

# ИНДУКТИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

## в радиоэлектронной аппаратуре

**В статье рассматриваются некоторые возможные случаи применения индуктивностей в различных видах радиоэлектронной аппаратуры.**

**Николай Ковалев**

info@bec.spb.ru

Невозможно себе представить многие виды радиоэлектронной аппаратуры без индуктивных компонентов-дросселей различного назначения и катушек индуктивности. Особенно широко они применяются в источниках вторичного электропитания и в устройствах для телекоммуникаций. Конечно, в некоторых случаях можно заменить индуктивные элементы другими (например, резисторами в качестве нагрузок усилительных каскадов или продольных элементов фильтров питания). Однако ни один другой элемент в отличие от индуктивностей не обладает свойством оказывать сопротивление переменному току, причем тем большее, чем выше частота, обеспечивая при этом минимальное сопротивление постоянному току и, соответственно, минимальные потери энергии. В конце прошлого века существовала тенденция замены индуктивных компонентов другими, более дешевыми и малогабаритными. В ряде случаев эта задача с успехом была решена. Так, фильтры сосредоточенной селекции на LC-контурах удалось заменить электро-механическими фильтрами и фильтрами на ПАВ, стали применяться цифровые методы фильтрации при обработке сигналов. Но даже и в этом применении не потеряли своего значения перестраиваемые катушки индуктивности, особенно если частота настройки нестандартна. Кроме того, в последнее время индуктивности, не предназначенные для накопления энергии или обладающие небольшой емкостью, имеют габариты и массу, сравнимые или такие же, как и другие чип-компоненты — резисторы, конденсаторы и т. д.

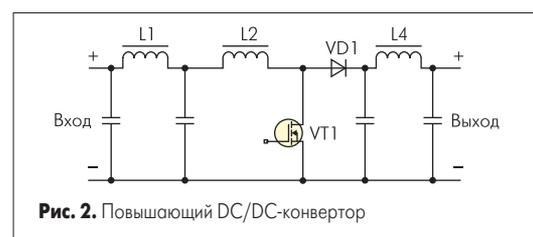
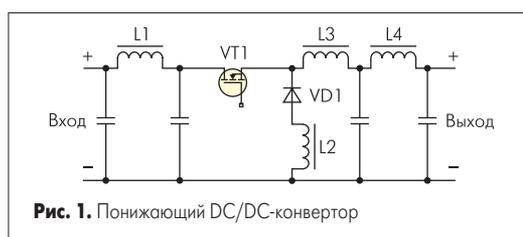
Весьма ценным свойством индуктивных элементов, часто используемым в различных преобразователях электрической энергии, является накопление энергии в магнитном поле при прохождении по ним

тока. В качестве накопителей энергии они вне конкуренции.

Наиболее широко индуктивные компоненты представлены в импульсных источниках питания. В самых простых понижающих DC/DC-конверторах (рис. 1) может использоваться от одного до нескольких дросселей. Принципиально необходимым является дроссель L3, который служит сглаживающим элементом, выделяющим постоянную составляющую из последовательности импульсов. Он накапливает энергию при открытом ключевом транзисторе VT1, а во время паузы через диод VD1 отдает ее в нагрузку. Кроме того, могут дополнительно применяться: один или несколько дросселей во входном однозвенном или многозвенном фильтре (L1 на рис. 1); один или несколько дросселей в выходном однозвенном или многозвенном фильтре (L4 на рис. 1). Эти дроссели работают без накопления энергии и служат для подавления шумов и помех на входе и на выходе. Дополнительно для ограничения «сквозных» токов при включении транзистора VT1, обусловленных конечным временем восстановления обратного сопротивления диода VD1, используется дроссель L2, выполняемый часто как насыщающийся.

В повышающем (рис. 2) и полярноинвертирующем DC/DC-конверторах также принципиально необходим накопительный дроссель L2. Дополнительно могут устанавливаться также дроссели L1 и L3 входных и выходных фильтров. Если к фильтрации входных или выходных помех предъявляются повышенные требования, могут быть применены двух- и многозвенные фильтры, но наиболее часто применяются все-таки одно- и двухзвенные.

В однотактных обратных конвекторах с гальванической развязкой (рис. 3) дроссели L1 и L2



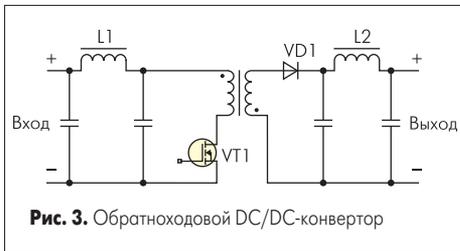


Рис. 3. Обратнойходовой DC/DC-конвертор

не являются принципиально необходимыми, но, как правило, устанавливаются во входных и выходных фильтрах. Как и в предыдущих случаях, фильтры могут быть многозвенными. Функцию накопления энергии здесь выполняет трансформатор, осуществляющий также гальваническую развязку.

Однотактные или двухтактные прямоходовые DC/DC-конвертеры (рис. 4а и 4б соответственно) обязательно содержат накопительный дроссель (L2 на рис. 4), а также могут содержать (и, как правило, содержат) дополнительно дроссели входных и выходных фильтров (L1 и L3) для улучшения фильтрации напряжения на входе и выходе.

AC/DC-преобразователи могут содержать корректор коэффициента мощности (ККМ). Он используется преимущественно в устройствах средней и большой мощности. Структура и режим работы ККМ соответствует повышающему DC/DC-конвертеру без гальванической развязки (рис. 2). В нем обязательно содержится дроссель-накопитель энергии (L2 на рис. 2). Отличие от повышающего конвертера состоит в том, что импульсы ККМ промодулированы по длительности по синусоидальному закону и на входе действует не постоянное напряжение, а выпрямленное синусоидальное. Дроссель ККМ часто имеет обмотку обратной связи. Входные и выходные дроссели в ККМ обычно не используются, фильтры шумов и помех переносятся на вход и выход AC/DC-преобразователя.

В сетевых фильтрах при питании от сети переменного тока дроссели применяются очень широко. Фильтры бывают как встраиваемые в источник питания или аппаратуру, так и внешние, предназначенные для подключения одного или нескольких устройств. Наиболее широко такие фильтры используются для подключения компьютеров и офисной техники. В таких фильтрах (рис. 5) применяются дроссели двух видов. Для подавления синфазных помех служат так называемые тококомпенсированные дроссели, имеющие две одинаковых обмотки, которые включаются встречно по отношению к току питания низкой частоты (L1 на рис. 5). Благодаря этому сердечник дросселя не подмагничивается. Для подавления дифференциальных помех предназначен дроссель с согласно включенными обмотками (L2 на рис. 5). Этот дроссель подмагничивается током питания низкой ча-

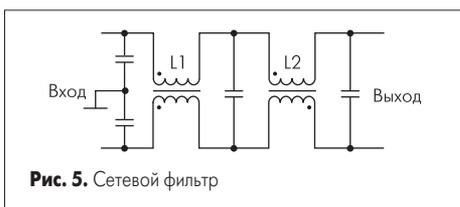


Рис. 5. Сетевой фильтр

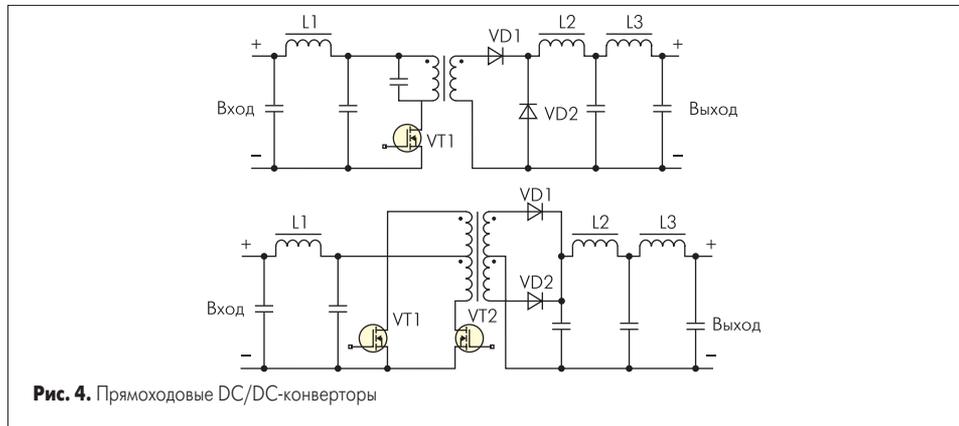


Рис. 4. Прямоходовые DC/DC-конвертеры

стоты. Он может быть заменен одним или двумя однообмоточными дросселями.

Дроссели являются необходимыми элементами усилителей низкой частоты (УНЧ) класса D (рис. 6). Такие УНЧ обладают тем преиму-

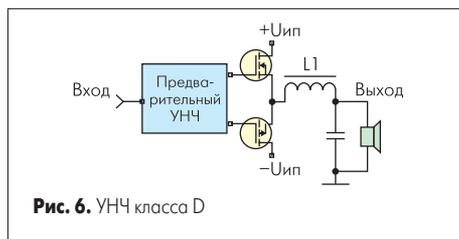


Рис. 6. УНЧ класса D

ществом, что их выходные транзисторы работают в ключевом режиме, обеспечивая высокий КПД при достаточно хорошем коэффициенте гармоник и вполне приличной выходной мощности — до десятков Вт. Это позволяет обойтись без радиаторов. Дроссель используется в выходном фильтре и является интегрирующим элементом — накопителем энергии. В данном случае никакой другой элемент решить эту задачу не способен. УНЧ класса D могут с успехом применяться в домашних кинотеатрах, автомобильной и переносной радиоаппаратуре, ноутбуках и т. д. Поскольку речь зашла о звукоусилении, то необходимо вспомнить многополосные акустические системы, в которых применяются частотно-разделительные фильтры, совершенно невыполнимые без индуктивных компонентов. Для примера на рис. 7 приведена схема трехполосной акусти-

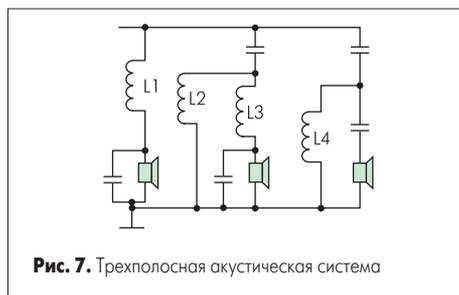


Рис. 7. Трехполосная акустическая система

ческой системы. Дроссели для таких фильтров выполняются, как правило, в виде многовитковых катушек без сердечника, чтобы не вносить нелинейных искажений.

Аппаратура телекоммуникаций, а также и функциональная аппаратура другого назначения, в том числе с использованием микропроцессоров и микроконтроллеров, также не обходится без индуктивных компонентов. LC-фильтр на входе питания функциональной платы (рис. 8) является наилучшим реше-

нием, так как простейший емкостный фильтр не обеспечивает высокого уровня фильтрации шумов и помех, а на резисторе RC-фильтра возникает слишком заметное падение напряжения, что снижает уровень и точность питающих напряжений (а к этому особенно чувствительны микропроцессорные устройства). Кроме того, с RC-фильтром при изменении режима работы устройства и связанном с этим изменении тока потребления возникает специфическая помеха по питанию из-за изменения падения напряжения на резисторе фильтра. Дроссель же, имея весьма малое активное сопротивление, почти не ухудшает качества питающего напряжения по уровню и стабильности, но оказывает весьма заметное сопротивление для переменной составляющей шумов и помех, образуя совместно с конденсатором фильтр нижних частот второго порядка, работающий значительно эффективнее С или RC-фильтра. Единственным условием является то, что собственная резонансная частота дросселя должна лежать выше рабочего диапазона частот. Фильтр может быть многозвенным. Для исключения нежелательных паразитных резонансов конденсатор фильтра должен состоять из электролитического и керамического конденсаторов. Применение LC-фильтров на вводе питания функциональных плат позволяет развязать платы по питанию между собой, снизить требования к источникам вторичного электропитания по шумам и пульсациям и применить более дешевые источники.

Также успешно дроссели могут использоваться и в цепях развязки по питанию внутри платы, отделяя друг от друга различные каскады и узлы устройства. Особенно эффективно их применение при низковольтном питании 3,3 В и менее, что достаточно часто встречается в современной аппаратуре.

В сигнальных цепях, особенно при работе на длинные соединительные линии, успешно используются тококомпенсированные дроссели (рис. 9), содержащие от двух до четырех и более одинаковых обмоток, включаемых

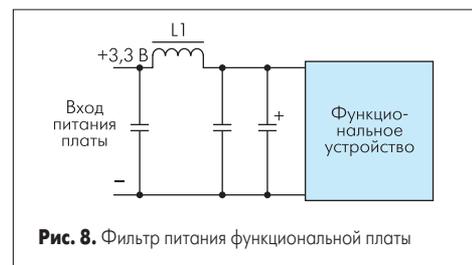


Рис. 8. Фильтр питания функциональной платы

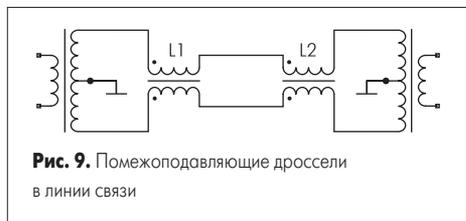


Рис. 9. Помехоподавляющие дроссели в линии связи

по току сигнала встречно. Они являются почти идеальными подавителями синфазных (симметричных) шумов и помех (до 60–80 дБ), оказывая незначительное сопротивление полезному сигналу.

При дистанционном питании удаленных частей аппаратуры при помощи дросселей совместно с газовыми разрядниками и другими защитными элементами обеспечивается защита от воздействия грозы. Тококомпенсированные дроссели, установленные в сигнальных цепях, также помогают решать эту задачу.

Следует также упомянуть дроссели, используемые в качестве индуктивной нагрузки (или части нагрузки) усилительных каскадов, особенно широкополосных и видеоусилителей. Здесь дроссели, почти не снижая напряжения питания, обеспечивают необходимое сопротивление нагрузки по переменному току, а также частотную компенсацию на верхних частотах диапазона.

И, наконец, перестраиваемые или неперестраиваемые катушки индуктивности, используемые в резонансных LC-контурах (фильтр-пробках, контурах LC-генераторов, гетеродинов, преселекторов и т. д.). Хотя LC-контур в частотно-избирательных цепях в последние годы используются все реже (заменяются пьезокерамическими фильтрами, фильтрами на ПАВ, цифровыми устройствами фильтрации), катушки индуктивности все же не совсем потеряли свое значение. Они вполне успешно занимают свою нишу благодаря своей простоте, надежности, низкой стоимости, возможности легкого воспроизведения с нужными параметрами, что особенно важно при небольших тиражах аппаратуры. LC-контур можно легко перестраивать на нужную частоту.

Рассмотрим кратко материалы, используемые в дросселях и катушках индуктивности. Поскольку речь идет, прежде всего, о повышенных частотах, то основными материалами для индуктивных компонентов являются ферриты и магнитодиэлектрики.

Для тококомпенсированных дросселей, в которых отсутствует подмагничивание, как для силовых цепей, так и для сигнальных, используются высокопроницаемые ферриты с начальной относительной магнитной проницаемостью от 4000 до 10000. Сердечники приме-

няются как тороидальные, так и U-образные, либо различные разновидности Ш-образных и броневых.

Для дросселей, работающих с подмагничиванием и являющихся накопителями энергии, обычно применяются ферритовые сердечники с зазором. Магнитная проницаемость сердечника не имеет решающего значения, так как величина индуктивности определяется преимущественно величиной немагнитного зазора. Для снижения потерь в сердечнике используются так называемые «силовые» марки ферритов, например, N87 фирмы Epcos или аналогичные. Кроме того, применяются сердечники без зазора из магнитодиэлектриков (в них имеется распределенный зазор). Причем для изделий с наиболее высокими требованиями и характеристиками используются сердечники из молибденового пермаллоя (МРР, МП), а для изделий минимальной стоимости — из сендаста (Cool М<sub>μ</sub>) или распыленного железа. Для дросселей фильтров, работающих с подмагничиванием и с небольшой величиной переменной составляющей напряжения, из магнитодиэлектриков наиболее подходит распыленное железо, как наиболее дешевый материал, вполне удовлетворяющий данным требованиям. Кроме того, широко применяются незамкнутые сердечники из никель-цинковых ферритов различной конфигурации. Наиболее простые из них — стержневые. Они лучше всего держат подмагничивание благодаря почти бесконечному воздушному зазору, но в то же время обладают и наибольшими полями рассеяния. Примером дросселей на таких сердечниках являются отечественные высокочастотные дроссели типа ДМ. Дроссели на гантельных сердечниках компактнее, меньше излучают, но их индуктивность в большей степени зависит от тока подмагничивания. Такие гантели выпускаются как без выводов, так и с радиальными или аксиальными штыревыми выводами. И, наконец, экранированные гантельки, помещаемые в ферритовый экран. Они излучают еще меньше, но, соответственно, из-за уменьшения величины воздушного зазора, еще хуже держат подмагничивание. В последнее время появились низкопрофильные гантельные сердечники, как экранированные, так и неэкранированные, в исполнении для поверхностного монтажа. Дроссели на таких сердечниках могут выполняться на токи до десятков ампер.

Следует упомянуть высокочастотные дроссели, выполненные в виде чипов. Они выпускаются разных типоразмеров и имеют несколько разновидностей — дроссели с ферритовыми сердечниками и намоткой проводом,

многослойные дроссели с ферритовыми сердечниками и без них. Такие дроссели имеют те же типоразмеры, что и другие пассивные компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа — резисторы, конденсаторы. А поскольку индуктивные компоненты, имея одинаковые габаритные размеры с резисторами, имеют в ряде случаев определенные преимущества перед ними, то их весьма целесообразно применять вместо резисторов или вместе с резисторами в качестве фильтров питания, в цепях межкаскадной развязки, для частотной компенсации, в частотно-зависимых нагрузках, в качестве нагрузок усилительных каскадов, особенно при низковольтном питании.

Катушки индуктивности, предназначенные для работы в резонансных контурах, выполняются, как правило, с подстроечными сердечниками из ферритов или карбонильного железа как на цилиндрических каркасах, так и в броневых сердечниках с зазором конфигурации Б, КВ (RM) и т. п. Применение кольцевых сердечников для этих целей — нерациональное решение, так как ферритовые материалы имеют достаточно большой разброс по магнитной проницаемости, что приводит к разбросу индуктивности, а невозможность подстройки катушки в аппаратуре делает настройку контура в резонанс весьма затруднительной. Кроме того, кольцевые сердечники почти не выпускаются из термостабильных материалов ввиду малого их применения. Например, из термостабильного материала N48 фирма Epcos выпускает только броневые сердечники. Существует еще один вид конторных катушек индуктивности — наиболее простые и дешевые бескаркасные катушки, которые выпускаются без сердечников и по виду напоминают спиральные пружинки. Такие катушки имеют небольшую индуктивность и применяются на высоких частотах, например, в FM-диапазоне. Подстройка контуров в изделии осуществляется сдвиганием и раздвиганием витков, после чего витки фиксируются каким-либо высокочастотным диэлектриком, например, парафином.

Таким образом, мы кратко рассмотрели применение индуктивных компонентов. Исторически они были одними из первых элементов радиоэлектронной аппаратуры, но широко применяются и в настоящее время. Индуктивные компоненты постоянно улучшаются и совершенствуются за счет применения новых материалов, конструкций и технологий. Они будут широко применяться и в будущем в самой разнообразной технике — от мобильных телефонов, радио-, телеприемников и другой аппаратуры связи до источников питания и других устройств силовой электроники. ■