

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФЕРРИТОВЫХ БУСИН В PDN-СХЕМАХ

АНДРЕЙ ГУСАК, инженер

Разработчики схем распределения электропитания (power distribution network, PDN) часто сталкиваются с задачами, которые превосходят по сложности проблемы, возникающие при проектировании высококлассных схем обеспечения целостности сигналов. Дело в том, что эти проблемы решаются с использованием большого накопленного опыта и стандартов, а схемы распределения питания стали разрабатываться на десяток лет позже.

Не стоит также забывать, что для успешного проектирования схемы распределения питания разработчикам часто приходится полагаться на информацию и рекомендации поставщиков используемых компонентов и микросхем. Одной из основных рекомендаций, относительно которой расходятся мнения даже бывалых профессионалов, является использование т. н. ферритовых бусин в PDN-схемах.

По крайней мере, существуют два разных лагеря со своими мнениями по этому вопросу. Представители первого из них категорически осуждают использование ферритовых бусин в схемах распределения питания, тогда как представители другого придерживаются противоположного мнения.

Специалисты, которые поддерживают использование ферритовых бусин в PDN-схемах, как правило, работают с микросхемами и компонентами определенного производителя. В свою очередь, разработчики, выступающие категорически против, относятся к более независимому контингенту. Скорее всего, они пытаются облегчить труд других пользователей и обеспечить должный уровень работоспособности создаваемых решений.

Однако, как это часто бывает в жизни, истина всегда находится где-то посередине – имеется третий лагерь разработчиков, колеблющихся между этими двумя противоположными мнениями. Быстрое развитие технологий и проектов в еще большей мере осложняет принятие верного решения, т. к. часто у разработчиков нет достаточного времени, чтобы разобраться в правильности применения ферритовых бусин в конкретном проекте.

На протяжении многих лет сложность электрических систем росла;

при этом часто использовались разные названия одного и того же компонента. Например, импульсные стабилизаторы независимо от типа преобразования (AC/DC, DC/DC или DC/AC) 10 лет тому назад назывались импульсными источниками питания, однако позже DC/DC источники питания стали называться DC/DC-преобразователями. Теперь подобные схемы и вовсе могут называться модулями стабилизаторов напряжения (voltage regulator module, VRM).

Для упрощения изложения, а также для разграничения принципиально разных способов снижения помех в схеме пассивную часть PDN-схемы, содержащей только байпасные соединенные параллельно конденсаторы, мы станем именовать параллельной PDN-схемой. В свою очередь, часть схемы распределения питания, содержащей последовательно соединенные катушки индуктивности, ферритовые бусины, резисторы или их комбинации назовем фильтром PDN.

Заметим, что участки дорожек, переходные отверстия и контакты

на печатных платах имеют некоторое сопротивление и индуктивность; в большинстве схем они рассматриваются как паразитные параметры, которые необходимо минимизировать. С другой стороны, эти элементы могут быть частью специально разработанных фильтров [1].

«Параллельную PDN» и «фильтр PDN» можно использовать для создания схем распределения питания. На рисунке 1 показана небольшая часть структурной PDN-системы, которая строится с помощью этих двух участков цепей на основе пассивных элементов. Такая схема предполагает размещение фильтра PDN на выходе стабилизатора напряжения (например, для подавления пульсаций при коммутации), однако фильтры PDN можно использовать на входной стороне DC/DC-преобразователя для снижения уровня шумов, поступающих в предшествующую распределительную сеть [2].

Схемы блоков на рисунке 1 показаны в упрощенном виде. В частности, вместо трех конденсаторов в блоке параллельной PDN-схемы может использоваться

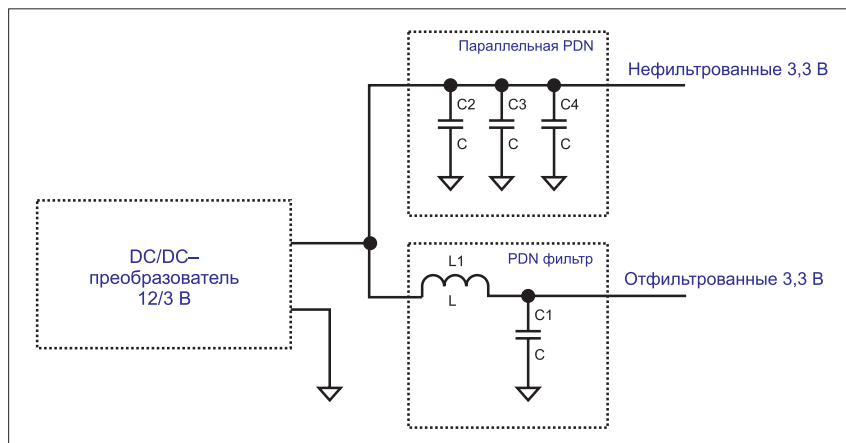


Рис. 1. Структурная схема PDN с параллельной схемой и фильтром

любое их количество с одинаковыми или разными емкостями. Схема фильтра PDN тоже может быть куда более сложной: например, иметь несколько резисторов, соединенных параллельно или последовательно с индуктивным элементом, а также дополняться на выходе параллельной PDN-схемой.

На рисунке 2 показана схема с детализованным блоком фильтра PDN с последовательно соединенной ферритовой бусиной. Эту схему можно использовать для питания осциллятора или генератора импульсов с потребляемым током в несколько миллиампер.

В случае построения этого фильтра на элементной базе компании Murata можно использовать: BLM21PG2215N1 в качестве ферритовой бусины L1 в корпусе 0805; GR5219R60J226ME47 в корпусе 0805 в качестве X5R-конденсатора C1 емкостью 22 мкФ с рабочим напряжением 6,3 В; GRM155R61H104ME14 в корпусе 0405 в качестве X5R-конденсатора C2 емкостью 0,1 мкФ с рабочим напряжением до 50 В.

Для этих компонентов были построены имитационные модели [3], в т. ч. зависимость от температуры и смещение при постоянном токе (DC bias). Благодаря моделям можно определить поведение схемы еще до построения фильтра, после чего провести дополнительные измерения уже на собранном образце. Однако перед началом симуляции необходимо установить, какие показатели в ходе измерений стоит учитывать.

Для фильтров, соединяющих высокомоощную шину с потребителем, чувствительным к изменениям тока, подходящим показателем является отношение входного и выходного напряжения [4]. Для симуляции необходимо

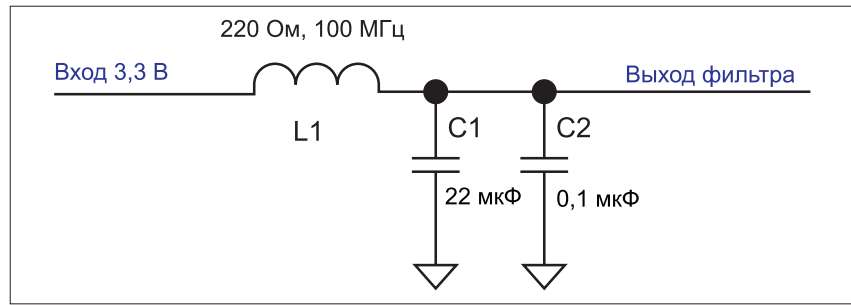


Рис. 2. Схема фильтра PDN с последовательно подключенной ферритовой бусиной

использовать источник напряжения для подачи питания на фильтр, однако источники с нулевым внутренним сопротивлением не существуют, и для получения точных результатов следует использовать т. н. анализатор частотных характеристик (frequency response analyzer). Этот прибор позволяет с большей точностью осуществлять измерения соотношения входных и выходных напряжений фильтра.

Результаты построения передаточной функции для фильтра на рисунке 2 показаны на рисунке 3.

Из графиков на рисунке 3 можно выделить две примечательные особенности. На левом графике показаны передаточные функции фильтра при напряжении питания 0 и 3,3 В. Как видно, наличие напряжения на конденсаторах и значение тока нагрузки, потребляемого генератором импульсов, могут изменять поведение передаточной функции.

В общем случае не следует беспокоиться о характеристике для нулевого значения напряжения питания, т. к. схема в рассматриваемом случае отключена. Однако различие между синей и красной кривыми свидетельствует о том, что без учета уровня смещения по напряжению и смещения при постоянном токе

результат измерений может оказаться некорректным. Например, при использовании фильтра на рисунке 2 на частоте 200 кГц сигнал ослабляется на 20 дБ, однако без смещения при постоянном токе оно достигло бы 30 дБ.

Вызывает некоторое беспокойство и наличие пика передаточной функции на частоте 57 кГц. Величина пика функции составляет около 14 дБ, что соответствует пятикратному усилению шума. Таким образом, вместо того чтобы уменьшить шум, этот фильтр увеличивает его в пять раз при работе на частоте около 57 кГц.

Можно, конечно, считать, что назначение фильтра заключается в подавлении пульсации выходного сигнала DC/DC-преобразователя и типичная частота коммутации превышает 200 кГц, однако широкополосный шум от преобразователя и шум от нагрузки, подключенной к шине, может возникнуть и на более низких частотах, включая 57 кГц. Пик передаточной функции (см. рис. 3) характерен для высокочастотных полосовых фильтров. Если подключить к выходу фильтра осциллограф, станут видны пульсации синусоидальной формы.

Из графика импеданса фильтра на рисунке 4 видно, что пик приходит-

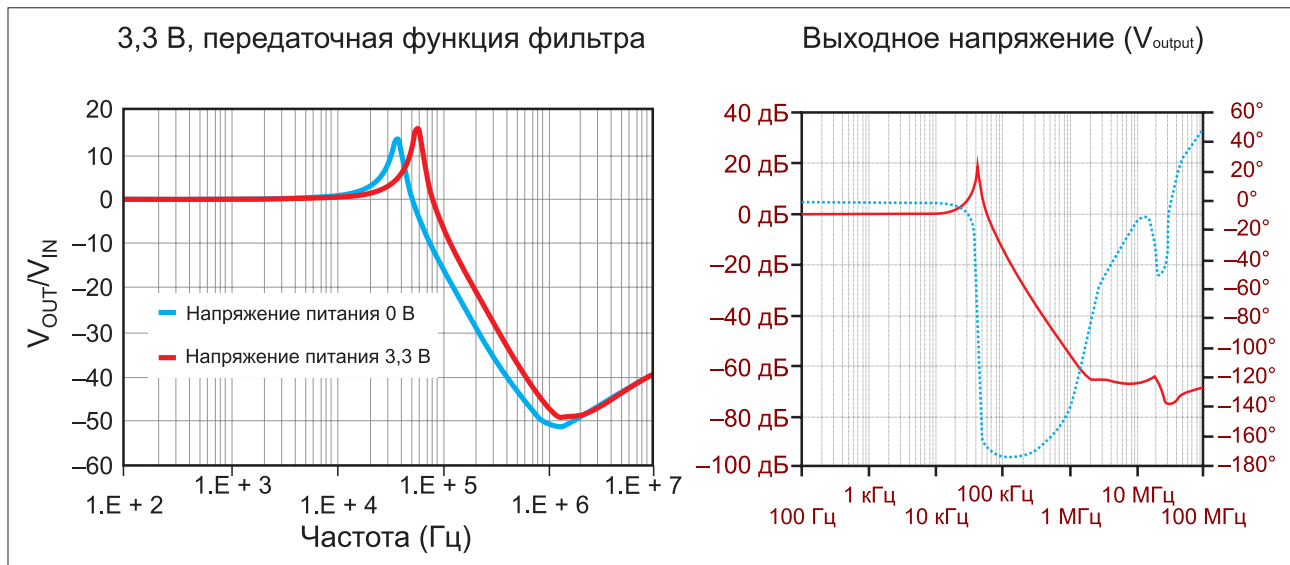


Рис. 3. Передаточная функция фильтра согласно: а) измеренным; б) смоделированным характеристикам напряжения

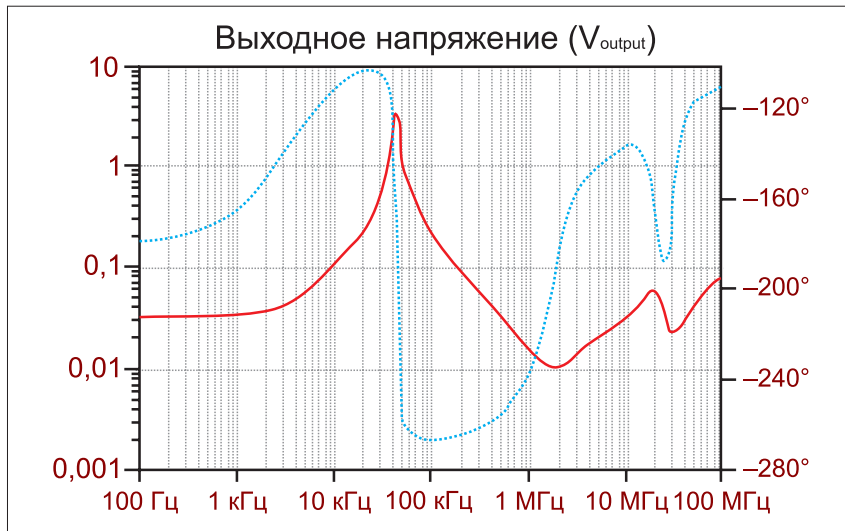


Рис. 4. Импеданс фильтра на рисунке 2

ся на ту же частоту, на которой наблюдался пик передаточной функции.

Ответ на вопрос о том, представляет пик импеданса какой-либо риск для системы и способен ли он оказать негативное воздействие, во многом зависит от характера нагрузки: если она ведет

себя «тихо» на тех частотах, на которые приходится пик импеданса, риски для системы отсутствуют. Примером такой нагрузки может послужить генератор импульсов без цифровой логики (например, аналоговый синтезатор). Однако пик передаточной функции все

еще рискует создать ненужные шумы на выходе, что может стать причиной более высокого джиттера, превышающего расчетный уровень.

Если наличие пика в передаточной функции или выходном сопротивлении фильтра все-таки имеет критичный характер для конкретной схемы, то следует добавить в нее демпфирующую цепочку. Ее построение осуществляется несколькими способами: можно, например, добавить на выход электролитический или танталовый конденсатор с высоким значением эквивалентного последовательного сопротивления (ESR). Чуть более сложный вариант состоит в последовательном подключении к керамическому конденсатору с номиналом 22 мкФ дополнительного резистора и индуктивности. В тех случаях, когда фильтры работают исключительно с малым током, уменьшить пик можно путем последовательного включения резистора на выходе.

Если же требуется не просто сгладить, но и полностью устранить пик в конкретном фильтре без использования последовательных элементов, проще всего

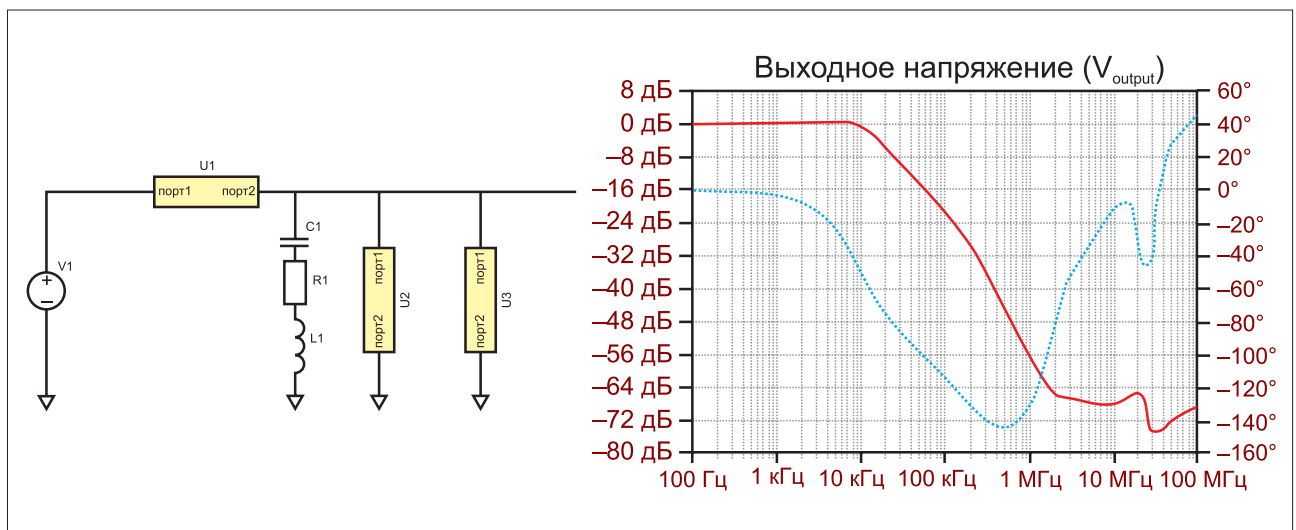


Рис. 5. Передаточная функция фильтра после добавления конденсатора емкостью 220 мкФ и ESR = 0,1 Ом

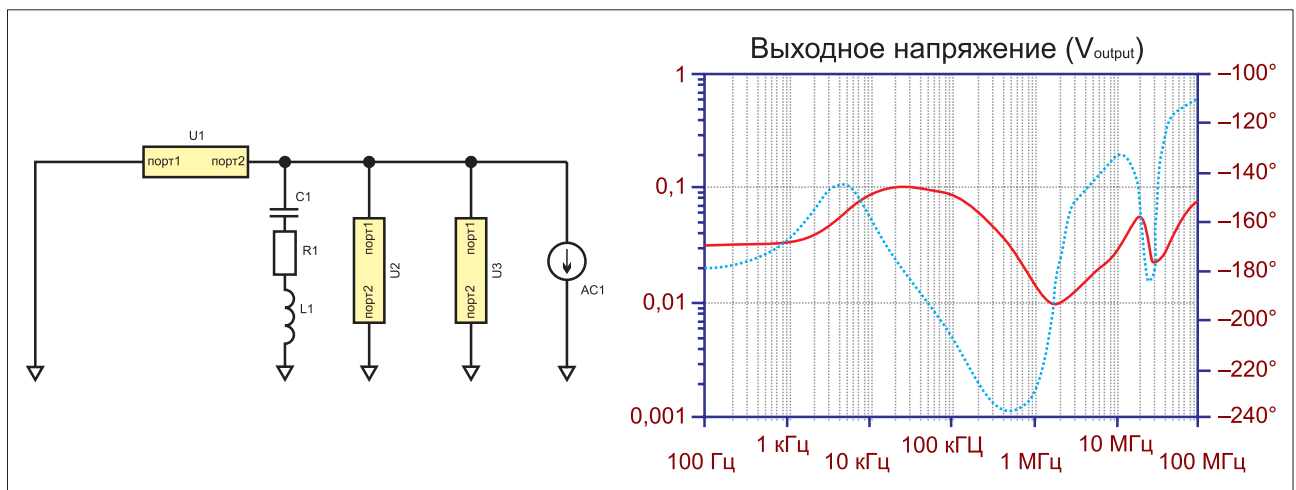


Рис. 6. Выходное сопротивление фильтра после добавления конденсатора емкостью 220 мкФ и ESR = 0,1 Ом

добавить отдельный конденсатор с малыми потерями. Хотя в среде LTspice параметры ESR и ESL конденсатора, как правило, указываются в качестве дополнительных, для большей ясности мы станем выделять эти составляющие на рисунках как отдельные компоненты.

На рисунке 5 показана SPICE-модель и передаточная функция фильтра после добавления в цепь танталового конденсатора емкостью 220 мкФ с $ESR = 0,1$ Ом. В левой части рисунка применяется источник питания, который подает питание в схему с фильтром. При постоянном напряжении питания передаточная функция фильтра и фазовая характеристика приобретают вид, показанный на рисунке 5б.

На рисунке 6 показана SPICE-модель и результат моделирования выходного сопротивления. Для построения графика изменения сопротивления на выходе фильтра необходимо замкнуть схему и подключить источник переменного тока к выходу. В результате, при значении тока 1 А напряжение равно величине выходного сопротивления. В общем случае, использование источника переменного тока с номиналом 1 А является довольно удобным способом имитации поведения импеданса в любой линейной сети.

Установив результат применения часто рекомендуемых ферритовых бусин, гораздо проще оценить точку зрения разработчиков, которые утверждают, что эти компоненты никогда не следует использовать в схемах распределения питания. В то же время возникает вполне закономерный вопрос, почему этот подход так часто предлагается в документациях производителей? Неужели схемы, построенные с использованием ферритовых бусин, не тестировались на реальных устройствах? Скорее всего, так и было: специалисты, пишущие документацию и создающие приложения для микросхем, часто не имеют возможности узнать, в каких именно приложениях эти микросхемы станут применяться. Кроме того, при производстве тестирование микросхем осуществляется, как правило, на оценочных платах или стендах, что устраняет большую часть внешних шумов и оставляет только шум собственно тестируемой схемой. Как следствие, если по результатам испытаний генерируемый в схеме шум мал, то, с точки зрения производителей, она будет нормально функционировать и в реальных условиях.

Этот вывод также подтверждается тем, что при корректном проектировании фильтра, т. е. при использовании дополнительных демпфирующих элементов он работает нормально. Кроме того, использование ферритовых бусин дает некоторые преимущества с точки зрения обеспечения гальванической изоляции, которые гораздо труднее было бы получить без этого индуктивного элемента.

Мы не рассмотрели другие преимущества, связанные с использованием ферритовых бусин вместо обычных индуктивностей. Эти преимущества касаются ослабления высокочастотных помех. Коэффициент ослабления бусин увеличивается с ростом частоты в большей степени, чем аналогичный параметр у обычных индуктивностей. Подробнее этот вопрос разобран в [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Alex Waizman etc. *Novel Isolation Scheme for Mitigating PDN Coupling*. DesignCon 2018.
2. C. Zhang. *Analysis and Design of Input Filter for DC-DC Circuit*. Texas Instruments Application Report. SNVA801. Nov. 2017.
3. Murata SimSurfing tool.
4. Istvan Novak. *How to Design Good PDN Filters*. DesignCon 2019.