

Применение широкополосных трансформаторов

В аппаратуре и системах связи, передачи данных, в усилительной, радиоприемной и радиопередающей технике часто возникает необходимость согласования источника сигнала и нагрузки. При этом желательно передать сигнал с минимальными потерями мощности, частотными и нелинейными искажениями, с минимальными отражениями. Наиболее удобным и универсальным способом решения этой задачи, максимально удовлетворяющим предъявляемым требованиям, является применение широкополосных трансформаторов. Рассмотрим некоторые, наиболее типичные, случаи их применения и задачи, которые решаются с помощью широкополосных трансформаторов.

Николай Ковалев

bec@telros.ru

Широкополосные трансформаторы, в отличие от изделий, работающих на фиксированной частоте с относительно небольшими отклонениями, например, в пределах $\pm 20\%$, работают в широком диапазоне частот — от одной до нескольких (и даже многих) октав. Они могут выполнять следующие функции:

- согласовывать сопротивления нагрузки (как сосредоточенной, так и линии с распределенными параметрами) с выходным сопротивлением источника сигнала;
- осуществлять гальваническую развязку в цепи сигнала;
- согласовывать несимметричный выход источника сигнала с симметричной линией или нагрузкой, или симметричный выход источника сигнала с несимметричной линией и нагрузкой и т. п.

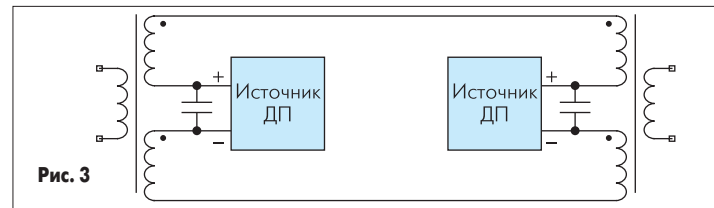
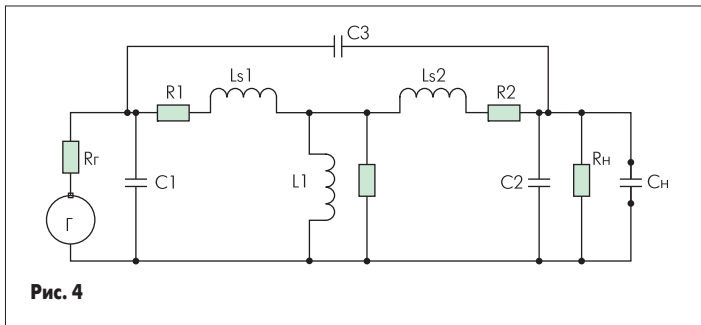
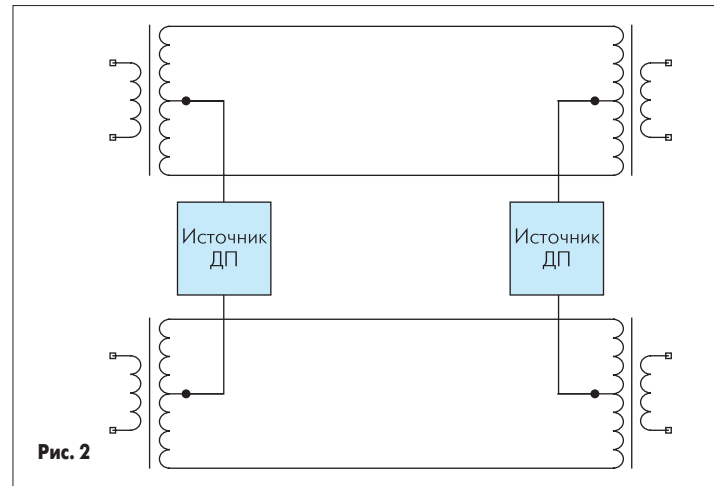
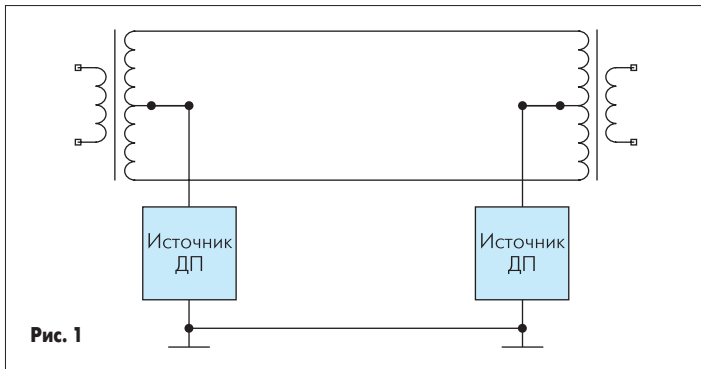
Широкополосные трансформаторы классифицируются:

- по выполняемой функции:
 - согласующие;
 - развязывающие;
 - симметрирующие;
- по назначению:
 - потоковые (для передачи цифровых потоков, например E1);
 - стыковые;
 - интерфейсные;
 - линейные (предназначенные для работы с линией связи);
 - трансформаторы ISDN, SHDSL, ADSL и т.д. (предназначенные для работы в составе соответствующей аппаратуры);
- по месту использования в устройстве, например:
 - входные;
 - выходные;
 - межкаскадные;
- по диапазону частот:
 - низкочастотные;
 - звуковые;
 - ультразвуковые;
 - высокочастотные.

Классификация трансформаторов достаточно условна, так как одно и то же изделие может выполнять или одну, или сразу несколько функций, например, согласовывать выходное сопротивление источника сигнала и сопротивление нагрузки, и в то же время осуществлять гальваническую развязку и симметрирование. Классификация по другим признакам также условна. Один и тот же трансформатор может применяться в различной аппаратуре, использоваться на входе и на выходе и т. д.

Широкополосные трансформаторы могут быть маломощными, предназначенными для передачи сигналов небольших уровней (сигнальные трансформаторы). Они могут быть и мощными, используемыми для передачи относительно больших уровней мощности (например, выходные трансформаторы усилителей мощности звуковой частоты, выходных каскадов мощных широкодиапазонных радиопередатчиков, ультразвуковых генераторов).

Трансформаторы могут работать как без подмагничивания, так и с подмагничиванием постоянной составляющей тока. В первом случае трансформатор выполнить проще, его магнитопровод не имеет немагнитного зазора, легче получить заданные параметры. Постоянная составляющая тока появляется либо из-за наличия ее в поступающем на первичную обмотку сигнале, либо в случае передачи через обмотки трансформатора тока дистанционного питания. Ток дистанционного питания (ДП) может подаваться несколькими способами. Если ток ДП подается в среднюю точку обмотки (рис. 1 для двухпроводной линии и рис. 2 для четырехпроводной линии), то он не создает поля, подмагничивающего сердечник, так как при симметрии обеих половин обмотки поля от тока ДП взаимно компенсируются. Этот ток лишь нагревает обмотку, что учитывается при выборе диаметра провода. При фантомном подключении ДП в двухпроводную линию (рис. 3) ток ДП, проходя по обеим половинам обмотки, создает магнитные поля, которые складываются, так как по отношению к этому току обе половины обмотки включены согласно. Для предотвращения насыще-



ния сердечника и появления нелинейных искажений он должен быть выполнен с немагнитным зазором.

Рассмотрим влияние параметров трансформатора на его работу.

Эквивалентная схема трансформатора с подключенным источником сигнала и нагрузкой приведена на рис. 4.

Здесь:

- R_r — внутреннее (выходное) сопротивление источника сигнала (генератора);
- R_1 — активное сопротивление первичной обмотки;
- R_{Π} — сопротивление, эквивалентное потерям в магнитопроводе;
- $R_2 = R_2/n^2$ — приведенное к первичной обмотке активное сопротивление вторичной обмотки, где $n = W_2/W_1$ — коэффициент трансформации;
- $R_H = R_H/n^2$ — приведенное сопротивление нагрузки;
- C_1 — собственная емкость первичной обмотки;
- $C_2 = n^2 C_2$ — приведенная собственная емкость вторичной обмотки;
- C_3 — межобмоточная емкость;
- $C_H = n^2 C_H$ — приведенная емкость нагрузки;
- L_1 — индуктивность первичной обмотки (индуктивность намагничивания);
- L_{S1} — индуктивность рассеяния первичной обмотки;
- $L_{S2} = L_{S2}/n^2$ — приведенная индуктивность рассеяния вторичной обмотки.

Единственным принципиально необходимым элементом схемы, кроме генератора с его внутренним сопротивлением и нагрузкой с ее параметрами, является индуктивность намагничивания трансформатора, все остальные его параметры (элементы эквивалентной схемы) являются паразитными.

Идеальный трансформатор, в котором индуктивность намагничивания L_1 и сопротивление потерь R_{Π} равны бесконечности, а сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток, а также их собственные емкости

и межобмоточная емкость равны нулю, передает сигнал от источника в нагрузку без потерь мощности и без искажений в частотном диапазоне, охватывающем весь спектр сигнала. Для максимальной передачи мощности сигнала в нагрузку и для исключения отражений идеальный трансформатор должен иметь такой коэффициент трансформации, чтобы выполнялось условие:

$$R_H = R_r$$

откуда можно рассчитать коэффициент трансформации:

$$n = \sqrt{\frac{R_H}{R_r}}$$

Реальный трансформатор не обеспечивает идеальной передачи сигнала из-за неизбежного наличия потерь и паразитных параметров. Для максимального приближения к идеалу необходимо стремиться к их минимизации, однако в разумных пределах, чтобы не увеличивать стоимость и габариты изделий. Кроме того, необходимо учитывать, что улучшение одних характеристик может привести к ухудшению других. Поэтому трансформатор, разработанный для конкретных технических требований, является компромиссным решением, оптимальным для данного применения.

Потери в магнитопроводе складываются из потерь на гистерезис, потерь на вихревые токи и дополнительных потерь. Снижение потерь на гистерезис достигается выбором материала магнитопровода с узкой петлей гистерезиса. Снижение потерь на вихревые токи достигается выбором материала с высоким сопротивлением или тонколистового материала. В широкополосных трансформаторах широкое применение находят ферриты (особенно высокопроницаемые), тонколистовая электротехническая сталь и аморфные сплавы.

Увеличение индуктивности первичной обмотки (индуктивности намагничивания) улуч-

шает передачу сигнала на нижних частотах диапазона, однако ее невозможно сделать бесконечно большой. Кроме того, при увеличении индуктивности за счет увеличения числа витков возрастает активное сопротивление и собственная емкость обмотки, а также пропорционально растут сопротивления и емкости вторичных обмоток и индуктивности рассеяния. Это снижает резонансные частоты трансформатора и приводит к сужению полосы пропускания в области верхних частот. Поэтому выбор индуктивности намагничивания является компромиссом. Как видно из эквивалентной схемы, индуктивность первичной обмотки образует с выходным сопротивлением источника сигнала частотно-зависимый делитель напряжения, поэтому в зависимости от заданной величины рабочего затухания и рабочего диапазона частот она выбирается из соотношения:

$$2\pi f_H L_1 = (4 \dots 10) R_r$$

где f_H — нижняя частота рабочего диапазона. Отсюда:

$$L_1 = \frac{(4 \dots 10) R_r}{2\pi f_H}$$

Причем значение 10 берется для более низких частот, например, звуковых, а 4 — для более высоких, например, для частот радиодиапазона при $R_r = (50 \dots 75)$ Ом.

Допустимые сопротивления обмоток определяются исходя из допустимой величины рабочего затухания на средней частоте рабочего диапазона.

Индуктивности рассеяния, емкости обмоток и межобмоточная емкость влияют на параметры трансформатора на верхней частоте рабочего диапазона частот. При разработке они обычно не рассчитываются, так как точность расчетов невысока, и проще изготовить макет и на нем снять реальные амплитудно-частотные характеристики.

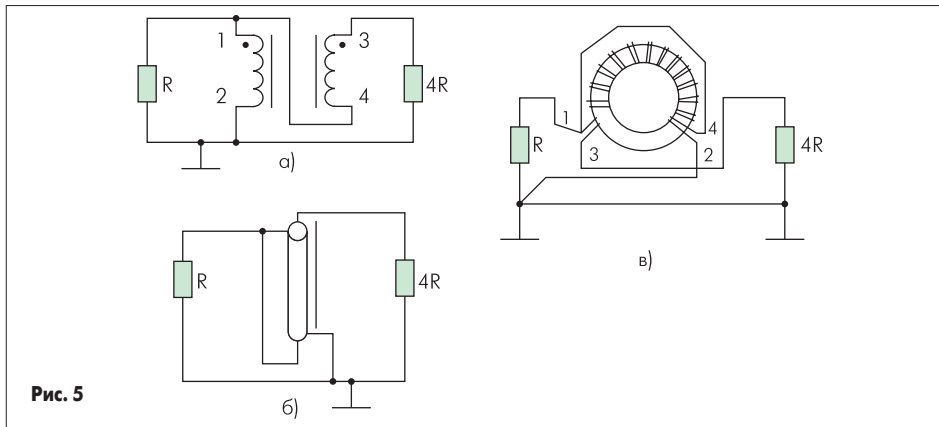


Рис. 5

При работе трансформатора в звуковом диапазоне частот с не очень широкой полосой пропускания (около одной декады) специальные меры по снижению индуктивности рассеяния, собственных и межобмоточных емкостей не применяются. Так выполнен широко известный трансформатор ТРС2-1. С расширением рабочего диапазона частот и смещением его в высокочастотную область придется применять сложные методы намотки, позволяющие уменьшить индуктивности рассеяния и паразитные емкости. При этом трудоемкость изготовления и стоимость трансформатора, естественно, возрастают, но зато получаются требуемые параметры.

При достаточно широкой полосе частот и высоких частотах с успехом могут применяться трансформаторы на длинных линиях с распределенными параметрами. Пример такого согласующего трансформатора с коэффициентом трансформации по напряжению

2:1, а по сопротивлению 4:1, выполненного в двух вариантах — на длинной линии в виде витой пары, намотанной на ферритовое кольцо, и на коаксиальной линии — представлен на рис. 5а и 5б соответственно, а укладка обмотки и соединение выводов показаны (условно) на рис. 5в.

При необходимости расширения диапазона в области высоких частот дополнительно могут применяться цепи частотной компенсации на входе и выходе трансформатора.

Специалисты ООО «Балтэлектронкомплект» разрабатывают и внедряют в производство любые широкополосные трансформаторы на самые различные диапазоны частот от звуковых частот до СВЧ.

Исходными данными для разработки широкополосных трансформаторов являются следующие параметры:

- диапазон рабочих частот ($f_H \dots f_B$) и затухание на краях диапазона;

- выходное сопротивление источника сигнала (или волновое сопротивление линии);
- сопротивление нагрузки (или волновое сопротивление линии при работе на линию);
- может быть задан коэффициент трансформации;
- затухание асимметрии (для симметрирующих трансформаторов);
- затухание нелинейности или коэффициент гармоник (при необходимости);
- электрическая прочность изоляции;
- сопротивление обмоток или рабочее затухание;
- индуктивность первичной обмотки или любой из обмоток (при необходимости);
- собственные емкости обмоток и межобмоточные емкости.

Таким образом, широкополосные трансформаторы являются почти идеальными (и почти единственными) элементами, позволяющими согласовывать источники сигналов и нагрузки, аппаратуру и соединительные линии; они используются как на входах, так и на выходах, широко применяются в самых различных видах радиоэлектронной аппаратуры.

Литература

1. ОСТ4.ГО.012.013. Трансформаторы для аппаратуры проводной связи. Типовой расчет.
2. ОСТ4.473.002. Трансформаторы сигнальные и дроссели аппаратуры связи. Методы измерения основных параметров.
3. Справочное пособие по высокочастотной схемотехнике: схемы, блоки, 50-омная техника. Пер. с нем. М. «Мир». 1990.