

РЧ-ТРАНСФОРМАТОРЫ: ПРИНЦИП РАБОТЫ, РАЗНОВИДНОСТИ, ПРИМЕНЕНИЕ

МАКСИМ ГОНЧЕНКОВ, инженер

В статье описывается принцип работы трансформатора, рассматриваются основные типы трансформаторов и сферы их применения.

Трансформатор представляет собой две или более проводящих линии, соединенные между собой магнитным полем. При появлении в сердечнике переменного магнитного потока, обусловленного изменением тока в первичной обмотке, во вторичной обмотке возникает ЭДС, величина которой напрямую зависит от количества витков в обмотках.

У трансформатора могут иметься дополнительные выводы и обмотки, у которых в общем случае – разные коэффициенты трансформации. Благодаря такой гибкости РЧ-трансформаторы обладают разными характеристиками и широко используются в СВЧ-технике.

Одна из широко применяемых конфигураций трансформатора представляет собой два или более проводов, обмотанных вокруг магнитного сердечника (в приложениях с более высокой частотой используется воздушный сердечник). Одним из наиболее важных параметров трансформаторов является отношение количества витков. Среди приложений, в которых применяются РЧ-трансформаторы, можно выделить:

- преобразование импеданса для согласования;
- повышение или понижение напряжения или тока;
- соединение симметричной и несимметричной схем;
- большее ослабление синфазного сигнала;
- обеспечение развязки по постоянному сигналу между схемами;
- обеспечение постоянного тока в некоторых сегментах схемы.

Существует несколько технологий исполнения трансформаторов, к которым относятся сердечник с обмоткой; трансформаторы на линиях передачи; трансформаторы, изготовленные из низкотемпературной совместно обжигаемой керамики (LTCC), монолитные

устройства (ММИС). Все они выпускаются в разных корпусах и с разными характеристиками.

ПРИНЦИП РАБОТЫ

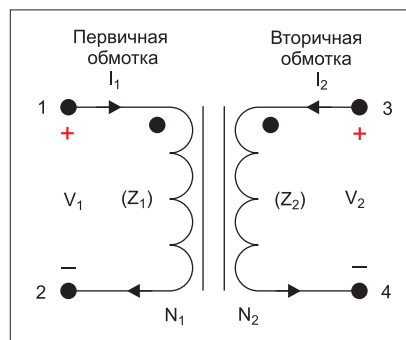


Рис. 1. Структура идеального трансформатора

На рисунке 1 показана модель идеального трансформатора. Порты 1 и 2 являются входами первичной обмотки, порты 3 и 4 – выходами вторичной обмотки. По закону Фарадея ток в первичной обмотке создает магнитный поток через сердечник, который наводит пропорциональный ток и напряжение во вторичной обмотке. Напряжение и ток пропорциональны отношению витков в обмотках или магнитной связи между обмотками и сердечником. Следовательно, вторичный импеданс определяется квадратом отношения

обмоток, умноженным на импеданс первичной обмотки:

$$n = \frac{N_2}{N_1}, V_2 = nV_1, I_2 = \frac{I_1}{n},$$

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1}, Z_2 = \frac{V_2}{I_2}, Z_2 = n^2 Z_1, (1)$$

где I_1, V_1 и Z_1 – ток, напряжение и импеданс в первичной обмотке; I_2, V_2 и Z_2 – те же параметры вторичной обмотки; N_1 и N_2 – количество витков в первичной и вторичной обмотках, соответственно.

В реальном трансформаторе также имеется несколько паразитных элементов. Оно могут быть и собственными, и взаимными. На рисунке 2 показана модель неидеального трансформатора с сосредоточенными параметрами, а также паразитное сопротивление, индуктивность обмоток, резистивные потери в сердечнике и активная индуктивность намоток. Из-за паразитных связей полоса пропускания трансформатора сокращается, возрастают вносимые потери (см. рис. 3). Характеристики трансформатора также зависят от частоты, температуры и мощности. Нижняя частота среза определяется активной индуктивностью намотки, верхняя – емкостью намотки и емкостной связью между намотками.

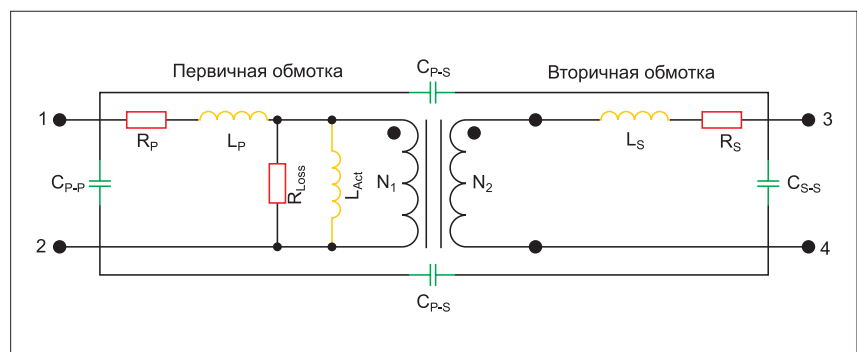


Рис. 2. Модель трансформатора с паразитными элементами

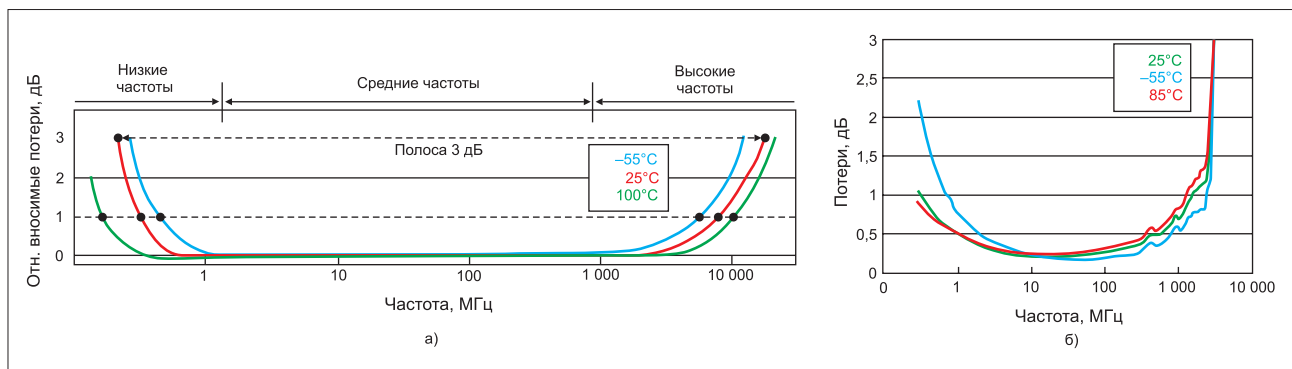


Рис. 3. Теоретический частотный отклик трансформатора (а), результаты измерения (б)

Вносимые потери в рабочей полосе складываются из омических потерь в первичной, вторичной намотках и энергии, рассеянной в сердечнике. Поскольку омические потери зависят от частоты и температуры, они ограничивают показатели работы трансформатора. В некоторых трансформаторах присутствует также индуктивность рассеяния, обусловленная неполной связью между обмотками. Поскольку реальная часть этой индуктивности пропорциональна частоте, эти паразитные элементы приводят к возникновению обратных потерь на высоких частотах и увеличению вносимых потерь в нижней границе диапазона.

Более сложные трансформаторы, например с несколькими намотками, дополнительными выводами и элементами, могут обладать динамическими характеристиками. Например, согласующий трансформатор служит для соединения симметричной (с дифференциальным сигналом) и несимметричной схемы. Он обеспечивает согласование импедансов.

В то же время трансформаторы применяются для соединения двух несимметричных схем. С этой целью заземляется один конец первичной обмотки. Несимметричные сигналы, поступающие в первичную несимметричную обмотку, вызывают дифференциальный выходной сигнал во вторичной обмотке.

При использовании магнитного сердечника, обычно ферромагнитного, появляется еще несколько паразитных элементов: индуктивность намагничивания сердечника ограничивает нижнюю частоту работы трансформатора и приводит к увеличению обратных потерь. Она зависит от магнитной проницаемости, поперечного сечения сердечника и количества обмоток. Магнитная проницаемость сердечника зависит от температуры. Если зависимость прямая, вносимые потери на низких частотах увеличиваются.

ВИДЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Двумя основными типами трансформаторов на дискретных компонентах являются трансформаторы, выполненные в виде сердечника с обмоткой или на линиях передачи. Кроме того, широко применяются компактные трансформаторы LTCC и MMIC.

Трансформаторы с сердечником и обмоткой изготавливаются путем наматывания проводника, как правило, медного провода с изоляцией, вокруг магнитного сердечника (тороида).

Вторичных обмоток может быть несколько. Иногда также имеется вывод средней точки для дополнительных функций. На рисунке 4 показан трансформатор с тороидальным магнитным сердечником и медной обмоткой с изоляцией. Благодаря природе индуктивных связей между обмоткой и сердечником трансформаторы меньшего размера работают быстрее. Например, путем подбора длины линии передачи обеспечивается согласование импедансов между двумя несогласованными нагрузками.

Некоторые трансформаторы в линиях передачи представляют собой проводник с изоляцией, намотанный на ферритный сердечник. Они относятся к типу трансформаторов с обмоткой.

Трансформатор в линии передачи состоит из линии передачи с двумя проводниками. Первый подключен к генератору и нагрузке, второй – к выходу первой линии и земле (см. рис. 5). Протекающий через нагрузку ток в два раза превышает ток через генератор; напряжение V_0 равно половине V_1 .

Когда сопротивление нагрузки равно четверти сопротивления, видимого со стороны генератора, коэффициент преобразования равен 1:4:

$$V_0 = \frac{V_1}{2}, R_G = \frac{V_1}{I_1},$$

$$R_L = \frac{V_0}{2I_1} = \frac{V_1/2}{2I_1} = \frac{R_G}{4}. \quad (2)$$

Наиболее распространенной формой трансформатора на линиях передачи является четвертьволновой. В этой топологии характеристическое сопротивление обеспечивает согласование входного импеданса и импеданса нагрузки. Длина четвертьволнового трансформатора определяется рабочей частотой, а полоса пропускания ограничена октавой вокруг центральной частоты. На рисунке 6 показана линия передач без потерь с характеристическим импедансом Z_0 и длиной L . Эта линия находится между входным



Рис. 4. Внешний вид трансформатора с проволочной обмоткой, намотанной на магнитный сердечник

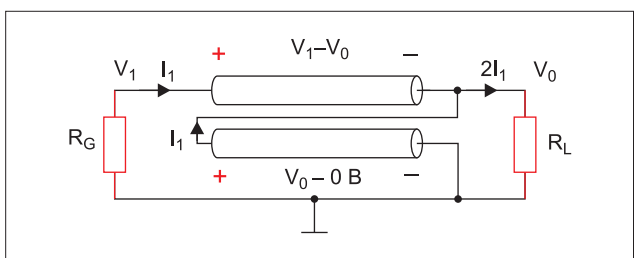


Рис. 5. Функциональная схема идеального трансформатора на линии передачи

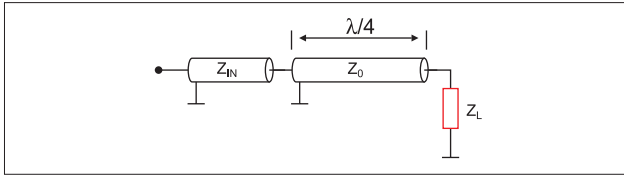


Рис. 6. Трансформатор на четвертьволновой линии передачи



Рис. 7. LTCC-трансформатор

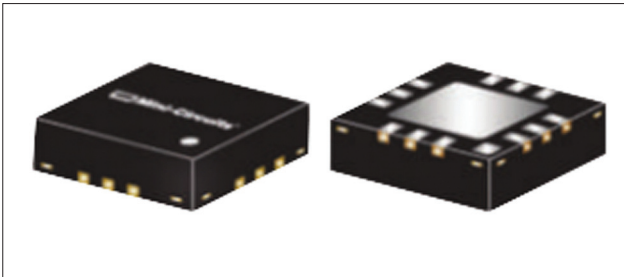


Рис. 8. Монолитный трансформатор

импедансом Z_{IN} и импедансом нагрузки Z_L . Характеристический импеданс четвертьволновой линии передачи Z_0 , обеспечивающий согласование Z_{IN} и Z_L , рассчитывается следующим образом:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad Z_{IN} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \operatorname{tg} \beta L}{Z_0 + jZ_L \operatorname{tg} \beta L},$$

$$L: \frac{\lambda}{4} Z_{IN} = \frac{Z_0^2}{Z_L}, \quad Z_0 = \sqrt{Z_{IN} Z_L}. \quad (3)$$

Одним из преимуществ трансформаторов на линиях передачи является широкая полоса частот по сравнению с трансформаторами с сердечником и проволочной обмоткой. Это преимущество обеспечивается за счет меньшей паразитной емкости между витками и меньшей индуктивностью рассеяния.

ТРАНСФОРМАТОРЫ LTCC

Трансформаторы LTCC представляют собой многослойные компоненты, изготовленные на керамической подложке. В них используются емкостные связанные линии, работающие как линии передачи, которые обеспечивают преобразование импеданса и сигнала из несимметричного в симметричный. Трансформаторы данного типа могут работать на более высоких частотах, чем ферромагнитные. Тем не менее они могут проигрывать в низкочастотном диапазоне. Достоинствами керамических трансформаторов являются малый размер, продолжительный срок службы, высокая надежность (см. рис. 7).

ТРАНСФОРМАТОРЫ MMIC

Как и керамические, MMIC-трансформаторы изготавливаются в планарном виде. Как правило, спиральные индуктивные

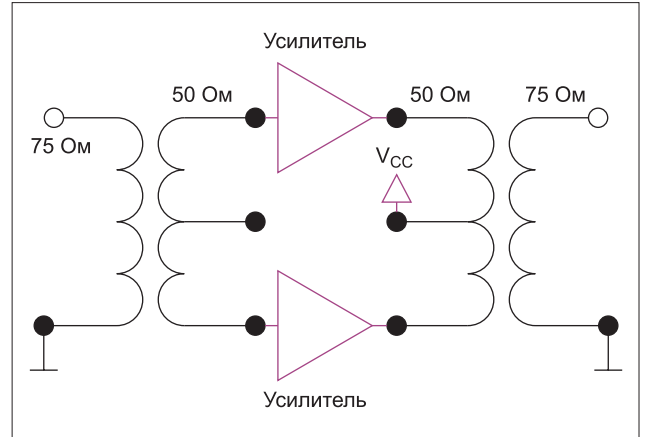


Рис. 9. Схема согласующего трансформатора на 75 Ом

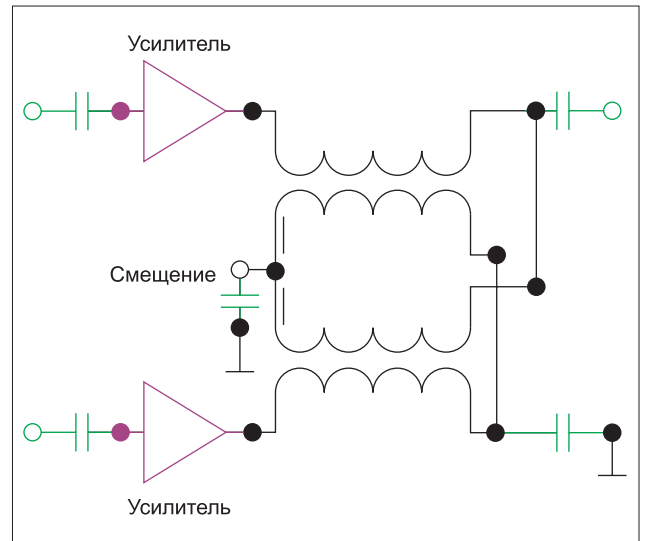


Рис. 10. Использование трансформатора с центральной точкой для замены инжекторов постоянного тока

элементы печатаются на подложке в конфигурации с двумя параллельными линиями передачи.

Монолитные трансформаторы изготавливаются также из арсенида галлия (см. рис. 8). Литографический процесс обеспечивает высокую воспроизводимость устройств, отличные показатели работы и тепловой КПД.

ПРИМЕНЕНИЕ РЧ-ТРАНСФОРМАТОРОВ

Сфера применения РЧ-трансформаторов широка. Согласующие трансформаторы предназначены для согласования импедансов, повышения или понижения напряжения питания. При отсутствии согласования затрудняется передача энергии, возникают отражения сигнала (см. рис. 9).

Вторым важным назначением является соединение между собой симметричной и несимметричной цепей. Для согласования импедансов несимметричных линий применяется автотрансформатор. Еще одной важной функцией РЧ-трансформаторов является сдвиг уровня и развязка цепей. Они обеспечивают развязку по постоянному сигналу между первичной и вторичной обмотками в схемах, где требуется защитить отдельные сегменты от постоянного сигнала. Если в части схемы требуется постоянный сигнал, следует воспользоваться двумя трансформаторами с центральной точкой (см. рис. 10).

Наконец, трансформаторы позволяют удалить постоянную составляющую в дифференциальных схемах, а также широко применяются для фильтрации ВЧ-компонентов сигнала. \Rightarrow