

Фильтр электромагнитной совместимости для оптимизации импульсных DC/DC-контроллеров

Штефан КЛЯЙН (Stefan KLEIN),
Würth Elektronik eiSos

Обеспечить высокую эффективность современных импульсных источников питания можно, уменьшив потери их мощности, а также выполнив требования к плате и схеме, чтобы избежать появления напряжения радиопомех. В статье рассматривается последовательная реализация входных фильтров, позволяющих уменьшить симметричное напряжение помех в импульсных DC/DC-контроллерах.



Необходимость во входном фильтре

Импульсный источник питания любого типа создает излучение в широкой полосе частот в виде напряжения помехи и поле помех, которые затрудняют работу других электронных устройств. Главной причиной возникновения напряжения помехи заключается во входном токе, который протекает через входной конденсатор импульсного контроллера. Частота пульсации этого тока равна тактовой частоте контроллера. В результате возникает падение напряжения $V_{\text{пульс}}$ на эквивалентном последовательном сопротивлении (ESR).

Измерение напряжения помехи

Входной фильтр снижает амплитуду напряжения помехи, подавляет гармоники и играет важную роль в уменьшении напряжения радиопомех до приемлемого уровня. Например, общий стандарт EN61000-6-4 устанавливает предельное фактическое пиковое значение 79 дБмкВ на частоте 150 кГц. На современном рынке пассивных компонентов предлагается широкий ряд «готовых фильтров» с высокой вносимой потерей, например величиной 70–100 дБ. Однако эти значения редко достигаются на практике из-за того, что характеристики указанных фильтров измерялись в 50-Ом системе и импедансы источников питания отклоняются от заявленных значений. В таких случаях рекомендуется самостоятельно рассчитать фильтр.

Прежде всего, для проектирования входного фильтра следует определить тип помехи. Необходимо отличать шум в дифференциальном режиме от синфазного шума. Фильтр устанавливается на входе импульсного контроллера для подавления дифференциального шума. Уже на этапе разработки измерение

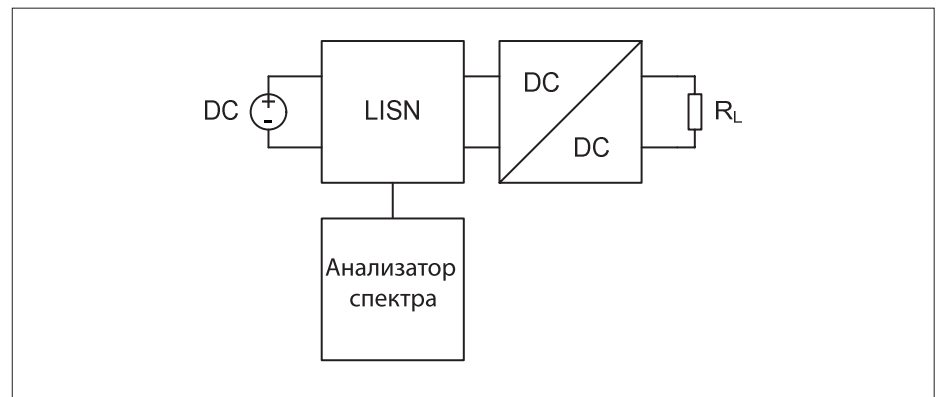


Рис. 1. Структурная схема испытательной установки

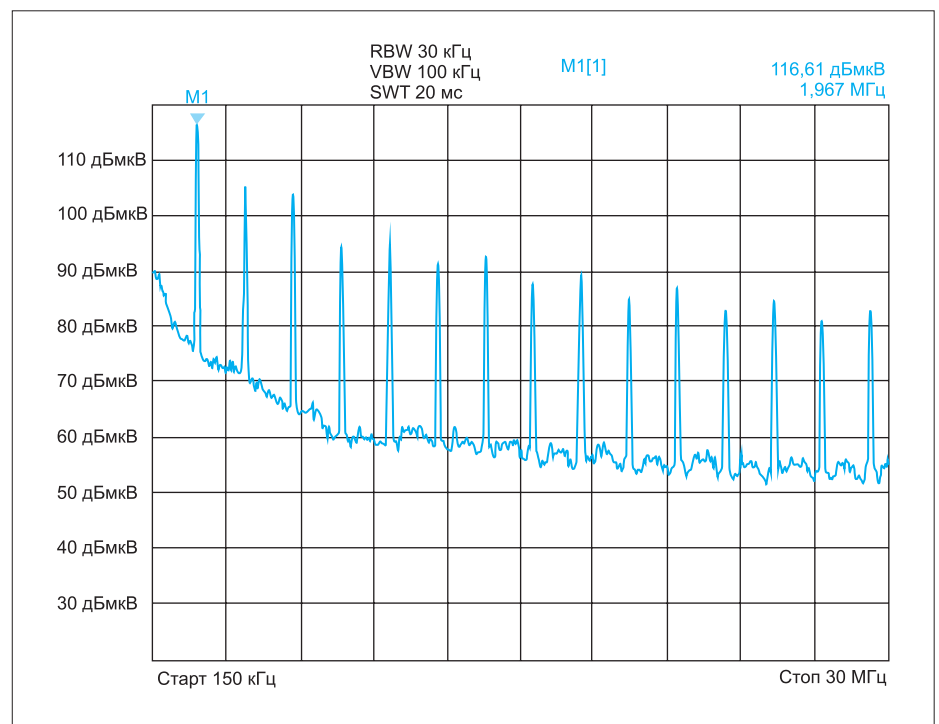


Рис. 2. Напряжение помехи в отсутствие входного фильтра

напряжения помехи можно осуществлять с помощью схемы стабилизации импеданса линии (LISN) и анализатора спектра. На рис. 1 показана упрощенная структурная схема испытательной установки для такого измерения. С ее помощью измеряются дифференциальные шумы, поскольку опорным потенциалом является земля переключающего силового каскада источника питания, а не опорное заземление.

Схема LISN осуществляет развязку напряжения сетевых помех от источника питания. Таким образом, все измеренные помехи создаются именно источником питания. Собственный фильтр нижних частот схемы LISN предотвращает перебои в работе других электронных устройств, которые питаются от источника питания общего пользования. На рис. 2 показаны результаты измерения напряжения помехи в единицах дБмкВ понижающего DC/DC-контроллера, который работает на частоте 2 МГц. Входное напряжение составляет 10 В, а эффективная величина входного тока – 0,7 А.

Величина напряжения помехи $V_{\text{ШУМ}}$ определяется следующим образом:

$$V_{\text{ШУМ}} = 20 \lg \left(\frac{V_{\text{ПУЛЬС}}}{1 \text{ мкВ}} \right), \text{ дБмкВ.}$$

На рис. 2 отчетливо видна амплитуда первой гармоники, соответствующей коммутационной частоте. Другие гармоники с частотой до 30 МГц спадают по амплитуде, но остаются выше предельного значения. При значении напряжения 116 дБмкВ у основной гармоники — наибольшая амплитуда. Исходя из этого, $V_{\text{ПУЛЬС}}$ можно определить следующим образом:

$$V_{\text{ПУЛЬС}} = 10^{\frac{V_{\text{ШУМ}}}{20}}, \text{ мкВ.}$$

Следовательно, $V_{\text{ПУЛЬС}} = 631 \text{ мВ}$. Это значит, что необходимо использовать входной фильтр.

Влияние управляющего контура

Давайте рассмотрим входной фильтр, подобранный для упомянутого выше импульсного контроллера. Фильтр низкой частоты состоит из катушки (WE-PD2, неэкранированная, $L = 1 \text{ мкГн}$, $\text{SRF} = 110 \text{ МГц}$, $R_{\text{DC}} = 49 \text{ мОм}$) и конденсатора (серия FK, электролитический, $C = 10 \text{ мкФ}$, $V = 35 \text{ В DC}$). Схема этого фильтра, установленного перед входным конденсатором контроллера импульсного DC/DC-преобразователя, показана на рис. 3.

Прежде всего, следует выбрать катушку фильтра с высокой собственной резонансной частотой (SRF), поскольку катушка, как правило, теряет свою фильтрующую способ-

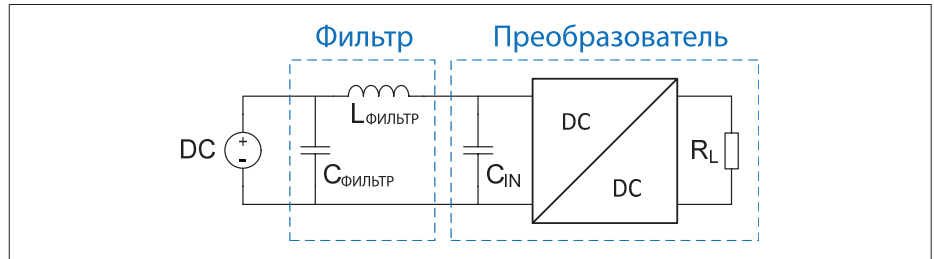


Рис. 3. Схема входного фильтра

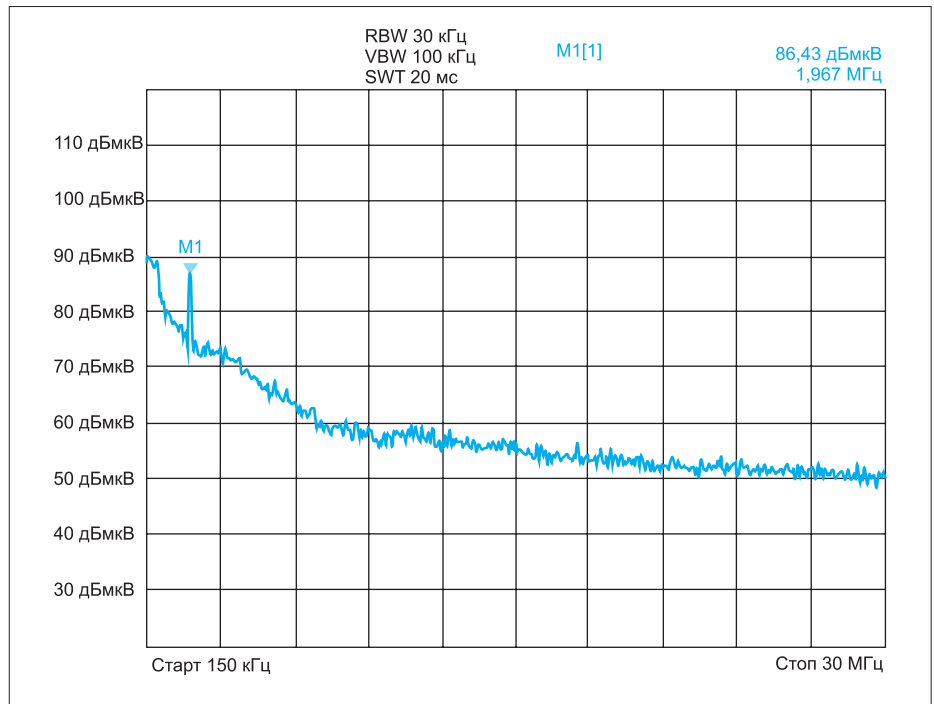


Рис. 4. Результаты использования фильтра на входе контроллера

ность при частотах выше резонансных из-за паразитной емкости. Во избежание насыщения сердечника катушки фильтра ее допустимый ток насыщения должен, по крайней мере, на 10% превышать пиковое значение входного тока. Рекомендуется, чтобы сопротивление резистора R_{DC} было как можно меньше, чтобы минимизировать падение напряжения по постоянному току. Значение индуктивности выбирается таким образом, чтобы частота среза фильтра составила 1/10 от частоты импульсного контроллера, т. е. намного отличалась от таковой частоты контроллера, чтобы ослаблялась большая часть первой и остальных гармоник. Поскольку при такой частоте среза на АЧХ фильтра возникает резонансный пик, превышающий допустимое значение, требуется обеспечить затухание фильтра.

Между значениями частот среза фильтра и импульсного контроллера должна быть достаточно большая разница, чтобы обеспечить устойчивую работу контура контроллера. В случае совпадения этих частот возникают колебания на входе контроллера, и он утрачивает способность быстро реагировать на изменения выходного напряжения, что обусловлено

наличием отрицательного входного сопротивления контроллера. Теоретически, для этого устройства должно выполняться равенство между поступающей и выходной мощностью. Это значит, что при постоянных начальных условиях, в которых находится контроллер, входной ток $I_{\text{ВХ}}$ уменьшается с увеличением входного напряжения $V_{\text{ВХ}}$. Этот эффект объясняется наличием отрицательного входного сопротивления $Z_{\text{ВХ}}$, что приближенно выражается следующим соотношением из анализа больших сигналов:

$$Z_{\text{ВХ}}(\text{DC}) = - \frac{V_{\text{ВХ}}^2}{V_{\text{ВХ}} \cdot I_{\text{ВХ}}}$$

Благодаря компонентам импульсного контроллера, величина которых зависит от частоты, входное сопротивление динамично меняется, и потому требуется анализ малых сигналов. На практике рекомендуется, чтобы импеданс входного фильтра $Z_{\text{ФИЛЬТР}}$ был намного меньше входного импеданса контроллера $Z_{\text{ВХ}}$: $Z_{\text{ФИЛЬТР}} \ll Z_{\text{ВХ}}$.

Поскольку, как правило, катушка фильтра не излучает электромагнитное поле, мы выбрали неэкранированную модель WE-PD2.

При выборе емкости фильтра следует убедиться, что максимальная допустимая величина рабочего напряжения на емкости фильтра примерно на 25% больше напряжения питания, поскольку номинальное напряжение у всех конденсаторов по тем или иным причинам уменьшается. С увеличением напряжения величина емкости и, следовательно, эффективность фильтра, уменьшается в зависимости от диэлектрика. Чтобы собственная резонансная частота была большой, рекомендуется выбирать малые значения эквивалентной последовательной индуктивности (ESL). В качестве исключения в рассматриваемом случае можно задействовать высокое значение ESR, выбор которого намеренно уменьшает добротность Q фильтра и ослабляет резонансный пик фильтра низких частот.

Рекомендуется выбрать относительно большую емкость фильтра и малую индуктивность, т. к. при большей индуктивности уменьшается собственная резонанс-

ная частота. Для фильтра следует выбрать электролитический конденсатор. Во избежание рассогласования импедансов требуется правильно разместить элементы фильтра. Поскольку из-за входного конденсатора входной импеданс импульсного контроллера становится меньше импеданса источника питания, катушка фильтра устанавливается между источником и входным конденсатором контроллера. Конденсатор фильтра устанавливается за катушкой индуктивности параллельно источнику питания. Катушка фильтра препятствует протеканию тока пульсации, а конденсатор фильтра шунтирует напряжение помехи на землю. На рис. 4 показан результат измерения напряжения помехи при использовании дополнительного входного фильтра.

Использование катушки WE-PD2 и конденсатора фильтра дало отличный результат даже при сравнительно малых значениях индуктивности (1 мкГн) и емкости величиной 10 мкФ. Амплитуда основной гармоники стала

меньше на 30 дБ. Амплитуды гармоник более высоких порядков не видны из-за шума окружающей среды. Величину индуктивности катушки WE-PD2 можно увеличить, чтобы в еще большей мере подавить гармоники во всем диапазоне частот. Дальнейшая регулировка фильтра позволяет повысить вносимую потерю более чем на 40 дБ.

Выводы

Входной фильтр незаменим. Его наличие следует учитывать уже на стадии проектирования. Помехи в дифференциальном режиме подавляются на входе импульсного DC/DC-контроллера с помощью LC-фильтра, который уменьшает напряжение помехи до приемлемого уровня. Если входной фильтр корректно рассчитан и его пассивные элементы правильно рассчитаны, можно добиться наибольшей вносимой потери, сохранив устойчивую работу импульсного контроллера. ■

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 9'2018