# ЭМП-ФИЛЬТРЫ ДЛЯ КОНТРОЛЛЕРОВ ИМПУЛЬСНЫХ DC/DC ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

**СТЕФАН КЛЯЙН (STEFAN KLEIN) И РАНЖИТ БРАМАНПАЛЛИ (RANJITH BRAMANPALLI)**, инженеры, Wurt Electonik

***Чтобы обеспечить высокую эффективность, потери мощности у современных источников питания (ИП) должны быть невелики. Современные импульсные ИП и контроллеры импульсных DC/DC источников питания обеспечивают высокую эффективность, но если используемая схема и топология печатной платы не отвечают строгим требованиям, напряжение радиопомех может вырасти. В статье обсуждается реализация входных и выходных фильтров, позволяющих уменьшить помехи в DC/DC-преобразователях ИП.***

## НЕОБХОДИМОСТЬ ВО ВХОДНОМ ФИЛЬТРЕ

Любой импульсный источник питания создает радиопомехи, которые препятствуют нормальному функционированию других электронных устройств. Одной из главных причин возникновения напряжения помех является входной ток, который протекает через входную емкость контроллера импульсного ИП. При этом на эквивалентном последовательном сопротивлении (*ESR*) возникает падение напряжения. Таким образом, напряжение пульсации $V_{RIPPLE}$ конденсатора складывается из падения напряжения на емкости и на *ESR* конденсатора.

## ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПОМЕХ

Входной фильтр уменьшает амплитуду напряжения помех, подавляет гармонические составляющие и играет важную роль в уменьшении напряжения радиопомех до приемлемого уровня. Например, согласно стандарту EN61000–6-4 предельное значение пикового напряжения на частоте 150 кГц составляет 79 дБмкВ. На рынке пассивных компонентов предлагается широкий ассортимент фильтров с высокими вносимыми потерями, например в диапазоне 70–100 дБ. Однако на практике заявленные значения редко достигаются, т. к. потери этих фильтров измеряются при 50-Ом нагрузке, а импедансы источников питания отклоняются от указанных величин. Таким образом, возникает необходимость в разработке фильтров, отвечающих потребностям реальных приложений.

Прежде всего, следует определить тип проектируемого входного

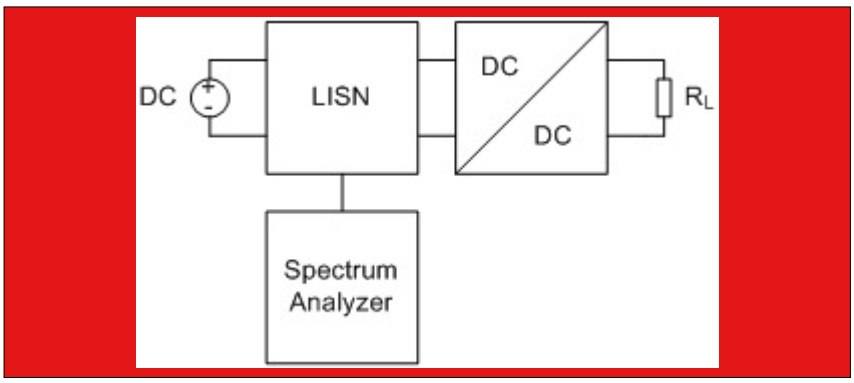


Рис. 1. **Схема для испытаний**

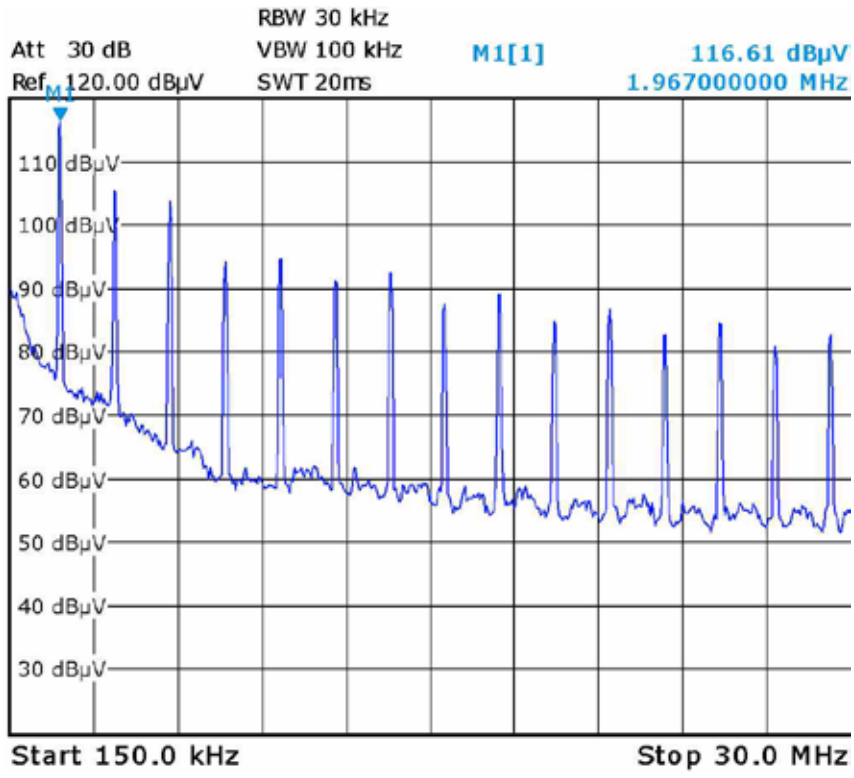


Рис. 2. **Напряжение помех в отсутствие входного фильтра**

фильтра с учетом разницы между дифференциальным и синфазным шумом. Для подавления дифференциального шума фильтр устанавливают на вход импульсного контроллера. Еще на этапе проектирования фильтра напряжение помех можно измерять с помощью схемы стабилизации импеданса линии (LISN) и анализатора спектра. На рисунке 1 показана применяемая в таких случаях схема испытаний. С ее помощью измеряются дифференциальные шумы, т. к. опорным напряжением является потенциал земли импульсного ИП, а не шина заземления.

Схема LISN служит для развязки переменного напряжения помех. Внутренний фильтр нижних частот LISN-схемы предотвращает сбои в работе других электронных устройств, которые подключены к общему источнику питания. На рисунке 2 показана осциллограмма напряжения помех $V_{NOISE}$ (дБмкВ) понижающего DC/DC-контроллера, который работает на коммутационной частоте 2 МГц; входное напряжение составляет 10 В, а эффективное значение входного тока равно 07 А.

Величина напряжения помех $V_{NOISE}$ определяется следующей формулой:

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

Из рисунка 2 видно, что основная гармоника соответствует частоте переключения. Амплитуда гармоник в верхнем мегагерцовом диапазоне становится меньше, но все-таки превышает пороговую величину. При 116 дБмкВ у основной гармоники – максимальная амплитуда. Таким образом, $V_{RIPPLE}$ можно определить следующим образом:

$$V_{RIPPLE} = \left(10^{V_{NOISE}/20}\right)\cdot 1\ \text{мкВ}.$$

Поскольку $V_{RIPPLE}$ = 631 мВ, это значит, что на входе требуется фильтр.

## ВЛИЯНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО КОНТУРА

Далее мы обсудим работу входного фильтра, который используется в упомянутом выше контроллере импульсного источника питания. Фильтр нижних частот состоит из дросселя (WE-PD2, неэкранированный, $L$ = 1 мкГн, собственная резонансная частота (*SRF*) =110 МГц, $R_{DC}$ = 49 мОм) и электролитического конденсатора (серия FK, $C$ = 10 мкФ, $U$ = 35 В DC). Фильтр установлен перед входным конденсатором контроллера импульсного DC/DC источника питания (см. рис. 3).

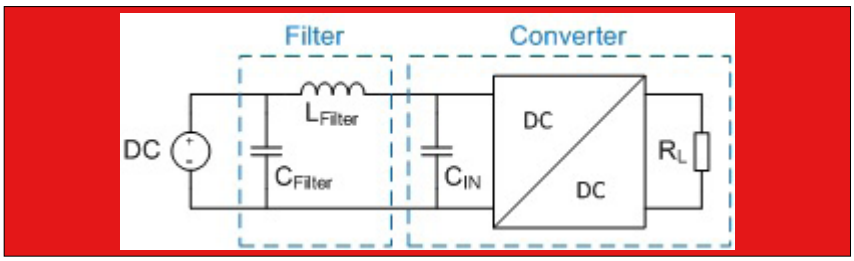


Рис. 3. **Схема фильтра**

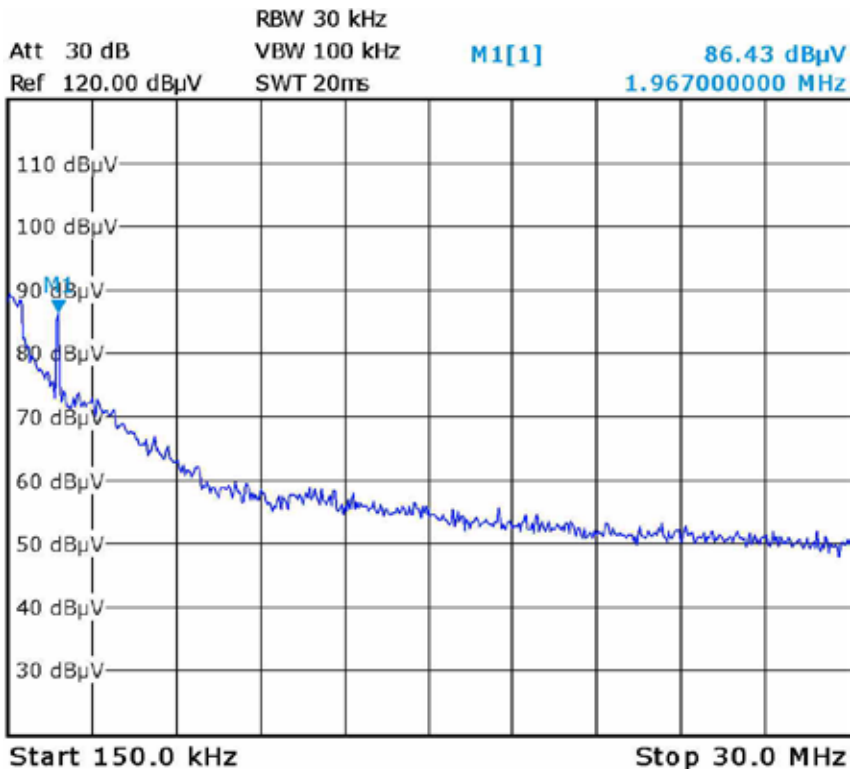


Рис. 4. **Результат использования входного фильтра**

Прежде всего, следует выбрать собственную резонансную частоту дросселя, поскольку он теряет фильтрующую способность в верхнем частотном диапазоне из-за паразитной емкости. Во избежание насыщения сердечника его допустимый ток должен превышать пиковый ток на входе, по крайней мере, на 10%. С этой целью рекомендуется использовать резистор $R_{DC}$, который позволяет минимизировать падение постоянного напряжения. Далее выбирается величина индуктивности с учетом того, что частота среза фильтра равна 1/10 от значения коммутационной частоты контроллера, т. е. намного меньше частоты среза импульсного контроллера, благодаря чему ослабляется амплитуда основной и большей части других гармоник. Поскольку у высококачественного фильтра резонанс имеет ярко выраженный характер, этот эффект необходимо ослабить.

Чтобы обеспечить стабильную работу контура контроллера импульсного источника питания, необходимо разнести рабочую частоту преобразователя и резонансную частоту фильтра. При совпадении этих частот на входе контроллера появляются колебания, из-за которых он теряет способность быстро менять величину входного напряжения. Причина такого поведения – в отрицательном входном сопротивлении контроллера импульсного ИП. Теоретически, равенство $P_{OUT} = P_{IN}$ применимо и к контроллеру. Это значит, что при неизменных начальных условиях входной ток контроллера $I_{IN}$ уменьшается с увеличением входного напряжения $U_{IN}$, что обусловлено наличием отрицательного входного сопротивления контроллера $Z_{IN}$:

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

Поскольку это соотношение получено на основе анализа больших сигналов, а в контроллере импульсного ИП используются зависящие от частоты компоненты, величина входного сопротивления является динамической, и потому требуется анализ поведения

системы при малых сигналах. Рекомендуется, чтобы выходной импеданс входного фильтра $Z_{FILTER}$ был намного меньше входного импеданса контроллера $Z_{IN}$: $Z_{FILTER}<<Z_{IN}$.

Поскольку в большинстве случаев использование этого фильтра не приводит к возникновению электромагнитных полей, можно в качестве примера выбрать неэкранированный фильтр WE-PD2.

При определении емкости фильтра следует исходить из того, что максимальная допустимая величина рабочего напряжения конденсатора фильтра приблизительно на 25% выше напряжения питания, поскольку у всех конденсаторов со временем номинальное напряжение снижается. По мере увеличения напряжения величина емкости и, следовательно, эффективность фильтра уменьшается, что зависит от используемого диэлектрика. Чтобы собственная резонансная частота была высокой, рекомендуется, чтобы его эквивалентная последовательная индуктивность (*ESL*) была небольшой. В качестве исключения можно воспользоваться *ESR* большой величины, т. к. это позволяет уменьшить добротность фильтра и ослабить перерегулирование на частотах близких к резонансной.

Рекомендуется, чтобы емкость фильтра была относительно велика, а индуктивность мала, т. к. при относительно высокой индуктивности частота собственного резонанса уменьшается. Лучшим выбором в качестве конденсатора для фильтра является электролитический конденсатор. Во избежание рассогласования импедансов необходимо правильно установить элементы фильтра. Из-за наличия входного конденсатора входной импеданс контроллера меньше, чем у импульсного источника питания, и потому дроссель фильтра следует установить между ИП и входным конденсатором контроллера. Таким образом, конденсатор фильтра подключается после дросселя параллельно источнику питания. Дроссель фильтра сглаживает ток пульсаций, а конденсатор фильтра шунтирует напряжение помех. На рисунке 4 представлены результаты измерения напряжения помех при использовании дополнительного входного фильтра.

Дроссель фильтра WE-PD2 и его конденсатор обеспечили отличное подавление помех даже при малых значениях индуктивности 1 мкГн и емкости 10 мкФ. Амплитуда основной гармоники уменьшилась на 30 дБ, а амплитуды более высоких порядков исчезли в фоновом шуме. Величину индуктивности фильтра WE-PD2 можно повысить, чтобы добиться большего затухания. В конце концов, можно сделать так, чтобы вносимые потери фильтра превысили 40 дБ.

Таким образом, без входного фильтра не обойтись, а его параметры рассчитываются на этапе разработки приложения. Дифференциальные помехи подавляются LC-фильтром в контроллере DC/DC импульсного источника питания, а напряжение помех можно уменьшить до приемлемого уровня. Хорошо рассчитанный входной фильтр и правильно подобранные пассивные элементы фильтра обеспечивают большие вносимые потери. При этом сохраняется устойчивое функционирование контроллера импульсного источника питания.

## ТРЕБОВАНИЯ К ВЫХОДНОМУ ФИЛЬТРУ

В выходном напряжении импульсных ИП присутствуют остаточные пульсации, которые влияют на работу электронных устройств и вызывают электромагнитные помехи. Для нейтрализации помех применяются выходные фильтры, которые при определенных условиях влияют на управляющий контур.

Чтобы компенсировать влияние выходного фильтра и связанные с этим потери выходной мощности на элементах фильтра требуется компенсация этого контура. Какая бы схема контроллера импульсного ИП ни использовалась, в выходном токе присутствуют нежелательные остаточные пульсации, которые возникают из-за паразитного сопротивления ESR и паразитной индуктивности ESL выходного конденсатора. Величина относительно большой остаточной пульсации, сигналы которой принимают разную форму, зависит от типа выбранного конденсатора. Например, при использовании стандартного электролитического конденсатора возникает пульсация напряжения величиной до нескольких сотен мВ в зависимости от выходного напряжения контроллера импульсного ИП.

При использовании керамического конденсатора напряжение остаточной пульсации составляет всего несколько десятых мВ. Некоторым аналоговым и ВЧ-системам требуется стабильное сглаженное напряжение питания без помех. При этом не следует пренебрегать высокочастотной составляющей гармонических колебаний в выходном напряжении, т. к. из-за нее может вырасти уровень электромагнитного излучения.

Выходной фильтр может ослабить остаточные пульсации и высокочастотные составляющие.

## ОСЛАБЛЕНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ

На практике для ослабления остаточных пульсаций до уровня в несколько мВ и подавления высокочастотных компонентов применяется, как правило, LC-фильтр нижних частот. На рисунке 5 показана схема такого фильтра, который можно реализовать с помощью неэкранированного дросселя WE-PD2 и стандартного электролитического конденсатора.

Если помехи должны полностью отсутствовать на выходе, наряду с LC-фильтром нижних частот применяется ФНЧ во втором каскаде (см. рис. 6). Недорогой двухкаскадный фильтр можно реализовать с помощью дросселя WE-PD2 и SMD-феррита серии WE-MPSB.

Компоненты $L_{FILTER}$ и $C_{FILTER1}$ работают как ФНЧ, который фильтрует сигнал тактовой частоты контроллера импульсного ИП и подавляет гармонические колебания. Далее ВЧ-составляющие выходного напряжения контроллера преобразуются в тепло с помощью ферритовой бусины SMD, а $C_{FILTER2}$ ослабляет их амплитуду. Выходной фильтр этого типа уменьшает величину остаточной

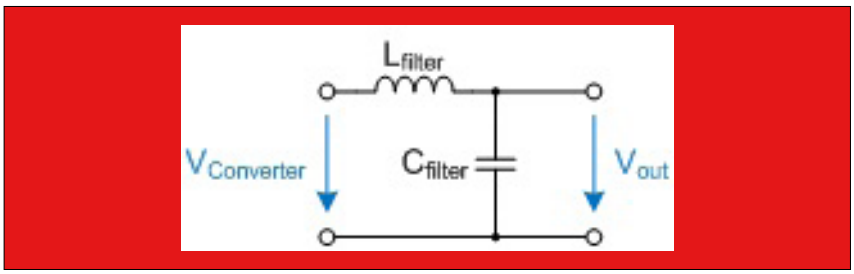


Рис. 5. **Простая схема фильтра нижних частот**

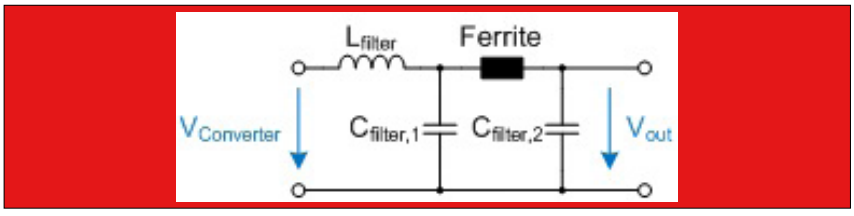


Рис. 6. **Двухкаскадный выходной фильтр**

пульсации до нескольких мВ и обеспечивает питание даже чувствительных аналоговых цепей.

### ПРЯМЫЕ ПОТЕРИ ПО ТОКУ НА ВЫХОДНОМ ФИЛЬТРЕ

Помимо потерь выходной мощности из-за импульсного контроллера большие потери выходной мощности по постоянному току возникают на выходном фильтре, что приводит к снижению эффективности контроллера импульсного источника питания. Из-за сопротивления $R_{DC}$ дросселей и ферритов возникает значительное падение напряжения на выходном фильтре и, соответственно, уменьшается выходное напряжение (см. рис. 7).

В зависимости от размеров дросселя сопротивление $R_{DC}$ может принимать разные значения в диапазоне от нескольких мОм до нескольких Ом, что, разумеется, не может не сказываться на величине выходного тока. Даже у сильноточного SMD-феррита значение сопротивления $R_{DC}$ может достигать 0,04 Ом. Чтобы поддерживать требуемое напряжение, выходное напряжение подается через обратную связь с делителя напряжения на ИС контроллера. Чтобы уменьшить потери выходного напряжения, обусловленные выходным фильтром, его можно установить в управляющий контур (см. рис. 8).

### СТАБИЛЬНОСТЬ УПРАВЛЯЮЩЕЙ СХЕМЫ

Дроссель фильтра, феррит и конденсаторы фильтра вызывают нежелательный фазовый сдвиг, из-за которого нарушается стабильность функционирования управляющей схемы. В результате этого сдвига уменьшается амплитуда и запас устойчивости по фазе. В крайних случаях работа схемы становится нестабильной, и возникают колебания выходного напряжения. Чтобы обеспечить устойчивое функционирование необходимо, чтобы запас по амплитуде превышал 12 дБ, а по фазе – 45°. Управляющая схема считается динамически устойчивой, если коэффициент обратной связи (КОС) падает до 0 дБ до того, как соответствующий фазовый сдвиг составит –180°. При этом амплитудная характеристика КОС должна пересечь ось x, т. е. принять значение 0 дБ при наклоне 20 дБ/декаду. На рисунке 9 показана диаграмма Боде устойчивого понижающего преобразователя. В этом примере запас по амплитуде равен 32 дБ, а по фазе – 56°.

Если выходной фильтр не отвечает критериям устойчивой работы импульсного преобразователя, требуется компенсация управляющего контура, которая обеспечит стабильность выходного напряжения.

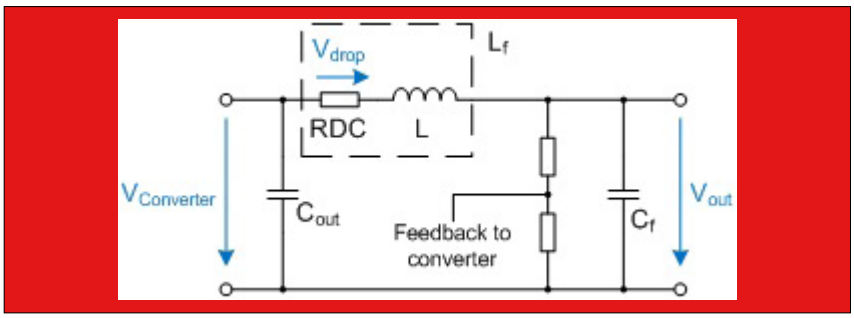


Рис. 7. **Падение напряжения на индуктивности фильтра**

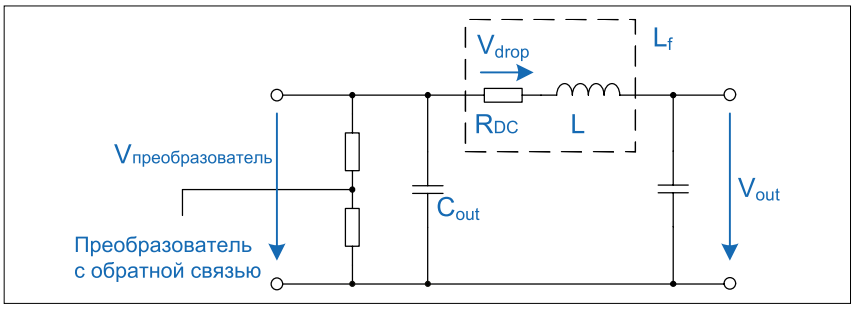


Рис. 8. **Реализация выходного фильтра в управляющей цепи**

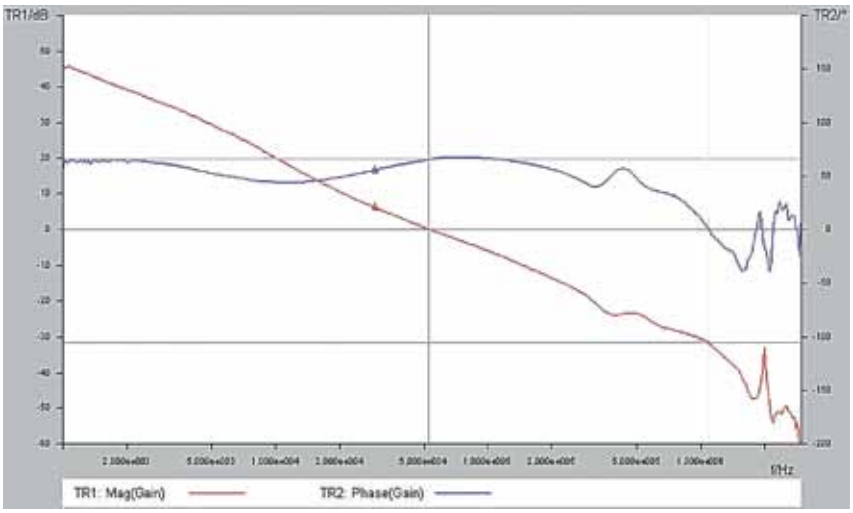


Рис. 9. **Диаграмма Боде устойчивого импульсного контроллера**

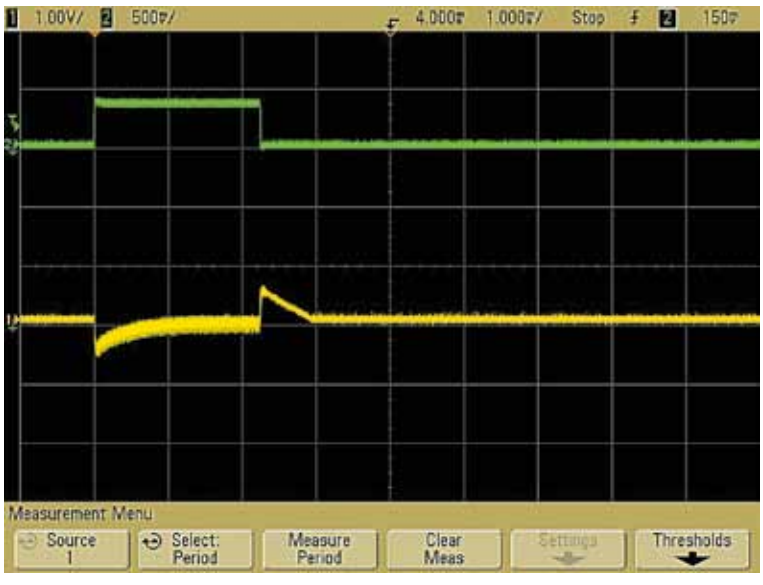


Рис. 10. **Переходная характеристика устойчивого импульсного контроллера**

## ПЕРЕХОДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Выходное напряжение должно оставаться стабильным при изменениях напряжения на входе импульсного преобразователя. Аналогично, в случае внезапного снижения или повышения выходного тока выходное напряжение должно быть быстро отрегулировано. На рисунке 10 показана переходная характеристика импульсного контроллера с регулируемой устойчивостью (кривая желтого цвета) с выходным напряжением 5 В при внезапном изменении нагрузочного тока с 0 до 1 А (зеленая кривая).

При внезапном изменении нагрузочного тока управляющая схема должна быстро скорректировать выходное напряжение до заданного уровня. Выходное напряжение не должно значительно меняться в результате отклика на скачок – иначе из-за перенапряжения могут повредиться электронные цепи. В идеальном случае после скачка нагрузки выходное напряжение быстро корректируется до установленной величины; при этом отсутствуют выбросы и даже звон. Звон на этапе компенсации обусловлен нестабильной работой импульсного преобразователя. Функционирование контроллера импульсного ИП считается устойчивым, если он достаточно быстро реагирует на скачкообразное изменение нагрузки и своевременно компенсирует это изменение.

## ВЫВОДЫ

Итак, если выходной фильтр установлен в управляющем контуре, его характеристическое уравнение имеет 2-й порядок или выше, что зависит от типа фильтра. Цепь компенсации должна иметь не меньший порядок, что приводит к увеличению инерционности управляющего контура. Таким образом, не рекомендуется включать выходной фильтр в управляющий контур. Выходное напряжение преобразователя следует снимать до выходного фильтра.

Целесообразно также выбирать дроссели фильтра и ферриты с наименьшими сопротивлениями $R_{DC}$, чтобы уменьшить потери в выходном фильтре.