

ПРЕИМУЩЕСТВА АНАЛИЗА В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

СЕРГЕЙ КРАСНОВ, инженер

По мере роста производительности систем разработчикам печатных плат приходится решать все более трудные задачи. Напряжение питания ядер становится меньше, рабочие частоты – выше, фронты импульсов – круче. На первый взгляд, задача по обеспечению целостности сигналов может показаться неисполнимой, но понимание ключевых правил и следование им позволяет лучше понять проблемы проектирования многослойных печатных плат.

Похоже, одним из самых основных шагов в процессе реализации преимуществ высокоскоростных цифровых РЧ- и СВЧ-приложений является возможность осуществлять анализ в частотной области. Подавляющее большинство инженеров начинало свой путь с разработки электрических схем и сигнальных цепей, рассматривая напряжения и токи как статические или динамические величины во временной области.

Однако при проектировании цифровых схем требуется другой подход. Анализ в частотной области предоставляет возможность понять многие причины, ухудшающие целостность сигналов, и устранить их. К ним относится несогласованный импеданс, линии передачи с потерями и некорректно реализованные схемы распределения питания.

Во временной области анализ системы осуществляется в соответствии с последовательным изменением ее состояния со временем. В частотной области он выполняется с учетом поведения системы на разных частотах. Чтобы рассмотреть характеристики модели линейной системы, применяется преобразование Фурье, которое позволяет перейти из временной в частотную область. При этом упрощается понимание реакции системы, поскольку временная область затрудняет анализ при более высоких порядках уравнений, описывающих поведение системы.

Проще говоря, график во временной области позволяет понять, как меняется сигнал со временем (см. рис. 1), а график в частотной области (см. рис. 2) демонстрирует, какая часть сигнала приходится на каждую заданную полосу частот во всей полосе.

Согласно теореме Фурье, каждую функцию можно представить в виде суммы синусоидальных и косинусоидальных волн с разными амплитудами и частотами. Разложение прямоугольного сигнала в ряд Фурье представляет

собой сумму гармонических составляющих. Если у исходного сигнала отно-

шение длительностей положительного и отрицательного импульсов является

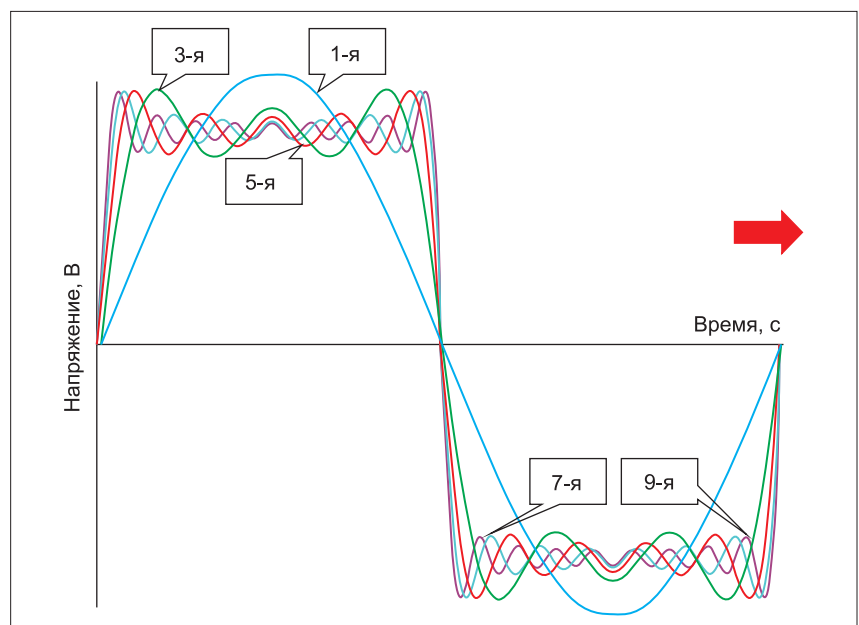


Рис. 1. Прямоугольный сигнал, состоящий из нечетных гармоник

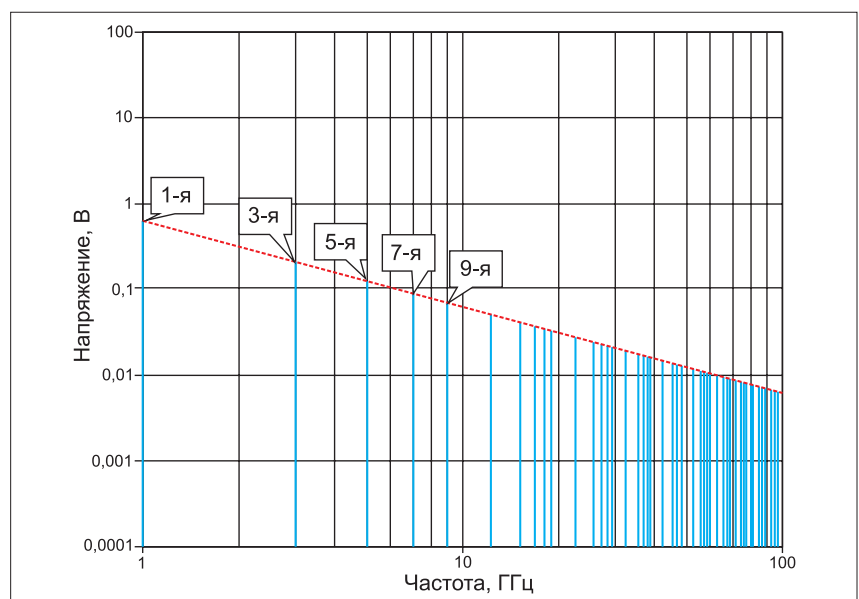


Рис. 2. Частотное представление сигнала прямоугольной формы

четным числом, то четные гармоники ряда Фурье взаимно уничтожаются. Кроме того, с ростом частоты уменьшается амплитуда сигнала.

С помощью уравнения (1) прямоугольный сигнал можно представить следующим образом:

$$F(t) = \cos(\omega t) - \cos(3\omega t)/3 + \cos(5\omega t)/5 - \cos(7\omega t)/7 + \cos(9\omega t)/9. \quad (1)$$

Любой сигнал во временной области можно полностью и однозначно описать в виде комбинации синусоидальных волн. При переходе в частотную область и использовании представления в виде синусоидальных волн появляется возможность быстрее решить поставленные задачи, чем во временной области.

Импеданс по переменному току определяется в обеих областях – во временной и частотной, однако намного проще анализировать этот параметр с помощью частотного представления. В схеме распределения питания применяются развязывающие конденсаторы. Используя временные характеристики, можно утверждать, что эти компоненты накапливают заряд и поставляют его в нагрузку. Однако в частотной области развязывающие конденсаторы еще и уменьшают импеданс на разных частотах, позволяя соблюсти требования к импедансу по переменному току. Таким образом, конденсаторы выполняют две разные функции, которые работают сообща, но в разных областях.

При решении задач по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) спецификации и методы измерения излучения устройств проще использовать в частотном представлении. Разложение прямоугольного сигнала в ряд Фурье представляет собой сумму гармоник. На рисунке 3 показано преобразование прямоугольного сигнала из временной в частотную область и результирующие амплитуды частотных составляющих.

Как уже упоминалось, если у исходного сигнала отношение длительностей положительного и отрицательного импульсов является четным числом, то четные гармоники ряда Фурье взаимно уничтожаются. Нулевой гармоникой является составляющая по постоянному току, а амплитуда основной (1-й гармоники) – наибольшая; по мере возрастания частоты нечетных гармоник амплитуда основной гармоники уменьшается. Если сигнал переменного тока смещен относительно нуля, на частоте 0 Гц появляется составляющая напряжения по постоянному току.

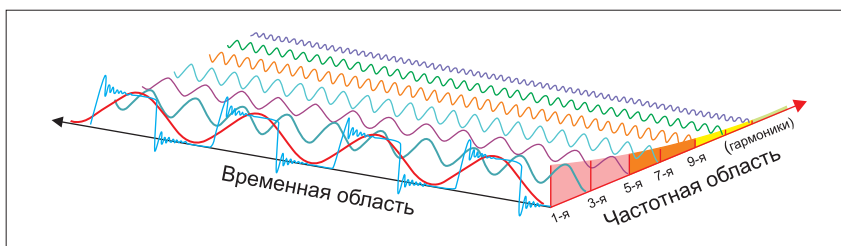


Рис. 3. Гармонические составляющие прямоугольного сигнала, преобразованные из временной в частотную область

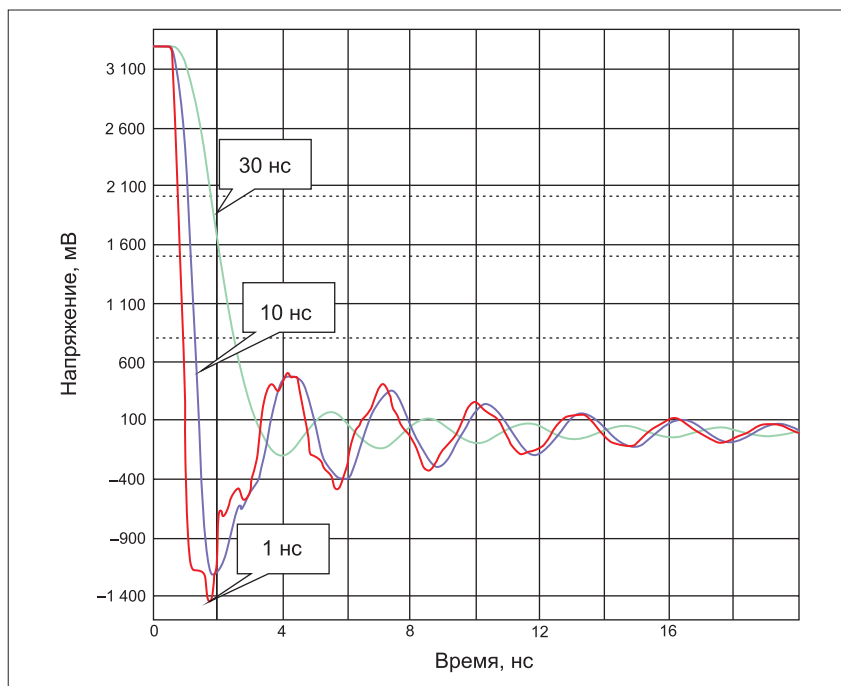


Рис. 4. Скорость изменения фронтов импульсов в начале 1980-х гг. и в 2010 г. (симуляция в HyperLynx)

На ВЧ-содержимое прямоугольного сигнала в значительной мере влияет длительность фронта нарастания сигнала. Если она мала, появляются ВЧ-составляющие. Кроме того, с ростом частоты уменьшается амплитуда. На практике следует учитывать

максимальную ширину полосы сигнала, в т. ч. гармонические составляющие, а не использовать идеальную модель прямоугольного сигнала. Например, если в состав 200-МГц тактового сигнала входят пять гармоник, потребуется проанализировать диапазон до 1 ГГц.

НА ЗАМЕТКУ

- Анализ в частотной области предоставляет возможность понять многие причины ухудшения целостности сигналов и устранить их.
- Во временной области анализ системы осуществляется в соответствии с последовательным изменением ее состояния с течением времени, тогда как в частотной области он выполняется с учетом поведения системы на разных частотах.
- Переход из временной в частотную область упрощает понимание реакции системы.
- Разложение прямоугольного сигнала в ряд Фурье представляет собой сумму гармонических составляющих.
- Импеданс по переменному току определяется в обеих областях – временной и частотной, однако намного проще анализировать этот параметр с помощью частотного представления.
- Если у исходного сигнала отношение длительностей положительного и отрицательного импульсов является четным числом, то четные гармоники ряда Фурье взаимно уничтожаются.
- На ВЧ-содержимое прямоугольного сигнала в значительной мере влияет длительность фронта нарастания сигнала. Если она мала, появляются ВЧ-составляющие.
- Следует учитывать максимальную ширину полосы сигнала, в т. ч. гармоники, а не исходить из идеальной модели прямоугольного сигнала.
- Энергопотребление ПЛИС стало основным определяющим фактором при выборе этих микросхем.
- Чтобы уменьшить потребляемую мощность, производители ИС выпускают процессорные ядра с меньшим напряжением питания и более высокими рабочими частотами, в результате чего уменьшилась длительность фронтов импульсов.
- Сигналы с меньшим временем нарастания фронтов создают звон в несогласованной линии передачи, что непосредственно отражается на излучаемых помехах.
- Излучение ВЧ-составляющих основной частоты происходит с большей интенсивностью, поскольку более короткие длины волн сравнимы с длинами проводников (особенно ответвлений), которые работают как антенны.

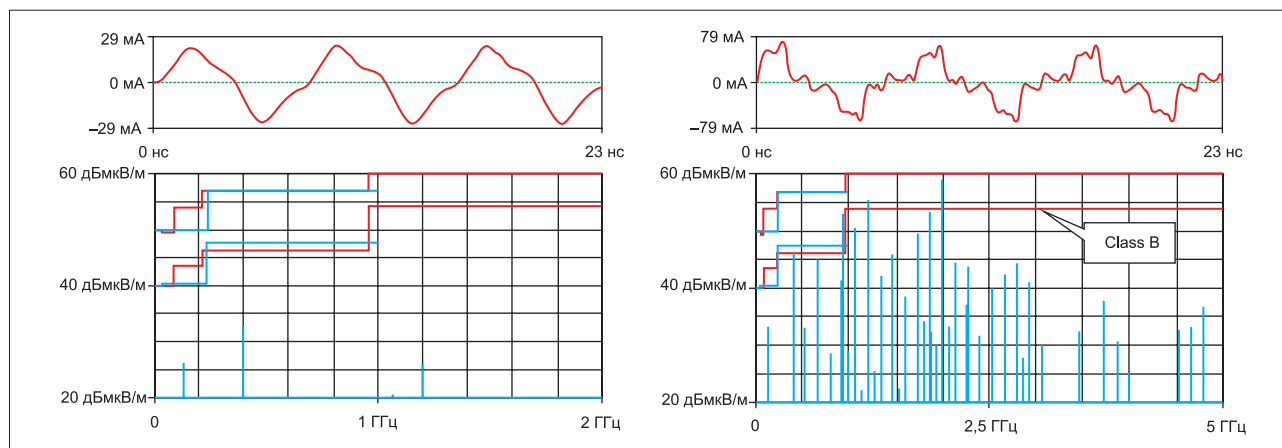


Рис. 5. Электромагнитное излучение в частотной области от сигналов со временем нарастания фронтов 10 и 1 нс

Как известно, технологии меняются очень быстро, особенно литографические методы, благодаря которым уменьшаются размеры кристаллов. В 1987 г. казалось, что 0,5 мкм – крайний нижний предел проектных норм, но в 2019 г. компании Samsung и TSMC приступили к коммерческому производству изделий уже по 5-нм технологии.

Энергопотребление ПЛИС также стало основным определяющим фактором при выборе этих микросхем. Какой бы ни была пригодность к эксплуатации, срок службы батареи, тепловой режим или надежность, во главу угла приложений поставлена потребляемая мощность. Чтобы ее уменьшить, производители ИС стали выпускать процессорные ядра, рассчитанные на меньшее напряжение питания и более высокие рабочие частоты, что, разумеется, привело к уменьшению длительности фронтов импульсов. В результате появились проблемы с отражениями сигналов и их качеством. Следует понимать, что время нарастания фронтов импульсов, посту-

пающих от генератора, оказывает значительное влияние на качество сигналов, временной режим, наличие перекрестных помех и ЭМС.

На рисунке 4 показано, как изменилась скорость изменения импульсов с 30 нс в начале 1980-х гг. до значений меньше 1 нс в 2010 г. К настоящему времени сигналы с субнаносекундным фронтом нарастания – уже не в диковинку. При одинаковой частоте и длине проводника сигнал с меньшим временем нарастания фронтов создает звон в несогласованной линии передачи, что непосредственно отражается на излучаемых помехах. Из рисунка 5 видно, как существенно увеличивается излучение при изменении скорости нарастания фронтов импульсов от минимальной до максимальной. Если время нарастания составляет 1 нс, уровень излучений легко превышает допустимые пределы, установленные для несогласованной линии передачи.

На высоких частотах проводники печатных плат работают как монополи

или рамочные антенны. К сожалению, излучение ВЧ-составляющих основной частоты происходит с большей интенсивностью, поскольку более короткие длины волны сравнимы с длинами проводников (особенно, ответвлений), которые работают как антенны. Следовательно, хотя амплитуда гармонических частотных составляющих уменьшается с ростом частоты, частота излучаемой помехи меняется в зависимости от характеристик проводников/антенн.

Системы цифровой электроники излучают на нечетных гармониках. Большие уровни излучения, как правило, наблюдаются на 3-й, 5-й и иногда – 7-й гармонике основной тактовой частоты. Если так происходит в условиях, когда импеданс по переменному току схемы распределения питания высок, излучение проникает еще дальше. Обнаружение проблемы в частотной области – мощное средство, позволяющее выявить то, что остается незамеченным при анализе во временном представлении. —