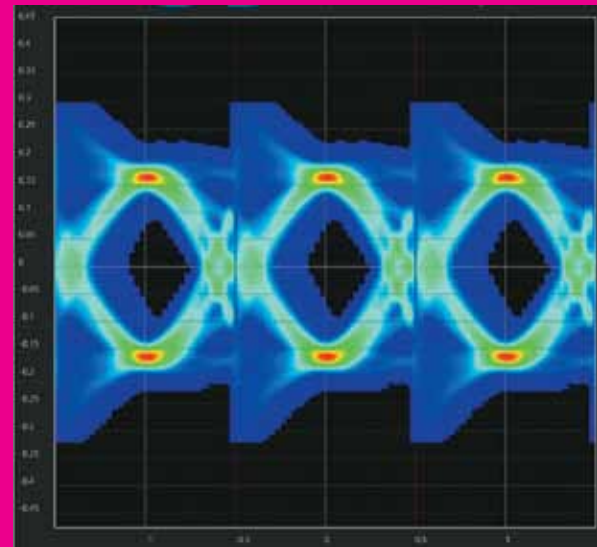
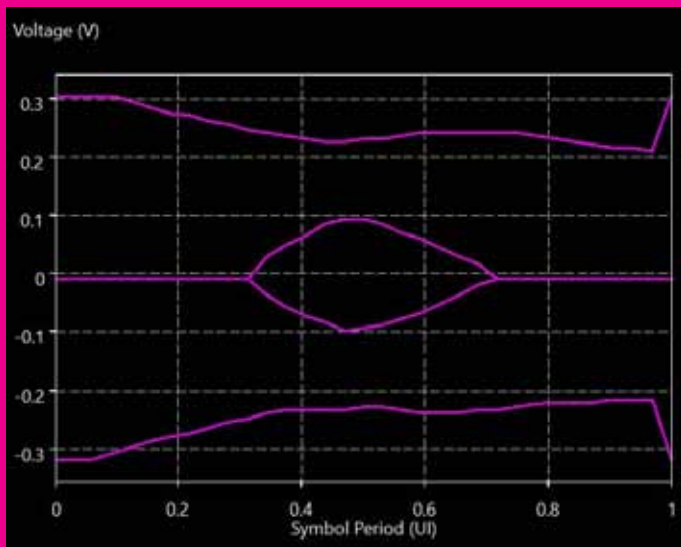


Рис. 7. ГД TXD5 и график плотности ГД для TXD5 (Eye Width = 0,22 UI, Eye Height = 74 мВ)

открытое глазковое окно при заданном уровне битовых ошибок BER = 10^{-12} , что свидетельствует о функциональной работоспособности канала передачи данных.

Наилучшие характеристики продемонстрировали линии TXD1 и TXD3, высота глаза (Eye Height) которых превысила 150 мВ, а ширина (Eye Width) составила 0,31–0,32 UI (Unit Interval). В то же время для линии TXD5 зафиксированы наихудшие параметры: ширина глаза составила 0,22 UI, а высота — 74 мВ. Несмотря на выполнение формальных условий работоспособности, столь малый запас по амплитуде и фазе указывает на высокую чувствительность канала к джиттеру и межсимвольным искажениям (ISI). Данный результат требует оптимизации топологии трассировки указанной линии с целью минимизации емкостной нагрузки и переотражений сигнала.

Выводы

Наложение множества сигналов создает ГД, которая наглядно отображает неопределенность напряжения и синхронизации, связанную с сигналом. В качестве входного сигнала используется псевдослучайный битовый поток. Форма сигнала каждого цикла синхронизируется с общим эталоном синхронизации, как правило, тактовым сигналом. Качество ИЭТ можно быстро определить с помощью наложения маски соответствия ГД. Глазковая маска состоит из спецификаций времени нарастания и спада и порогового напряжения. Джиттер возникает, когда восходящий или нисходящий фронт сигнала проходит в моменты времени, отличающиеся от идеальных. Влияние оконечного напряжения четко видно на сгенерированных ГД. Практический способ анализа сигналов в ИЭТ составная ГД.

Глазковая диаграмма незаменимый инструмент для анализа качества прохождения сигналов. Четкое визуальное представление целостности сигнала позволяет быстро и эффективно оценивать состояние схем. Независимо от того, используются ли ГД для диагностики проблем, оптимизации производительности или проверки соответствия стандартам, они играют ключевую роль в обеспечении надежной и эффективной передачи данных и не только помогают в поиске и устранении ошибок проектирования в целом, но и имеют важное значение в про-

верке соответствия ИЭТ строгим стандартам качества посредством проверки соответствия маски «глаз». По мере развития ИЭТ, важность ГД в обеспечении целостности сигнала и надежности будет продолжать расти. Это не просто диагностический процесс, а необходимый инструмент для дальнейшего развития и оптимизации работы техники.

Практическая значимость автоматизированного подхода к построению глазковых диаграмм заключается в возможности оперативной верификации целостности сигнала в ИЭТ, в том числе в металлокерамических корпусах [12]. В [13] предлагается алгоритм, способный без участия оператора по виду адмиттансной частотной характеристики определить схему замещения исследуемой цепи и рассчитать параметры ее элементов. Алгоритм позволяет расширить функциональные возможности RLC-метров и может использоваться для решения прикладных задач, связанных с нахождением схемы замещения исследуемой цепи. Однако для достоверности применения алгоритма нужно измерить адмиттансную частотную характеристику на разных частотах и температурах на выборке образцов и это требует длительного времени. В то же время моделирование на ранних этапах проектирования позволяет выявить потенциальные нарушения целостности сигнала до запуска опытного производства, а затем и серийного, что исключает временные и материальные затраты на выпуск и доработку бракованных изделий. Критически важными этапами при проектировании современных каналов передачи информации являются анализ раскрытия глазковой диаграммы, а также количественная оценка джиттера и межсимвольной интерференции (ISI).

В настоящее время специалистами АО «ЦКБ Дейтон» ведется разработка программного обеспечения для автоматизированного построения глазковых диаграмм. В условиях ограниченного доступа к иностранным САПР создание отечественных инструментов анализа является приоритетной задачей. Ключевые цели разработки — обеспечение точности моделирования, сопоставимой с приборными измерениями, а также формирование библиотеки ВЧ-компонентов для интеграции в российские системы схмотехнического моделирования.

Это направление будет представлено в наших последующих публикациях. ■

1. ГОСТ ИЕС 60050-723-2017 Международный электротехнический словарь. Глава 723. Вещание: звуковое, телевизионное, передача данных (с Поправкой).
2. ГОСТ Р 52595-2006 Линии соединительные цифровые для передачи телевизионных программ. Основные параметры и методы измерений.
3. ГОСТ Р 71265-2024 Системы автоматизированного проектирования электроники. Анализ целостности сигналов и питания на печатных платах. Маршрут анализа проектов и обработка результатов.
4. IBIS. I/O Buffer Information Specification. Version 8.0. Ratified December 5, 2025.
5. Рубцова Ю. В., Алексеева А. В. Разработка IBIS-модели микросхем концентраторов сетей, применяемых для проектирования телекоммуникационной аппаратуры // Нано- и микросистемная техника. 2017. № 6.
6. Дормидошина Д. А. Порядок разработки моделей инновационной электронной компонентной базы, их актуализация и поддержка в течение стадий жизненного цикла // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2022. № 2.
7. Рубцов Ю. В. Современные тенденции разработки и применения SPICE моделей для автомобильной техники // САПР Электроники. 2023. № 2.
8. Дормидошина Д. А., Рубцов Ю. В. Применение моделей электронной компонентной базы // Радиоэлектронная отрасль: проблемы и их решения. 2024. № 2.
9. IEC 61280-2-2-2012 Fibre optic communication subsystem test procedures — Part 2-2: Digital systems — Optical eye pattern, waveform and extinction ratio measurement.
10. ISO 21806-1:2020(en) Road vehicles — Media Oriented Systems Transport (MOST) Part 1: General information and definitions.
11. IPC-2221A. Generic Standard on Printed Board Design.
12. Рубцов Ю. В., Евстифеев Ю. А., Верчёнов В. А. Квазистатические и полноволновые подходы получения RLC-параметров в разработке корпусов для микросхем. Часть 1 // СВЧ электроника. 2026. № 1.
13. Лобанов Д. К., Орешенко Т. Г., Шмидт А. Е. Алгоритм нахождения RLC-параметров // Космические аппараты и технологии. 2023. № 4.

190x54