

Синфазные дроссели

В некоторых приложениях, бывает крайне нежелательно иметь конденсаторы блокирующие изоляционный барьер, то есть иметь элементы, установленные между общими шинами первичной и вторичной цепей. Например, медицинское оборудование имеет строгие требования по ограничению тока утечки, который может быть превышен, имея мы такой путь с низким импедансом через изоляционный барьер для высоких частот. В этих случаях необходимо использовать специальный синфазный дроссель (англ. Common Mode Choke). Особенностью такого дросселя является то, что он имеет две обмотки, намотанные в противоположных направлениях (рис.15).

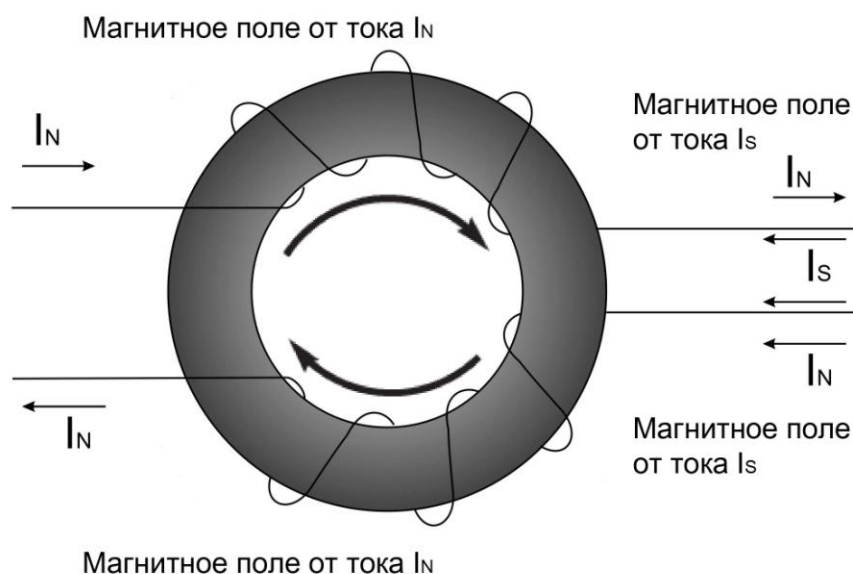


Рисунок 15. Принцип работы синфазного дросселя

Благодаря наличию противофазных обмоток, синфазные токи I_S , будут генерировать разностный магнитный поток в сердечнике, поскольку они текут в одном направлении. Таким образом, возникающий при этом импеданс эффективно гасит синфазные составляющие тока. Асинхронные, дифференциальные токи, проходя через дроссель, формируют возвращаемые токи I_N , который не производят разностный магнитный поток и, следовательно, они в таком дросселе не затухают. Такой подход обладает существенным преимуществом. Оно заключается в том, что сердечник дросселя не входит в насыщение даже при наличии очень больших дифференциальных токов, поэтому для подавления синфазных составляющих в синфазных дросселях могут быть использованы сердечники с высокой магнитной проницаемостью без риска перегрева из-за прохождения через него дифференциальных составляющих общего тока.

На рис.16 показано как синфазный дроссель используется для фильтрации выходного напряжения в DC/DC преобразователях. Одна обмотка дросселя включена последовательно в цепи выходного напряжения V_{OUT+} , а другая обмотка - последовательно в цепи возвратного тока V_{OUT-} . Импеданс синфазного дросселя выбирается с учетом того, чтобы его максимум попал в область спектра синфазных помех с самой большой мощностью, как правило, она лежит в диапазоне частот 10 – 100 МГц. Но, в общем случае, из-за высокой проницаемости материала сердечника синфазные дроссели, эффективно подавляют синфазные помехи и шумы в более широком диапазоне частот.

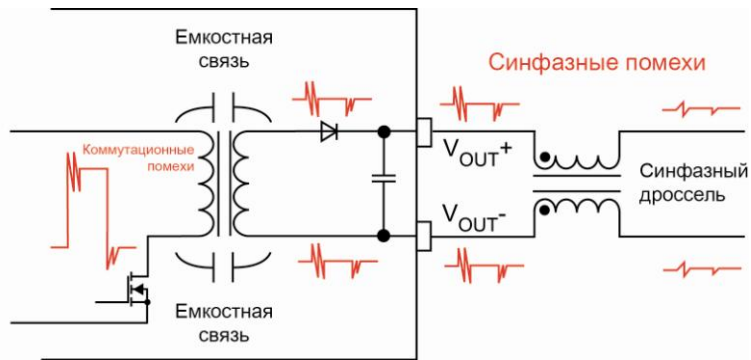


Рисунок 16. Использование синфазного дросселя в качестве выходного фильтра DC/DC преобразователя

Принцип подавления помех с использованием синфазного дросселя может быть использован и для преобразователей с двуполярным выходом. В таких преобразователях синфазные шумы и помехи появляются одновременно на всех трех его выходах и их весьма сложно отфильтровать при помощи стандартных синфазных дросселей с двумя обмотками. Решение заключается в использовании синфазного дросселя с тремя обмотками. Полезным побочным эффектом такого синфазного дросселя с тремя обмотками является то, что он также может быть использован для фильтрации дифференциальных шумов и помех путем добавления двух дополнительных конденсаторов.

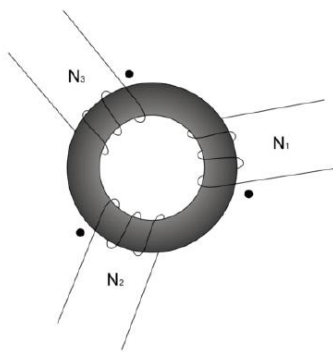


Рисунок 17. Синфазный дроссель с тремя обмотками

Три обмотки такого дросселя намотаны на сердечнике отдельно и отделены друг от друга. Это необходимо, чтобы достичь некоторого приемлемого уровня индуктивности рассеивания L_S между обмотками. При выборе материала сердечника важно иметь высокую магнитную проницаемость, так чтобы число витков в обмотке и, следовательно, сопротивление меди было небольшим. Для расчета индуктивности такого дросселя применяются следующие соотношения:

$$N = N_1 = N_2 = N_3$$

$$L_C = L_1 = L_2 = L_3$$

$$L_C = N^2 A_L$$

$N = N_1 = N_2 = N_3$ Количество витков
 $L_C = L_1 = L_2 = L_3$ Индуктивность
 $L_C = N^2 A_L$ Индуктивность каждой обмотки

Коэффициент индуктивности A_L соответствует индуктивности катушки (выполненной на данном сердечнике, приводится в его спецификации) в один виток [$\text{нГ}/\text{N}^2$] и зависит от материала сердечника и его геометрии. Индуктивность рассеяния между обмотками, L_S , обычно составляет около 3% от индуктивности обмотки, L_C . Она может быть использована для фильтрации высокочастотных дифференциальных помех. В последнем случае используются два дополнительных конденсатора.

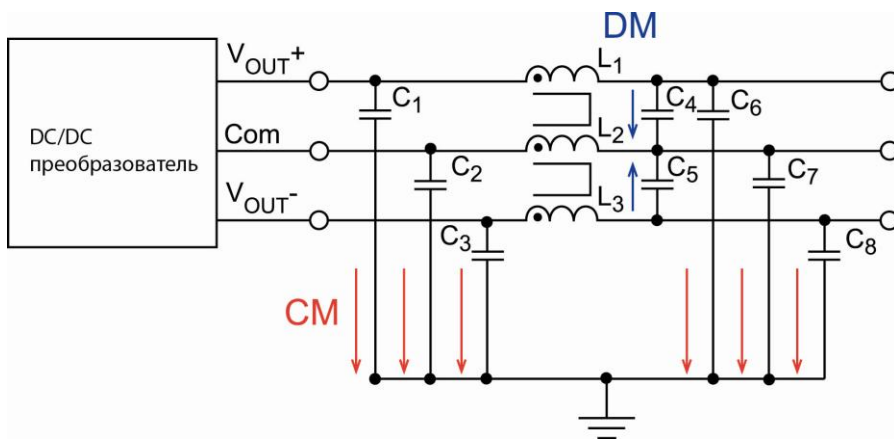


Рисунок 18. Синфазный дроссель с тремя обмотками, как комбинированный выходной фильтр DC/DC преобразователя

Синфазные конденсаторы $C_1 - C_3$ обеспечивают путь с низким импедансом для синфазных шумов и помех на общий провод (землю) первичной цепи. Для этой цели должны использоваться высоковольтные керамические конденсаторы номиналом 1-10 нФ. Здесь конечно можно использовать и многослойные керамические конденсаторы, но только в том случае, если требование по пробивному напряжению изоляции изделия не высоко. В зависимости от внутренней структуры DC/DC преобразователя можно обойтись без конденсаторов C_1 и C_3 . Дифференциальные конденсаторы C_4 и C_5 в сочетании с индуктивностью рассеяния между обмотками L_1/L_2 и L_2/L_3 образуют низкочастотный фильтр для дифференциальных помех и шумов. Номинал конденсаторов C_4 и C_5 , как правило, выбирается более 1 мкФ и в этом случае применение многослойных керамических конденсаторов будет правильным и оправданным.

Все симметричные шумы и помехи, которые проходят-таки через дроссель из-за наличия емкостной связи между обмотками, могут быть зашунтированы на землю с помощью второго набора синфазных конденсаторов. На схеме рис.18 – это конденсаторы $C_6 - C_8$. Индуктивность каждой обмотки дросселя L_c составляет, как правило, несколько сотен миллигенри, так что для расчета дифференциального фильтра индуктивность рассеяния L_s можно брать на уровне 5 - 10 мкГ.

Для вычислений дросселя с тремя обмотками могут быть использованы следующие формулы:

1. Дифференциальный режим:

$$C_{DM} = C_4 = C_5$$

$$f_{r,DM} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_S C_{DM}}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{0.03 L_C C_{DM}}}$$

Синфазный режим:

$$C_{CM} = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = C_7 = C_8$$

$$f_{r,CM} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_C C_{CM}}}$$

Примечание:

C_{CM} – Синфазные конденсаторы

Полная максимальная фильтрация

Синфазный дроссель также может быть использован для борьбы с симметричными помехами и на первичной стороне преобразователя. Поскольку дифференциальная входная токовая помеха может быть очень большой по отношению к синфазной (имеется в виду пусковой ток и пульсации), то может сложиться ложное представление о том, что о синфазных помехах можно не беспокоиться. Но для обеспечения общей электромагнитной совместимости часто требуется именно их подавление. Схема DC/DC преобразователя с полной фильтрацией приведена ниже на рис.19.

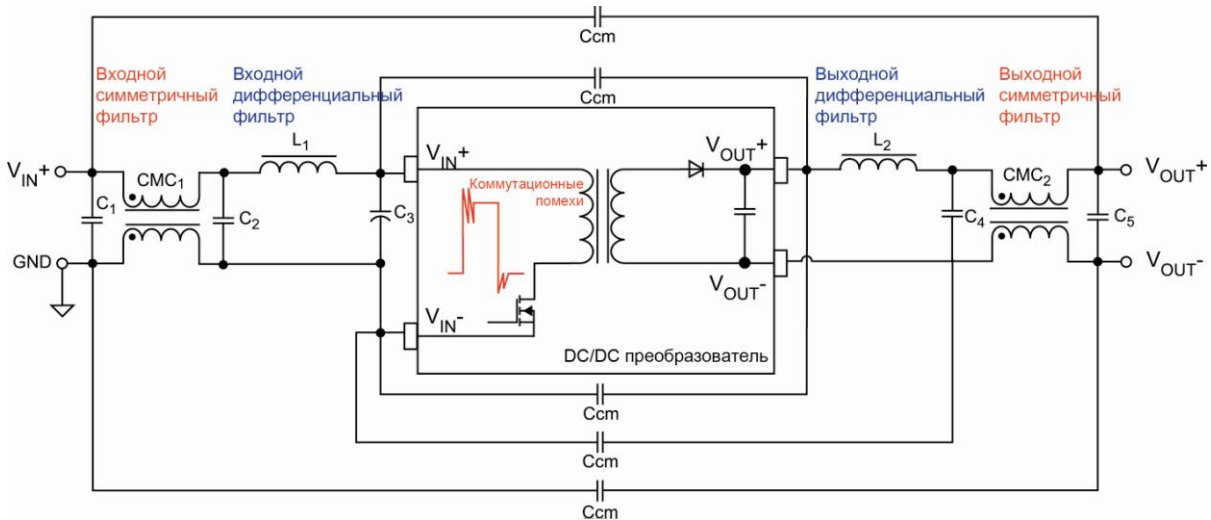


Рисунок 19. Полное подавление шумов и помех в DC/DC преобразователе.

Следует подчеркнуть, что в реальной практике во многих приложениях могут потребоваться не все компоненты из показанных на рис.19. Такой полный фильтр должен использоваться только в соответствии с четко осознанной потребностью, так как применение дополнительных компонентов приведет к снижению общей эффективности и увеличению себестоимости конечного продукта. В некоторых приложениях для обеспечения электромагнитной совместимости будет вполне достаточно использование только лишь входного конденсатора C_3 и одного или нескольких синфазных конденсаторов и дросселей.

Чтобы уменьшить номенклатуру используемых для сборки преобразователя компонентов, в качестве дифференциального дросселя можно использовать синфазный дроссель. Это реализуется путем изменения в соединении его обмоток (рис.20). То есть, при необходимости можно сделать $SMC_1 = L_1$ и $SMC_2 = L_2$. Это особенно полезно, если для сборки используются SMD дроссели. В этом случае для четырех используемых катушек индуктивностей будут использоваться только две установочные катушки для автоматизированного монтажа. Однако данный «трюк» применим только в определенных обстоятельствах, так как синфазные дроссели SMC изначально не разрабатывались для такого применения.

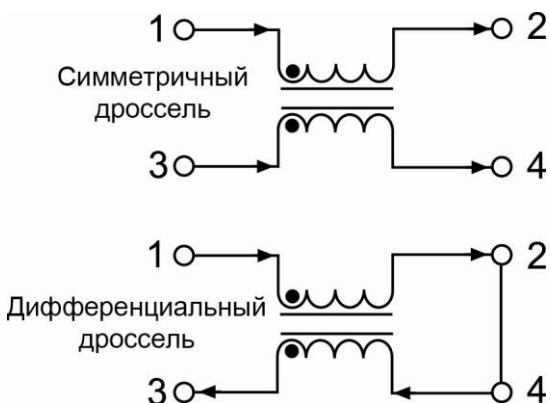


Рисунок 20. Использование синфазного дросселя в роли дифференциальной индуктивности

Разводка фильтра на печатной плате

Для эффективного функционирования входного и выходного фильтров решающее значение имеет их компоновка на печатной плате. Как уже было упомянуто выше, входной конденсатор должен быть установлен как можно ближе к выводам входа преобразователя. Чтобы избежать ухудшения фильтрации необходимо использовать конденсаторы хорошего качества с ESR в миллиомах, а импеданс любого соединения между конденсатором и входами преобразователя так же не должен превышать нескольких миллиом. Используя нижеприведенное уравнение, можно выполнить расчет активного сопротивления печатного проводника Track Resistance:

$$\text{Track Resistance} = \text{Resistivity} \frac{\text{Length}}{\text{Thickness} \times \text{Width}} [1 + (\text{TempCo} \times (\text{Temp} - 25))]$$

Здесь:

Track Resistance – Сопротивление печатного проводника

Resistivity – Удельное сопротивление (Удельное сопротивление меди $1,7 \times 10^{-6}$ Ом/см)

Length – Длина печатного проводника

Thickness – Толщина печатного проводника

Width – Ширина печатного проводника

TempCo – Температурный коэффициент сопротивления (Для меди TempCo = +0,393%/°C)

Temp – Температура печатного проводника

Обычная печатная плата имеет толщину меди 35 мкм, так что проводник шириной 1 мм и длиной 1 см длинный будет иметь при температуре 25°C сопротивление по постоянному току равное почти 5 мОм, с его увеличением до 6 мОм при температуре + 85°C. (Прим. автора перевода: для расчетов можно воспользоваться on-line калькулятором [2])

В дополнение к сопротивлению на постоянном токе, необходимо учитывать и сопротивление печатного проводника переменному току, то есть, его импеданс (полное сопротивление). Проводник печатной платы обладает как индуктивностью, так и распределенной емкостью по отношению к другим дорожкам платы и установленным на нее компонентам. Это может привести к неожиданным результатам в части наводки помех вследствие емкостной или индуктивной связи между дорожками, слоями и непосредственно с компонентами. Например, верхняя дорожка печатной платы, проходя над другой дорожкой на нижней печатной плате или над шиной в теле печатной плате (если это многослойная печатная плата), будет обладать характеристическим импедансом Z_0 и емкостью C_0 , в соответствии с уравнением:



$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left(\frac{5.98H}{0.8W + T} \right) \text{ ohms}$$

$$C_0 = \frac{0.67 (\epsilon_r + 1.41)}{\left(\frac{5.98H}{0.8W + T} \right)} \text{ [pF/inch]}$$

Примечание:

Для обычной печатной платы из материала FR-4: $\epsilon_r = 4$, $H = 30$ мил (0,76 мм) and $T = 1,37$ мил (35 мкм)

Исходя из вышесказанного, важно, чтобы используемые в схеме фильтрации проводники на печатной плате не проходили над или вблизи других, особенно, сигнальных проводников. В идеале, двусторонняя или многослойная плата должна использоваться так, чтобы шины заземления могли формироваться непосредственно под или рядом с помехоподавляющими компонентами. Если печатная плата односторонняя, то соединения должны быть максимально короткими и как можно шире.

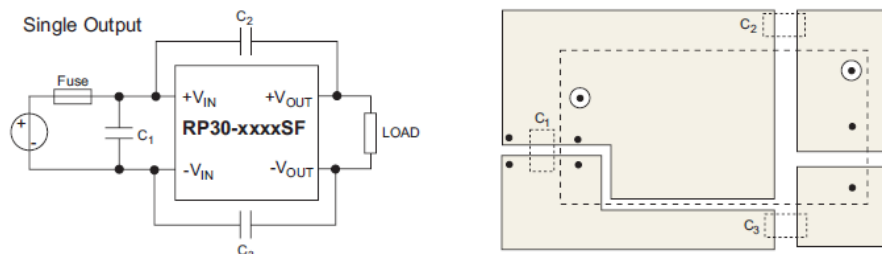


Рисунок 21. Пример компоновки на печатной плате простого фильтра для обеспечения требований Класса А. Разводка печатной платы показана с преобразователем серии RP30-SF

Компоненты фильтров также должны быть рассмотрены как реальные, а не идеальные компоненты. Это означает, что на высоких частотах паразитная индуктивность конденсатора или паразитная емкость катушки индуктивности может взять на себя инициативу в определении поведения компонента. Другими словами, конденсаторы начинают вести себя, как катушки индуктивности и наоборот. Резисторы могут вести себя либо, как индуктивности, либо как конденсаторы.

При умелом подборе компонентов эти проблемы можно нейтрализовать или полностью их избежать. Наиболее важным критерием при конструировании является учет собственной резонансной частоты компонентов, то есть той точки его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), где характер его поведения изменяется. Рис.22 показывает в качестве примера график зависимости импеданса от частоты для такого элемента как конденсатор.

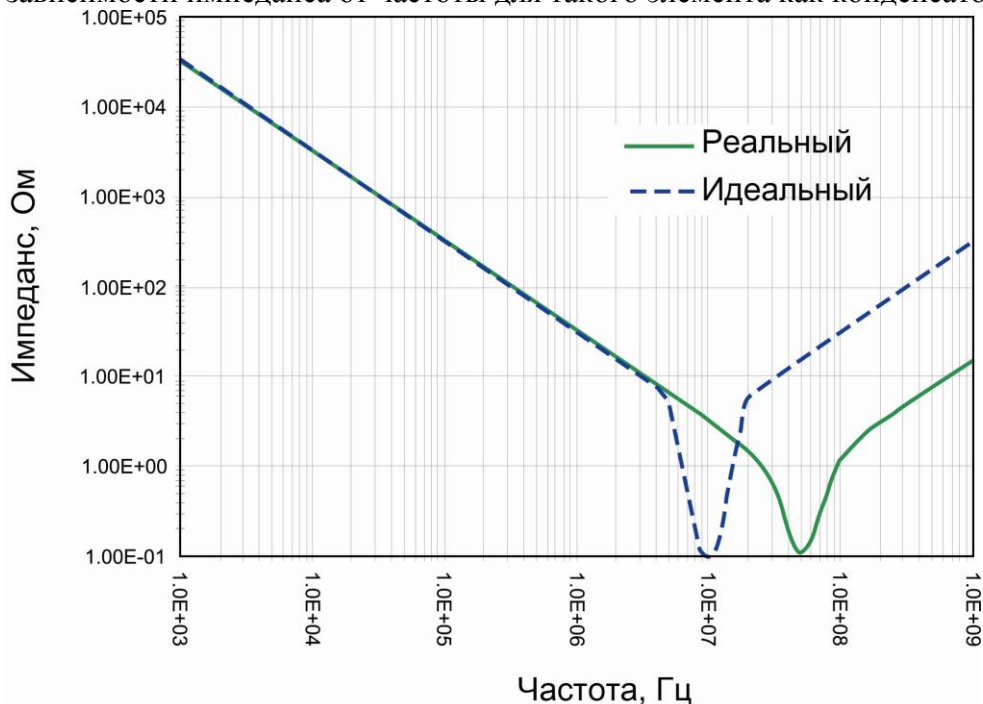


Рисунок 22. Собственная резонансная частота конденсатора

Сплошная линия на графике показывает АЧХ конденсатора емкостью 4,7 нФ имеющего эквивалентное последовательное сопротивление $ESR=0,01$ Ом и собственную эквивалентную индуктивность $ESL=2,5$ нГ. Пунктирная линия показывает тот же конденсатор, для которого было смоделировано недостаточно качественное размещение на плате, в частности - подключение. Такое подключение добавило к имеющемуся $ESR=50$ мОм, а к ESL - 50 нГ. Как видно из графика, резонансная частота сместилась в более низкую область частот, а это означает, что конденсатор начнет вести себя уже как индуктивность на частоте уже в одну десятую от собственной резонансной частоты, которая указана в спецификации.

Для конструкции печатной платы, которая показана на рис.21, особенно важно, чтобы значение ESR и ESL для подключенного к общему проводу (земле) выводу конденсатора было настолько низкой, насколько это возможно. Такое требование нельзя выполнить путем простого электрического соединения с общим проводником через одно единственное проходное отверстие печатной платы, для этого необходимо несколько отверстий (рис.23). Такой подход приведет к снижению сопротивления, как по постоянному току, так и импеданса в целом, то есть, с учетом сопротивления и по переменному току.

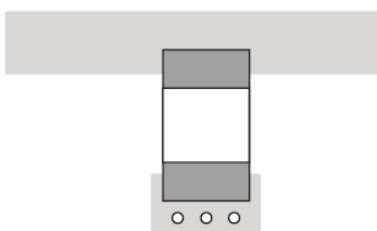


Рисунок. 23. Пример многоточечного подключения вывода элемента к общему проводу

Для индуктивностей (в рассматриваемом случае - дросселей фильтров) длина соединительного проводника не имеет значения, поскольку длинный проводник будет только увеличивать общую индуктивность, тем не менее, будет правильным решением устанавливать индуктивности, как можно ближе к источнику помех и возможной интерференции.

При разводке любых описанных здесь фильтров, особое внимание должно быть уделено протекающим в цепи токам. Любой ток, протекающий в контуре, будет генерировать электромагнитное поле, которое может индуцировать шум и помехи в других части схемы. В идеале для подключения к общему проводнику (заземлению) необходимо использовать соединения типа "звезда", когда все обратные токи будут течь к одной общей точке заземления. Если же петля все же является неизбежной, то площадь такого контура должна быть как можно меньшей.

С хорошо разведенной печатной платой и правильным выбором компонентов, результаты подавления пульсаций, шумов и помех DC/DC преобразователя могут быть весьма впечатляющими. Наглядный практический пример приведен на рис.24.

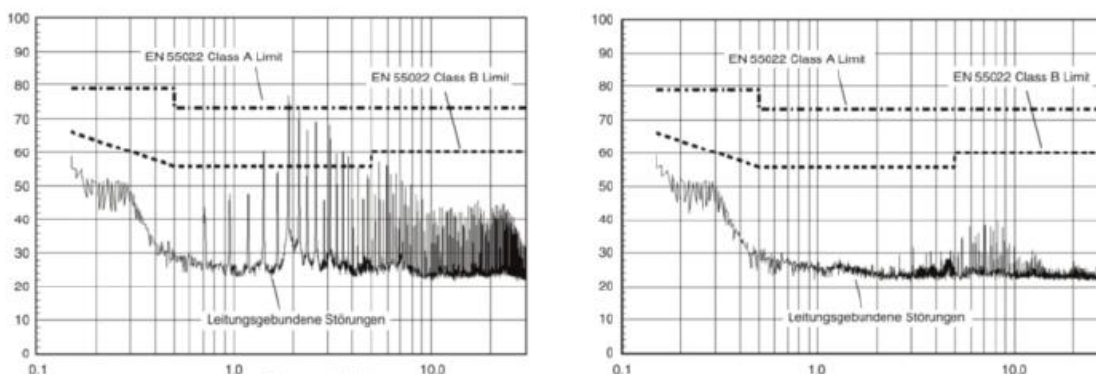


Рисунок 24. Пример измерения шумов и помех до и после их фильтрации