

ЦЕЛОСТНОСТЬ ПИТАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМ

ЖЕН МУ, Mentor Graphics Corp

В статье обсуждаются фундаментальные принципы и концепции, используемые при построении целостных систем питания. Приводятся ответы на вопросы, часто возникающие в процессе разработки систем распределения питания, касающиеся представления сети распределения питания, определения импеданса такой сети, в каком диапазоне он должен находиться и какие факторы влияют на его величину. В статье также рассматривается вклад в характеристики системы питания, вносимый токами ИС, паразитной индуктивностью корпуса и паразитной ёмкостью линий питания.

ЦЕЛОСТНОСТЬ ПИТАНИЯ И СЕТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПИТАНИЯ

Как отдельный термин «целостность питания» появился в начале 2000-х гг. Однако обеспечение правильного питания играло важную роль при разработке цифровых устройств с момента их появления: без питания не будет и полезного сигнала. При проектировании систем инженерам было необходимо убедиться не только в том, что логические сигналы будут переданы точно и вовремя, но и в том, что эти сигналы будут сформированы. На рисунке 1 показан процесс разработки ИС, представленный IBM в начале 1980-х гг., в котором чётко прослеживается взаимосвязь между проектированием системы питания и системы передачи сигналов. Он убедительно демонстрирует, что процедуры контроля статического падения напряжения на проводниках и шумов питания ведутся параллельно с разработкой сигнальных цепей.

В 2005 г. в секции разработки системы питания на симпозиуме IEEE EMC были сформулированы следующие требования целостности питания для сетей питания ИС (см. рис. 2):

1. Сеть питания (Power Delivery Network, PDN) должна обеспечивать достаточное питание для ИС.
2. PDN должна обеспечивать малошумящие каналы передачи сигналов.
3. PDN должна мало излучать.

Эти требования фактически представляют собой требования к системе питания готовой к производству ИС. Первое из них — «достаточное питание» — требует, чтобы сама по себе сеть питания в идеале не потребляла энергии вообще, а достаточное количество энергии источника питания передавалось только активным устройствам (ИС). Именно это и является характеристикой сети питания — достаточность и эффективность.

Наличие малошумящих каналов передачи сигнала означает, что сеть

питания не должна вызывать дополнительных проблем с обеспечением целостности полезного сигнала. В реальности сеть питания представляет собой связующее звено между блоками и модулями питания (источниками энергии) и микросхемами (активными устройствами-потребителями энергии), состоящее из плат и модулей с токопроводящими слоями, разведёнными

дорожками на плате и развязывающими конденсаторами. Поскольку абсолютно не потребляющую сеть создать принципиально невозможно, задачей проектировщика сети питания является минимизация этого потребления и обеспечение подачи заданного напряжения на ИС, что означает малое сопротивление цепи питания как для постоянного, так и для переменного тока.

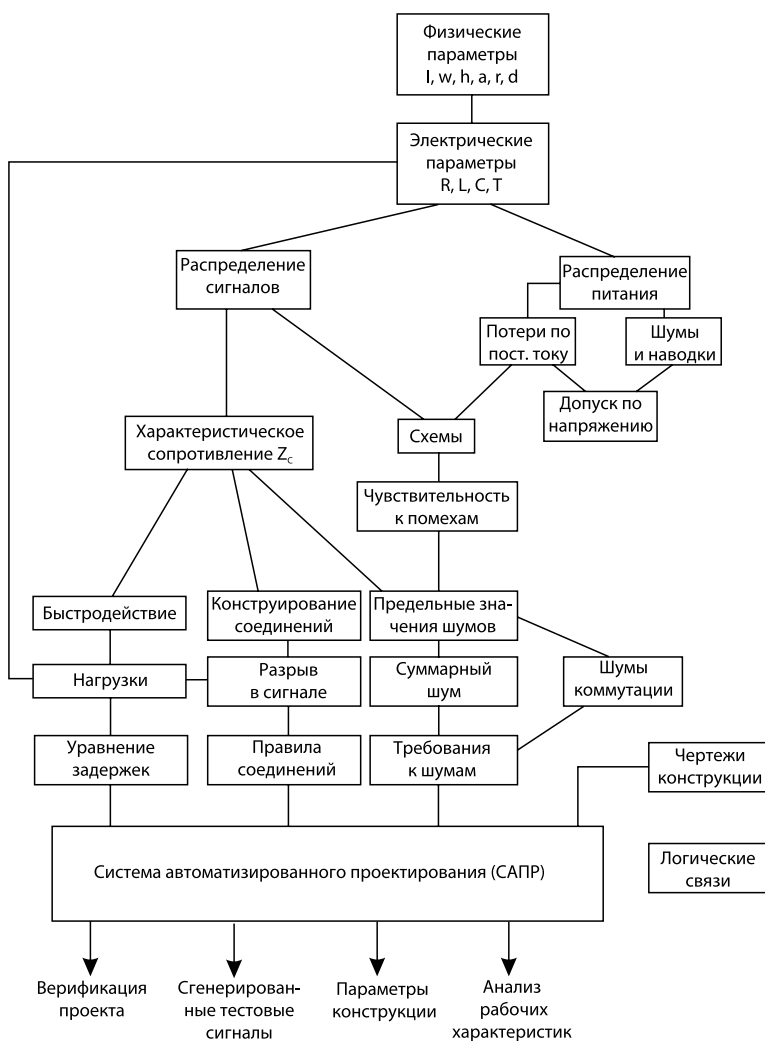


Рис. 1. Алгоритм проектирования, предложенный IBM в начале 1980-х гг.

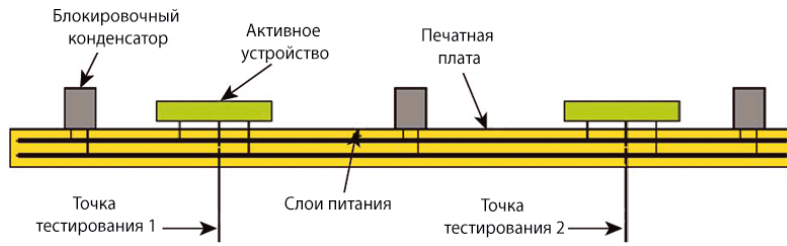


Рис. 2. Сеть питания в представлении производителей оборудования

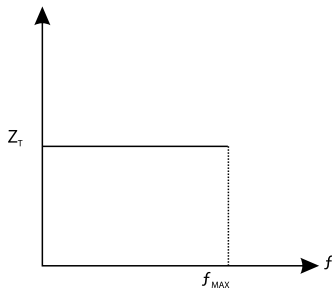


Рис. 3. Целевой импеданс: отсутствие частотной зависимости

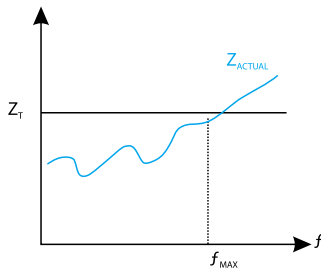


Рис. 4. Импеданс хорошо сконструированной сети питания

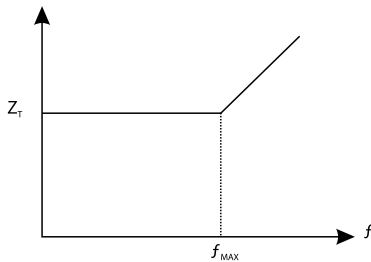


Рис. 5. Допустимые изменения целевого импеданса на частотах выше f_{MAX}



Рис. 6. Многопортовая линейная цепь

ИМПЕДАНС СЕТИ ПИТАНИЯ

В первую очередь, сеть питания должна обладать малым импедансом. Однако вопрос заключается в том, чтобы определить, насколько малым должен быть этот импеданс, чтобы обеспечить достаточное питание для ИС? Для ответа на этот вопрос рассмотрим сначала математическое представление импеданса.

Рассматривая сеть питания как линейную цепь с именованными узлами и током, текущим от источника питания через сеть питания к ИС, мы определим импеданс в заданной точке сети как

$$Z_{PDN}(x, y, f) = \frac{\text{Потенциал узла}}{\text{Суммарный втекающий ток}} \quad (1)$$

В данном случае импедансом является отношение реального потенциала узла к сумме динамического тока потребления ИС при определённой частоте. Если принять полный ток за 1, то потенциал какого-либо узла соответствует его импедансу. При заданной частоте f , когда x и y представляют собой координаты выводов питания ИС, импеданс узла является тем единственным параметром сети питания, с которым имеет дело питаемая ИС. Именно поэтому инженеры-разработчики и интересуются величиной импеданса, стремясь сделать её как можно меньше.

Важно отметить, что импеданс рассматривается в частотной области. Далее следует определить, как использовать его в процессе разработки цифровой системы, анализ которой ведётся обычно во временной области.

Считая, что источник питания должен выдавать достаточно стабильное постоянное напряжение, а ИС допускают изменение питающего напряжения в определённых пределах, получим, что номинальное напряжение и допуск на напряжение питания ИС определяют допустимый диапазон вариаций напряжения, выдаваемого источником питания. Поскольку изменение напряжения во времени в частотной области отображаются сплошным спектром, цель разработчика сети питания состоит в том, чтобы достичь минимального изменения напряжения питания при максимальном токе потребления ИС. Именно это мы называем целевым импедансом Z_T :

$$Z_T = \frac{\text{Напряжение питания} \cdot \text{Допустимые пульсации}}{\text{Ток}}, \quad (2)$$

где уровень допустимых пульсаций задан как относительная величина. При этом значение напряжения источника питания, величина пульсаций и

ток потребления ИС берутся для наихудшего случая. Поскольку напряжение пульсаций и наибольший потребляемый ток могут быть достигнуты на любой, заранее неизвестной частоте, то целевой импеданс не зависит от частоты. На практике невозможно обеспечить частотно-независимый целевой импеданс, и это не является необходимостью из-за ограниченной скорости переключения ИС. Для конкретной разработки всегда задаётся максимальная частота f_{MAX} (см. рис. 3). Очевидно, что конструкция сети питания является хорошей, если импеданс, рассчитанный в соответствии с формулой (1), меньше или равен целевому во всех точках подсоединения контактов питания ИС и при любых частотах, меньших максимальной (см. рис. 4). На частотах выше f_{MAX} импеданс может превышать целевой (см. рис. 5), что позволяет минимизировать затраты.

Поскольку пульсации напряжения питания вызываются токами переключения всех подключённых к сети питания ИС, термин «ток» в формуле (2) соответствует в действительности суммарному изменению потребляемых токов, т.к. невозможно предсказать момент переключения отдельной ИС. С этой точки зрения оценка целевого импеданса в формуле (2) является песимистической. Другими словами, конструкция, основанная на требованиях к целевому импедансу, может быть неоптимальной.

ВЫВОДЫ ПИТАНИЯ ИС, ТОКОВЫЕ ПРОФИЛИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИМПЕДАНС СЕТИ ПИТАНИЯ

Если для простоты представить себе источник питания как комбинацию идеального источника напряжения и пассивной цепи, сеть питания от источника питания до выводов питания ИС можно рассматривать как линейную цепь. Эта цепь становится многопортовой линейной цепью, если учесть наличие нескольких ИС с собственными выводами питания, как показано на рисунке 6. На отличных от нуля частотах идеальный источник напряжения эквивалентен заземлению, так что все порты сети соответствуют выводам питания ИС. В реальности портами (тестовые точки 1 и 2 на рисунке 2) считаются конечные точки сети распределения питания, в которых должны обеспечиваться необходимые уровни напряжения. Как и в типовом случае, описываемом формулой (1), где узлы соответствуют выводам питания ИС, у этих портов имеется собственное сопротивление и внутреннее сопротивление многопортовой сети распределения питания, которые должны соответствовать критерию не превышения целевого импеданса.

Важно отметить, что импеданс сети питания определяется исключительно физической структурой сети и расположением портов в цепи передачи напряжения питания. Импеданс при этом рассчитывается так же, как для любой другой многопортовой линейной электрической цепи. При этом он является характеристикой самой сети питания и не зависит ни от напряжения источника питания, ни от тока потребления ИС. Именно по этой причине программы симуляции цепей питания не позволяют учитывать реальные токи потребления при расчёте импеданса.

Какова же роль тока потребления при анализе сетей питания? Потребляемый микросхемой ток можно разделить на две составляющие: постоянный и динамический ток потребления (или ток переключения). Постоянный ток обеспечивает микросхеме нормальные условия работы в статическом режиме, в то время как динамический ток потребления возникает только при переключении логических элементов в ИС. Мы будем в основном рассматривать динамическую составляющую тока потребления.

В высокоскоростных устройствах логические устройства обычно переключаются последовательно. Это означает, что полный ток переключения изменяется во времени, что с точки зрения сети питания означает подключение меняющегося во времени источника тока к одному или нескольким портам сети. Такие изменения тока вызывают соответствующие импульсы напряжения, распространяющиеся по сети питания, что отражается в изменении реального напряжения, которое поступает на выводы питания других переключающихся ИС.

Главный вопрос состоит в том, останутся ли в допустимых пределах изменения напряжения питания, если сеть питания соответствует требованиям целевого импеданса, а все временные профили токов потребления известны?

Ответ положительный при условии, что величина спектральных составляющих динамического тока потребления пренебрежимо мала для всех частот выше f_{MAX} . На рисунке 7 показан пример временной формы динамического тока потребления и соответствующий ему спектр.

Обозначим импеданс и спектральное представление динамического тока отдельного порта (вывода питания ИС) как $Zp(f)$ и $Ip(f)$. При этом величина спектральной составляющей напряжения может быть вычислена как $Vp(f) = Zp(f) \cdot Ip(f)$ при любой частоте f .

Форма напряжения во временной области $Vp(t)$ может быть получена путем применения к $Vp(f)$ обратного преобразования Фурье. Если для всех частот $f < f_{MAX}$ выполняются условия $Zp(f) < Z_T$ и $Ip(f) < I_{min}$, то $Vp(t)$ гарантированно будет меньше допустимого уровня пульсаций.

Описанный выше пример фактически показывает способ выбора максимальной частоты для определения целевого импеданса. Очень просто понять, почему: если отсутствуют существенные по величине спектральные составляющие с частотами выше f_{MAX} , не имеет смысла заботиться о малой величине импеданса в этой частотной области.

Итак, величина и форма тока потребления не оказывают влияния на импеданс сети питания, однако определяют верхний предел целевого импеданса для проектируемой сети питания.

Последним вопросом, связанным с током потребления, является то, где разработчик может отыскать реальные графики изменения тока потребления. Как уже говорилось ранее, динамический ток потребления соответствует изменяющейся мощности потребления ИС, состоящей из вычислительного ядра и узлов внешнего интерфейса. Учитывая, что у программ САПР и моделирования плат и узлов нет доступа к полным базам данных по ИС, а внутренняя структура микросхем в общем случае лежит за пределами их «разрешающей способности», наилучшим способом получения таких графиков является помощь со стороны производителей ИС, у которых обычно имеются инструменты для анализа



АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК
источники электропитания



Серия МАА



Одно- и трёхфазная входная сеть
Диапазон рабочих температур от - 40° С до +85° С
Параллельная работа до 10 кВт
Выносная обратная связь
Подстройка выходного напряжения
Гальваническая развязка выходов
Защита от КЗ и перенапряжения, тепловая защита
Дистанционное вкл/выкл
Приемка "5"

ООО "АЛЕКСАНДЕР ЭЛЕКТРИК источники электропитания"
 129226, Москва, пр-т Мира, 125,
 тел: (909)156-54-97, (499)181-19-20, (499)181-26-04
 факс: (916)950-87-53, тел/факс: (499)181-05-22
 e-mail: alecsan@aeip.ru www.aeip.ru

динамических токов потребления. К счастью, обычно производители ИС охотно предоставляют такую информацию разработчикам радиоаппаратуры.

ПАРАЗИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ИС И ИХ КОРПУСАХ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИМПЕДАНС СЕТИ ПИТАНИЯ

Все эти рассуждения относительно импеданса сети питания основывались на предположении, что цепи питания окан-

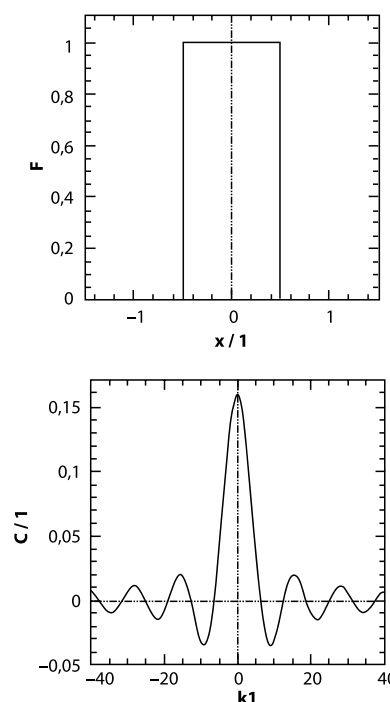


Рис. 7. Вариант формы импульса динамического тока и соответствующий ей спектр

чиваются на выводах корпусов типа BGA (в которых выводы корпуса совпадают с выводами кристалла ИС), припаянных к печатной плате. Однако в реальности в число компонентов на плате входят и установленные в другие типы корпусов микросхемы, а ИС в BGA-корпусах часто монтируются через переходные колодки. В результате цепи, связывающие кристалл с выводами корпуса, также входят в цепи передачи питания и являются частью проектируемой сети питания. В общем случае такие цепи чаще всего имеют индуктивный характер и вносят дополнительный импеданс. Если известна индуктивность выводов таких корпусов, то её следует учесть при расчёте включением соответствующей индуктивности последовательно с выводом питания. Недостатком такого метода является то, что при замене одного компонента другим с иным типом корпуса приходится производить перерасчёт импеданса сети питания. Наилучшим способом минимизации проблем в этом случае является наличие в составе программ анализа целостности питания опций, которые соответствуют используемым типам корпусов.

Помимо индуктивности выводов, на импеданс оказывает влияние внутрикристалльная ёмкость микросхем, которая вместе с внешними цепями питания может образовывать резонансные цепи. При анализе цепей питания такие паразитные ёмкости включаются параллельно соответствующему ИС источнику тока. Неудобства от этих ёмкостей точно такие же, как от индуктивности выводов, а решение данной проблемы так же основано на введении в САПР системы питания соответствующих опций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя целостность питания и является относительно новым понятием, заложенная в неё концепция на самом деле используется уже много лет. Обеспечение целостности питания гарантирует получение микросхемами адекватного питания и отсутствие дополнительных трудностей, связан-

ных с электромагнитной совместимостью. Важно отметить, что хорошая сеть питания — это сеть питания с импедансом, меньшим целевого. В любом случае, разработчики должны понимать следующее.

1. Анализ сети питания в действительности производится в частотной области.
2. Собственный импеданс сети питания и целевой импеданс являются частотно-зависимыми величинами.
3. Определение целевого импеданса представляет собой пессимистический критерий.
4. Профиль изменения тока потребления ИС не влияет на собственный импеданс сети питания, однако позволяет определить его верхнюю границу.
5. При анализе сети питания следует учитывать паразитные компоненты — индуктивность выводов питания и собственную ёмкость кристалла ИС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mu, Z., *Discussing impedance distribution with multiple stimulating sources in power distribution system design and simulation, EPEP2008, Oct. 2008.*
2. Smith, L. D., Anderson, R. E., Forehand, D. W., Pelc, T. J., and Roy, T., *Power distribution system design methodology and capacitor selection for modern CMOS technology, IEEE TRANS. Advanced Packaging, Vol. 22, No. 3, August 1999.*
3. Mu, Z., *Power delivery system: sufficiency, efficiency, and stability, IEEE International Symp. ISQED, March 2008.*
4. Chua, L. and Lin, P., *Computer aided analysis of electronic circuits: algorithms and computational techniques, Prentice-Hall, 1971.*
5. Mu, Z., *Simulation and modeling of power and ground planes in high speed PCB designs, IEEE International Symp. Circuits and Systems, May 2001.*
6. Wetmore, P., Wang, B., and Chua, F., *Simulation of ground bounce in multilayer packages and PCBs, EPEP1998, Oct. 1998.*
7. Davidson, E. E., *Electrical design of a high speed computer package, IBM J. RES. Develop. Vol. 26 No. 3, May 1982.*



ООО ПФ «Сфера СМД»

ВСТРАИВАЕМЫЕ БЛОКИ И МОДУЛИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

- AC/DC-преобразователи для работы от сетей ~220 В и 110/220 В
- DC/DC-преобразователи для работы от сетей =12, 24, 48 (60) и 110 В
- Выходные мощности — до 100 Вт
- Количество выходов — до 4-х
- Защита по входу и выходам

- Собственные разработки и производство
- Поставки от одной недели
- Блоки с нестандартными выходными напряжениями
- Гарантия — 2 года
- Соответствие стандартам РФ



111024, Москва,
ул. Авиамоторная, 51а
тел.: +7 (495) 735-4413,
+7 (916) 576-45-25
местный тел.: 450
E-mail: sales@sfera-smd.ru
http://www.sfera-smd.ru

Санкт-Петербург:
тел./факс: +7 (812) 297-35-38
E-mail: aam@mp36c.ru
http://mp36c.ru

НОВОСТИ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

| УТВЕРЖДЕН ЕДИНЫЙ СТАНДАРТ БЕСПРОВОДНЫХ ЗАРЯДНЫХ УСТРОЙСТВ |

Ассоциация Wireless Power Consortium (WPC) утвердила единый стандарт беспроводных зарядных устройств под названием Qi. Создание единого стандарта позволит увеличить количество ежегодно выпускаемых устройств со 100 тыс. до 100 млн. При этом WPC рассчитывает, что уже к 2014 г. рынок беспроводных «зарядок» вырастет в 70 раз.

Как сообщил председатель ассоциации Менно Треферс (Menno Trefers), разработка единого стандарта заняла полтора года. Первый продукт получил сертификацию по стандарту уже спустя месяц после его выхода».

О намерении выпустить соответствующие стандарту «зарядки» уже заявили компании Energizer и Sanyo. Так, Energizer представил устройство Inductive Charger. Оно поступит в продажу осенью 2010 г., с его помощью можно будет заряжать чехлы со встроенными аккумуляторами для смартфонов iPhone и BlackBerry. В свою очередь Sanyo анонсировала выпуск аккумуляторов, которые будут поддерживать беспроводную зарядку. О поддержке Qi заявили ведущие производители мобильных телефонов, в том числе Nokia и RIM.

В ассоциацию WPC входят более 55 компаний, занимающихся производством мобильных телефонов, портативной электроники и зарядных устройств. В дальнейшие планы ассоциации, которая была основана в 2008 г., входит разработка стандарта для более крупных устройств — ноутбуков и планшетных компьютеров.

www.russianelectronics.ru