

АСИММЕТРИЧНЫЕ ФИЛЬТРЫ ДЛЯ СТАНДАРТОВ НЕМР И TEMPEST

Симметричные фильтры традиционных типов впервые были представлены в 1970–80-х гг. Они использовались для защиты радиоэлектронной аппаратуры от мощных электромагнитных импульсов НЕМР (High-Altitude Electromagnetic Pulse) и побочных электромагнитных импульсных излучений в соответствии со стандартом TEMPEST (Transient Electromagnetic Pulse Emanation Standard).

На основе многолетнего опыта мировые производители фильтров смогли оптимизировать их конструкцию за счет использования технологических усовершенствований. Основные усилия были направлены на разработку асимметричных конструкций, имеющих более высокую эффективность, меньшие габариты и удовлетворяющих требованиям стандартов НЕМР и TEMPEST. Цель данной статьи — объяснить основные термины, необходимые для понимания конструкции асимметричных фильтров как наиболее оптимизированной и современной.

Введение

Понятие «электромагнитная совместимость» (EMC) определяет степень излучения или воздействия электромагнитных помех (ЭМП) или радиочастотных помех (РЧП) на электронные приборы. Целью обеспечения EMC является снижение уровня генерации, распространения и приема электромагнитной энергии в электронных системах. Электромагнитная со-

вместимость рассматривает два вида нежелательных воздействий: индуктивные и кондуктивные помехи.

Индуктивные помехи возникают, когда часть внутренней схемы выступает в качестве антенны и передает нежелательные электромагнитные волны. Типовым решением для защиты от подобных излучений считается использование экранированных корпусов (рис. 1).

Для возникновения кондуктивных помех необходим физический проводник, например электрические провода, передающие помехи через систему. Это могут быть шнуры питания электрических устройств, находящиеся внутри экранированного корпуса. В данном случае использование фильтров становится единственным решением для защиты экранированных устройств от кондуктивных ЭМП.

Кондуктивные и индуктивные паразитные связи могут возникать и внутри корпуса. Наличие таких нелинейных связей приводит к генерации паразитных токов в проводах, которые должны подавляться фильтром. Распространение сигналов может происходить в синфазном (CM, common mode) или дифференциальном режиме (DM, differential mode) в зависимости от вида проводящего контура, который они используют для своего прохождения. Дифференциальные токи формируются в небольших контурах, образованных компонентами, печатными дорожками или ленточными проводниками (рис. 2), в то время как синфазные токи появляются в больших контурах заземления и из-за несбалансированного характера передающих и приемных цепей (рис. 3).



Рис. 1. Экранированное пространство в виде клетки Фарадея

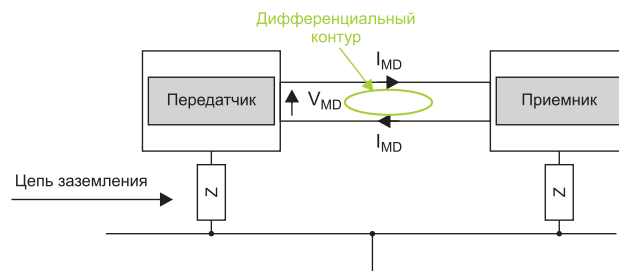


Рис. 2. Дифференциальный контур (DM) между двумя проводящими линиями

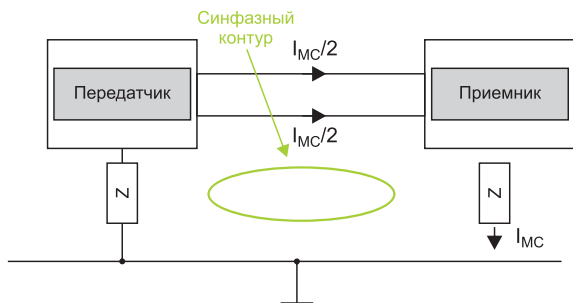


Рис. 3. Синфазный контур (СМ) между двумя линиями и заземлением

Изначально решения по EMC были адаптированы для конкретных потребностей военных заказчиков, предъявляющих повышенные требования: стандарт TEMPEST по отношению к передатчику и NEMP на стороне приемника. Технологические достижения последних десятилетий привели к разработке глобальных решений, отвечающих всем требованиям EMC, TEMPEST и NEMP. Эти решения относятся к так называемым асимметричным фильтрам, принципиально отличающимся от старых симметричных конструкций.

В первой части статьи дано сравнение двух типов фильтров, анализируются их преимущества и недостатки в отношении требований EMC и NEMP. Цель второй части работы — подтверждение того факта, что асимметричная технология может соответствовать и требованиям TEMPEST.

Для начала кратко напомним об основных принципах фильтрации.

Низкочастотная фильтрация паразитных сигналов

Нежелательные паразитные сигналы имеют высокую частоту (HF), поэтому для их подавления обычно используется низкочастотный фильтр. Основной принцип его работы проиллюстрирован на простом примере, представленном на рис. 4.

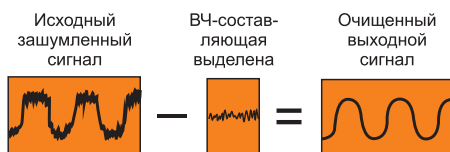


Рис. 4. Принцип НЧ-фильтрации (синусоидальные шумы)

Высокочастотная составляющая исходного зашумленного синусоидального сигнала выделяется и подавляется фильтром. На выход проходит неослабленный низкочастотный сигнал. Область низкого затухания называется полосой пропускания, за пределами этой зоны затухание фильтра увеличивается в соответствии с типом и порядком фильтра. Основной характеристикой фильтра является частота среза, начиная с которой затухание возрастает.

Симметричные и асимметричные фильтры

Симметричные фильтры

Симметричная конструкция предусматривает использование отдельных фильтрующих ячеек для защиты каждой цепи системы. Для реализации данной концепции необходи-

ма установка многочисленных индивидуальных дросселей и конденсаторов высокой емкости (рис. 5). Подобное решение оказывает очевидное влияние на размер устройства, тепловыделение в индукторах и наличие тока утечки между фильтром и цепью заземления. Все эти факторы определяют недостатки симметричной конструкции с точки зрения монтажа оборудования и его безопасности.

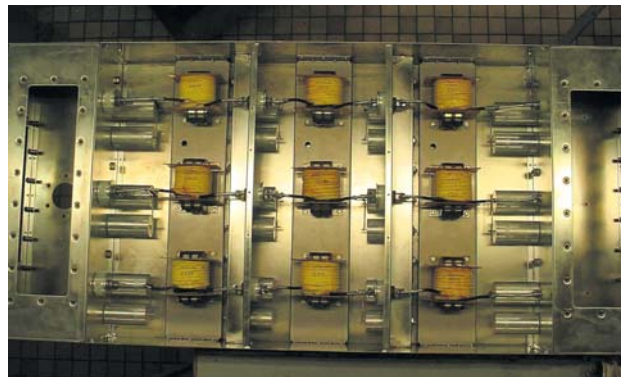


Рис. 5. Симметричный фильтр CDP фирмы Eurofarad

Как показано на рис. 6, затухание симметричного фильтра может обеспечить фильтрацию в дифференциальном и синфазном режимах на очень низких частотах. Предварительное сравнение рис. 6 и 8 (асимметричный дизайн) демонстрирует несколько лучшую производительность симметричной конструкции в низкочастотном диапазоне в дифференциальном режиме. Однако военный стандарт MIL-HDBK-1195 [4] не дает никаких рекомендаций относительно асимметричного или симметричного решения, поскольку обе технологии обеспечивают обязательные вносимые потери до 100 дБ на частоте 14 кГц в синфазном режиме для силовых и контрольных цепей. Далее мы рассмотрим, почему синфазные помехи более критичны на низких частотах, чем дифференциальные, и почему Департамент США не делает разницы в их спецификациях.

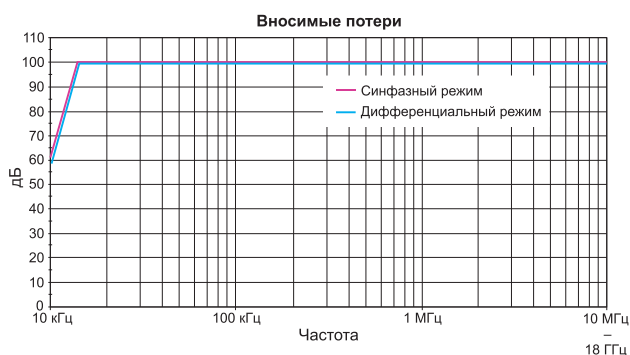


Рис. 6. Симметричная фильтрация в синфазном и дифференциальном режимах (измерено в соответствии со стандартом MIL-STD-220C на 50 Ом)

Асимметричные фильтры

В асимметричной конструкции используются общие индукторы для каждой цепи схемы (рис. 7). Преимущество такого решения заключается в возможности установки меньшего

количества больших индуктивностей, что позволяет существенно сократить габариты устройства. Кроме того, в целях экономии места в асимметричных фильтрах можно применять конденсаторы меньших номиналов.

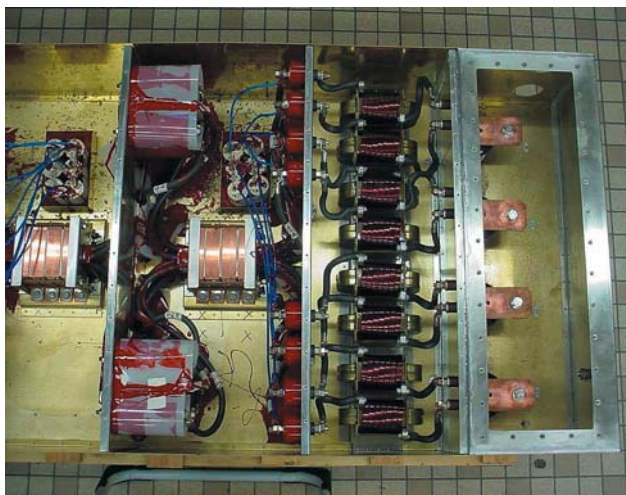


Рис. 7. Асимметричный фильтр TDP фирмы Eurofarad

Как показано на рис. 8, затухание асимметричного фильтра может обеспечить фильтрацию синфазных помех на очень низких частотах. Фильтрация в дифференциальном режиме происходит благодаря конденсаторам, установленным в каждой цепи. В данном примере подавление дифференциальных помех начинается с 30 кГц и достигает 100 дБ на 150 кГц. Однако отметим, что рекомендации TEMPEST иногда вступают в противоречие относительно подавления на низких частотах. Стандарт MIL-HDBK-1195 определяет уровень около 100 дБ на 14 кГц, но требования TEMPEST оказываются не такими жесткими.

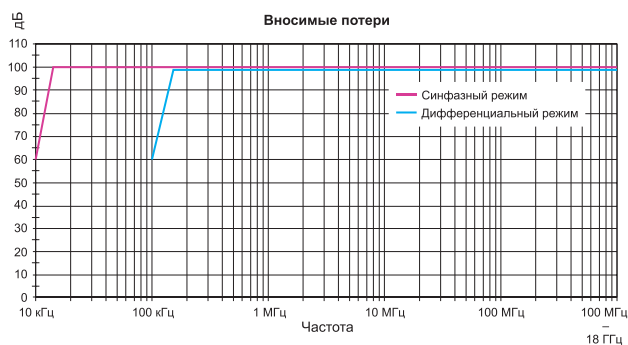


Рис. 8. Асимметричная фильтрация в синфазном и дифференциальном режимах (измерено в соответствии со стандартом MIL-STD-220C на 50 Ом)

Подводя итог, скажем, что симметричные и асимметричные конструкции способны обеспечить хорошую защиту от помех в синфазном и дифференциальном режимах. Даже если

асимметричные фильтры имеют несколько меньшее ослабление дифференциальных шумов на низких частотах (рис. 6 и 8), этот уровень оказывается достаточным для выполнения требований TEMPEST, как будет описано в следующей главе. Кроме того, как показано в таблице, асимметричное решение предлагает ряд важных преимуществ.

Таблица 1. Проводимые квалификационные испытания

	Симметричный фильтр	Асимметричный фильтр
НЕМР	•	•
Синфазный режим	•	•
Дифференциальный режим	•	•
Обслуживание после отказа	×	•
Низкое тепловыделение	×	•
Низкий ток утечки	×	•
Оптимизация габаритов	×	•

Квалификация по НЕМР

Многие производители асимметричных ЕМР-фильтров, в том числе Eurofarad, проходят квалификационные испытания в соответствии с MIL-STD-188-125-1 и 2, который является ключевым стандартом, объясняющим, как обеспечить эффективную токовую защиту.

Низкое тепловыделение

В асимметричных конструкциях один общий индуктор может использоваться во всех фильтрующих линиях (как показано на рис. 7). Действительно, в примере трехфазного асимметричного фильтра с нейтралью четыре провода наматываются вокруг одной и той же магнитной цепи. Даже при наличии несбалансированных токов по трем фазам, в нейтрали будет появляться сверхток. Магнитные потоки каждой из цепей φ_1 , φ_2 и φ_3 и нейтрали φ_{1+2+3} компенсируют друг друга, не создавая магнитного поля.

Поскольку не образуется магнитное поле, в индукторах отсутствует тепловыделение. Такой же процесс происходит в трехфазном фильтре без нейтрали, то есть когда три провода намотаны вокруг одной и той же магнитной цепи. Сверхток в несбалансированной фазе использует другую фазу таким образом, что магнитные потоки по-прежнему компенсируют друг друга, не создавая магнитного поля. В симметричных фильтрах нельзя использовать это преимущество.

щество компенсации магнитного потока, поскольку каждая обмотка наматывается вокруг одной индивидуальной магнитной цепи, что приводит к генерации тепла.

Низкий ток утечки

Как уже упоминалось, применение общих индукторов асимметричных фильтров позволяет снизить емкости конденсаторов при одинаковом уровне фильтрации. Поскольку токи утечки напрямую зависят от емкости конденсаторов, то чем меньше конденсатор, тем ниже ток утечки. Кроме того, это означает, что подобные фильтры потребляют меньшую мощность.

Оптимизация габаритов

При одинаковом уровне ослабления в асимметричном фильтре используется меньшая емкость и только один общий индуктор, вот почему подобная конструкция позволяет экономить пространство и количество необходимых материалов. Таким образом, асимметричные конструкции меньше, легче и, следовательно, проще в эксплуатации.

Почему асимметричные фильтры удовлетворяют требованиям TEMPEST?

Кондуктивные помехи: электронные устройства, преимущественно трансформаторы, расположенные между источником нежелательных шумов и фильтром-подавляют все сигналы, частота которых ниже 100 кГц. Это означает, что паразитные сигналы, которые могут распространяться по проводам и достигать фильтра, являются высокочастотными.

Индуктивные помехи: в настоящее время требования электромагнитной совместимости должны реализовываться на этапе проектирования электронных и электрических компонентов. Их излучение на низких частотах можно значительно снизить за счет современных эффективных правил проектирования. Однако поведение составных частей этих компонентов плохо прогнозируется на высоких частотах (из-за наличия паразитных емкостей и индуктивностей). Более комплексные явления, такие как антенный эффект, проявляются только в ВЧ-диапазоне. Это объясняет, почему большинство шумов, излучаемых электротехническими устройствами, имеют высокую амплитуду высокочастотных составляющих.

Излучаемые и кондуктивные связи: распространяющийся шумовой ток, образованный нелинейными связями между излучаемыми помехами и проводниками, имеет низкую амплитуду в НЧ-диапазоне. Кроме того, электрические контуры, образованные проводами и цепью заземления, гораздо больше, чем контуры, созданные за счет связи двух фильтров (рис. 2 и 3). Следовательно, помехи в дифференциальном режиме имеют значительно меньшие амплитуды, чем в синфазном (рис. 8), и можно пренебречь их влиянием на низких частотах.

Как видно на рис. 8, паразитные генерации непосредственно связаны с наличием магнитных полей и контуров. Формула на основе теоремы Био — Савара показывает, что для заданного уровня магнитного поля чем больше диаметр контура, тем выше наводимый ток. В соответствии с правилами проектирования для подавления помех в дифференциальном режиме рекомендуется монтировать проводники как можно ближе и в некоторых случаях перевивать их. Делается это для уменьшения размера паразитных контуров до такой степени, чтобы уровень ЕМИ стал предельно низким.

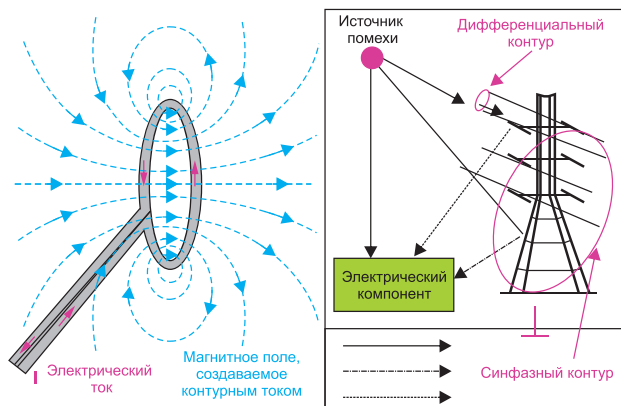


Рис. 9. Магнитное поле в контуре между фазой и заземлением (синфазный режим) больше, чем в контуре между фазами (дифференциальный режим)

Наиболее сложной задачей является защита от электромагнитных помех в синфазном режиме, поскольку не существует реальных эффективных средств проектирования, позволяющих исключить их. Таким образом, защита в синфазном режиме становится ключевой проблемой (рис. 9).

Только помехи, которые смогут дойти до фильтра по проводам, являются дифференциальными на высоких частотах ($F > 100$ кГц) и синфазными. Поскольку асимметричные фильтры способны подавить все эти сигналы, требования стандарта TEMPEST действительно эффективно выполняются.

Заключение

В последние несколько лет в мировой промышленности растет популярность асимметричных фильтров. Это происходит не только по соображениям габаритов и стоимости, но и потому, что асимметричная фильтрация, как мы убедились, действительно способна обеспечить ЭМС и защиту от НЕМР.

Таким образом, асимметричные фильтры представляют собой наилучший выбор по эффективности и массо-габаритным показателям.



Литература

1. Hemming L. Architectural Electromagnetic Shielding Handbook. IEEE Press, 1992.
2. Donald R. J. Electrical Filters. Synthesis, design and application.
3. Hill J. S. Vol. 6, Electromagnetic Interference Specifications, standard & regulations.
4. Radio frequency shielded Enclosures. MIL-HDBK-1195. US department of Defense. Military handbook, 30 September 1988.
5. US National Security Agency. NSA 94-106, 24 October 1994.