

## Применение согласующих трансформаторов в электронной аппаратуре

*Дмитрий Андронников*

Тенденции по снижению себестоимости электронной техники в последнее десятилетие привели к сокращению объемов применения сигнальных и силовых трансформаторов. На смену им во многих случаях пришли импульсные источники питания, интегральные микросхемы гальванических развязок. Однако полноценной (или какой – либо вообще) замены классическим трансформаторам в целом ряде применений не существует, о чем свидетельствует присутствие на рынке многих фирм – производителей сигнальных и силовых трансформаторов как стандартных, так и специальных типов.

На примере номенклатуры одной из фирм – производителей трансформаторов рассмотрим области и особенности применения, в которых классические трансформаторы либо вообще незаменимы, либо замена их на какие-либо иные устройства сопряжена с ухудшением качества и потребительских свойств изделия.

Электрический трансформатор известен человечеству вторую сотню лет и является одним из первых электрических приборов в его истории. Условное изображение трансформатора на электрических схемах приведено на рис. 1:

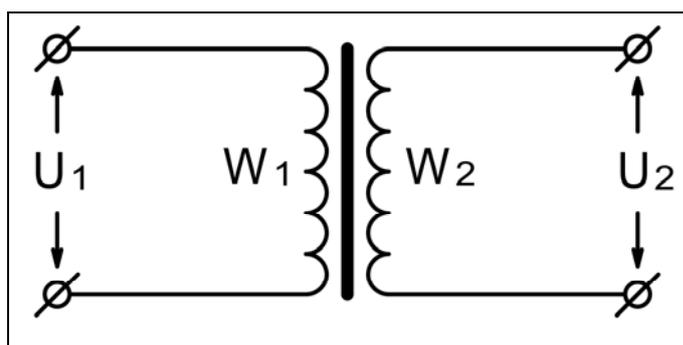


Рис. 1

Условное изображение трансформатора на схемах

Работа трансформатора основана на явлении электромагнитной индукции. На одну из обмоток, называемую первичной обмоткой, подается напряжение от внешнего источника. Протекающий по первичной обмотке переменный ток создает переменный магнитный поток в магнитопроводе. Благодаря электромагнитной индукции, переменный магнитный поток в магнитопроводе создает во всех обмотках, в том числе и в первичной, ЭДС индукции пропорциональную первой производной магнитного потока. Когда вторичные обмотки не подключены (режим холостого хода), ЭДС индукции в первичной обмотке практически полностью компенсирует напряжение источника питания, поэтому ток через первичную обмотку невелик, и определяется в основном её индуктивным сопротивлением. Напряжение индукции на вторичных обмотках в режиме холостого хода определяется отношением числа витков соответствующей обмотки  $W_2$  к числу витков первичной обмотки  $W_1$ :

$$U_2 = U_1 \times (W_2 / W_1) \quad (1)$$

При подключении нагрузки к вторичной обмотке, по ней начинает протекать ток. Этот ток также создает магнитный поток в магнитопроводе, направленный встречно магнитному потоку, создаваемому первичной обмоткой. В результате, в первичной

обмотке нарушается компенсация ЭДС индукции и ЭДС источника питания, что приводит к увеличению тока до тех пор, пока магнитный поток не достигнет практически прежнего значения. В этом режиме отношение токов первичной и вторичной обмотки равно обратному отношению числа витков обмоток:

$$I_1 = I_2 \times (W_2 / W_1) \quad (2)$$

отношение напряжений в первом приближении также остаётся прежним. В результате, мощность, потребляемая от источника в цепи первичной обмотки практически полностью передаётся во вторичную.

Конечно, указанные выше соотношения справедливы лишь для идеального трансформатора, в реальных изделиях существует множество факторов, их нарушающих (в частности, потери в активном сопротивлении обмоток, потери за счет токов Фуко в металле магнитопровода, потери намагничивания и ряд других), но они в большинстве случаев невелики и не влияют на принципиальное следствие, вытекающее из приведенных формул. А следствие это весьма важное, поскольку определяет практически всю область применения трансформаторов, как согласующих приборов, – сопротивление цепи по переменному току, подключенной к одной из обмоток, будет пересчитано во вторую, как:

$$Z_2 = Z_1 \times (W_2/W_1)^2 \quad (3)$$

Поскольку обмотки трансформатора не имеют непосредственной связи друг с другом, это дает возможность согласовывать сопротивления источников и приемников сигналов, уровни входных и выходных напряжений и токов устройств, находящихся под разными потенциалами.

Категория согласующих трансформаторов чрезвычайно обширна, и перечислить все возможные варианты их применений практически невозможно. Поэтому уделим внимание согласующим трансформаторам, работающим в звуковом диапазоне частот, как исторически первым представителям данной группы, а также кратко коснемся импульсных трансформаторов малой мощности.

Трансформаторы данной группы можно условно разделить на 4 категории:

### ***1. Входные трансформаторы.***

Они, в основном, предназначены для согласования низкого выходного сопротивления ряда источников сигнала (микрофон, звукосниматель с подвижной катушкой, и т. п.) с высоким входным сопротивлением усилительного устройства. Кроме того, применение входного трансформатора позволяет существенно улучшить шумовые характеристики устройства. Для каждого усилительного каскада или усилителя в целом наилучший уровень шума достигается в том случае, когда эквивалентное шумовое сопротивление входной цепи усилителя равно внутреннему сопротивлению источника сигнала [1].

Для конкретного типа усилителя этот параметр можно вычислить по формуле:

$$R_{ш} = E_{ш} / I_{ш} \quad (4)$$

где  $E_{ш}$  – средняя спектральная плотность входного шумового напряжения усилителя, В/ $\sqrt{\text{Гц}}$

$I_{ш}$  - средняя спектральная плотность входного шумового тока усилителя, А/ $\sqrt{\text{Гц}}$

Обычно эквивалентное шумовое сопротивление большинства операционных усилителей (и их дискретных аналогов) лежит в пределах от единиц до десятков кОм. Учитывая то, что внутреннее сопротивление низковольтных источников сигнала, в частности, динамических микрофонов, обычно составляет десятки – сотни Ом, то можно сделать вывод, что при работе с подобными источниками сигнала шумовые свойства большинства усилительных схем, в особенности, выполненных на ОУ, даже малошумящих типов, будут далеки от оптимальных. Решить проблему согласования сопротивлений позволяет применение входного трансформатора, коэффициент трансформации которого можно определить по формуле:

$$N = W_2 / W_1 = \sqrt{R_{ш} / R_{и}} \quad (5)$$

где  $R_{ш}$  – эквивалентное шумовое сопротивление входной цепи усилителя, Ом  
 $R_{и}$  – внутреннее сопротивление источника сигнала, Ом

Для типового сопротивления динамического микрофона 150 Ом и шумового сопротивления ОУ 5ком (напр., ОР27, ОР37) оптимальный коэффициент трансформации будет порядка 5...7 раз. Примером такого трансформатора может служить прибор типа LL1636 производства Lundahl. Этот трансформатор имеет 4 первичные и две вторичные обмотки, расположенные на двух катушках П - образного магнитопровода, изготовленного из аморфного металлического материала, обладающего высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями. Коммутируя обмотки соответствующим образом, можно получать коэффициенты трансформации от 5 до 20. Схема возможного варианта микрофонного усилителя, представляющего вариант устройства, описанного в [2] с применением трансформатора LL1636 приведена на рис.2:

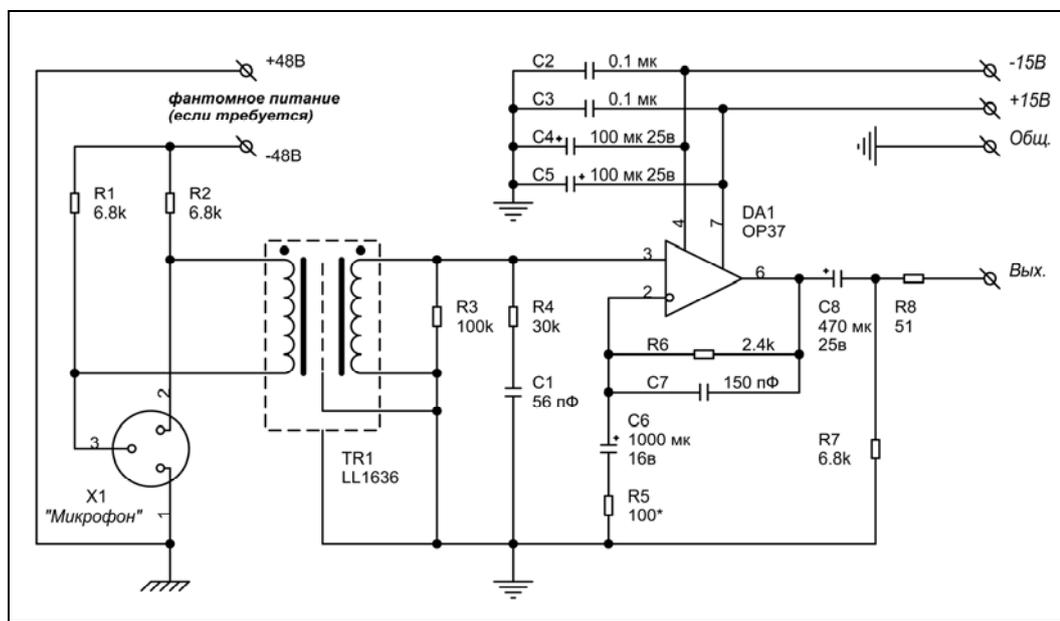


Рис. 2

Микрофонный усилитель с трансформаторным входом

Наличие гальванической развязки между первичной и вторичной обмотками трансформатора позволяет использовать различные типы микрофонов, в том числе конденсаторные, требующие постоянного высокого поляризационного потенциала, без опасений за работоспособность усилительного каскада.

Еще одно преимущество трансформаторного входа микрофонного усилителя заключается в практически полной нечувствительности к синфазным помехам на входе,

особенно при использовании специальных симметричных трансформаторов. Подавление синфазной помехи в усилителе с симметричным трансформаторным входом может достигать 100дБ в диапазоне звуковых частот, что означает возможность передачи малых сигналов на относительно большие расстояния практически без увеличения уровня помех в выходном сигнале. Это свойство широко используется в концертной и студийной технике звукозаписи и звукоусиления при работе в условиях высокого уровня помех от питающей сети, светового и усилительного оборудования, компьютеров и т.п.

## 2. Разделительные и согласующие трансформаторы.

В технике звукоусиления и звукозаписи достаточно часто приходится передавать аналоговые сигналы небольших уровней на значительные расстояния. Применение согласующих симметричных трансформаторов является зачастую единственным способом передачи малых сигналов в условиях больших внешних помех. Передача сигнала по симметричной линии в дифференциальном виде и его прием с помощью балансного трансформатора позволят добиться подавления синфазных помех до 60...100 дБ в сочетании с гальванической развязкой источника и приемника сигнала, гарантирующей отсутствие замкнутых контуров общего провода и абсолютно надежную и безопасную работу при наличии потенциалов до сотен вольт между устройствами.

Типовая структурная схема дифференциальной линии передачи сигнала приведена на рис.3:

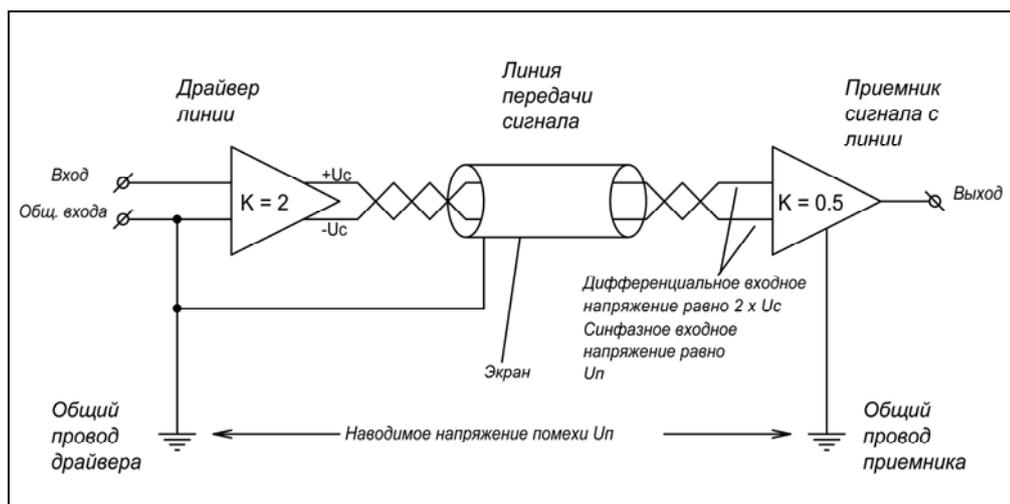


Рис. 3

Дифференциальная линия передачи сигнала

При использовании на выходе источника и на входе приемника трансформаторов, напряжение помехи и / или потенциал  $U_p$  может достигать нескольких сотен вольт. Такой уровень синфазных помех и потенциалов недопустим практически ни в каких бестрансформаторных схемах.

Возможная реализация дифференциального приемника сигнала линии, предложенная в [3], представлена на рис.4:

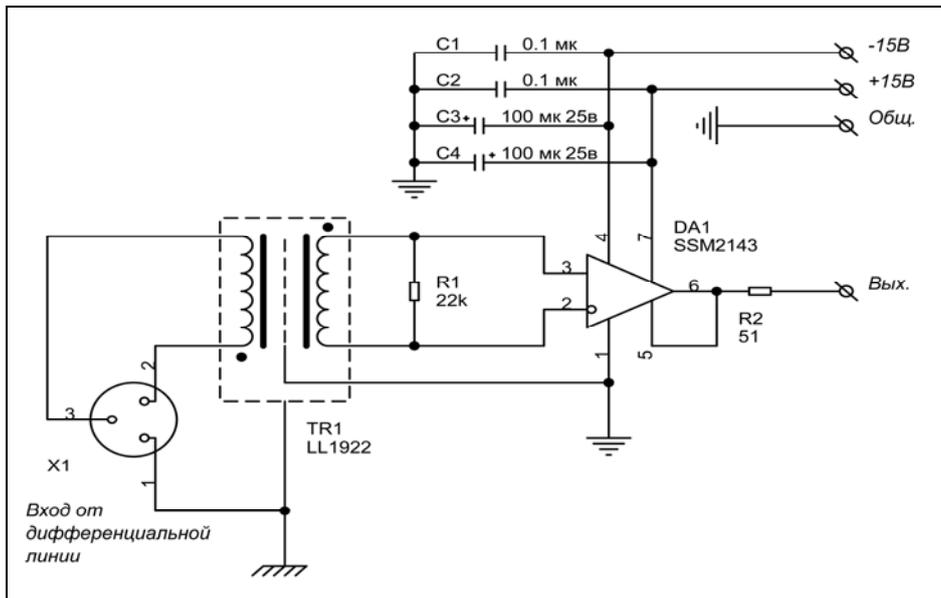


Рис. 4

Приемник сигнала с дифференциальной линии

При работе схемы с трансформатором JT-11P (Jensen) или LL1540, LL1922 (Lundahl) подавление синфазной помехи на частоте 50Гц при работе от дифференциальной линии может составлять порядка 130дБ, что означает возможность практически полного устранения фона переменного тока даже в линиях передачи длиной десятки метров.

Работа усилительного устройства на такие длинные линии связана с рядом сложностей. Для получения максимального отношения сигнал / помеха, напряжение полезного сигнала в линии должно быть по возможности большим, а сопротивление нагрузки линии минимальным. Стандартная величина сопротивления нагрузки линий, принятая в профессиональной технике звукоусиления принята равной 600 Ом. При напряжении сигнала 7В это означает, что мощность, которую должен развивать драйвер, составляет порядка 70...100мВт. При этом искажения сигнала во всем рабочем диапазоне частот (обычно 20...20000Гц) должны быть минимальными, во всяком случае, не превышать нескольких сотых долей процента.

Простейший вариант схемы драйвера линии с трансформаторным выходом приведен на рис.5:

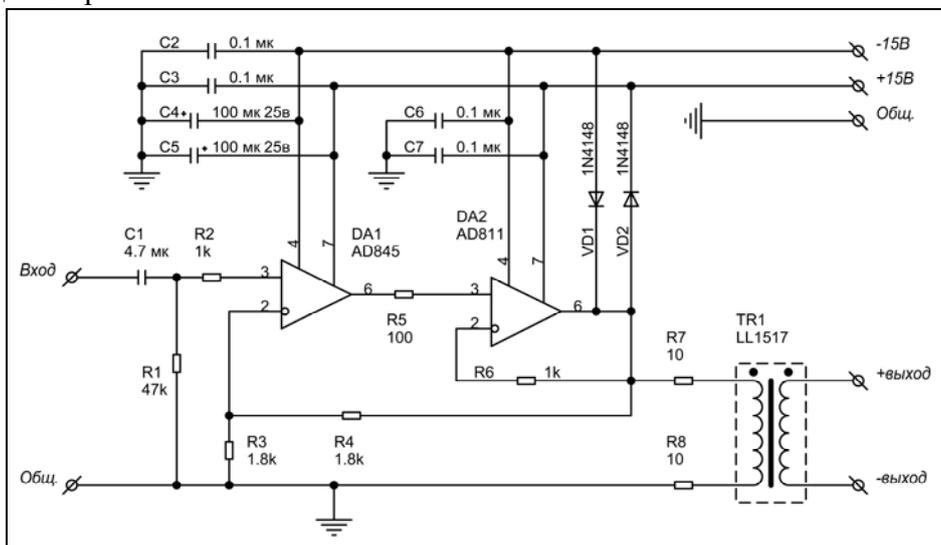
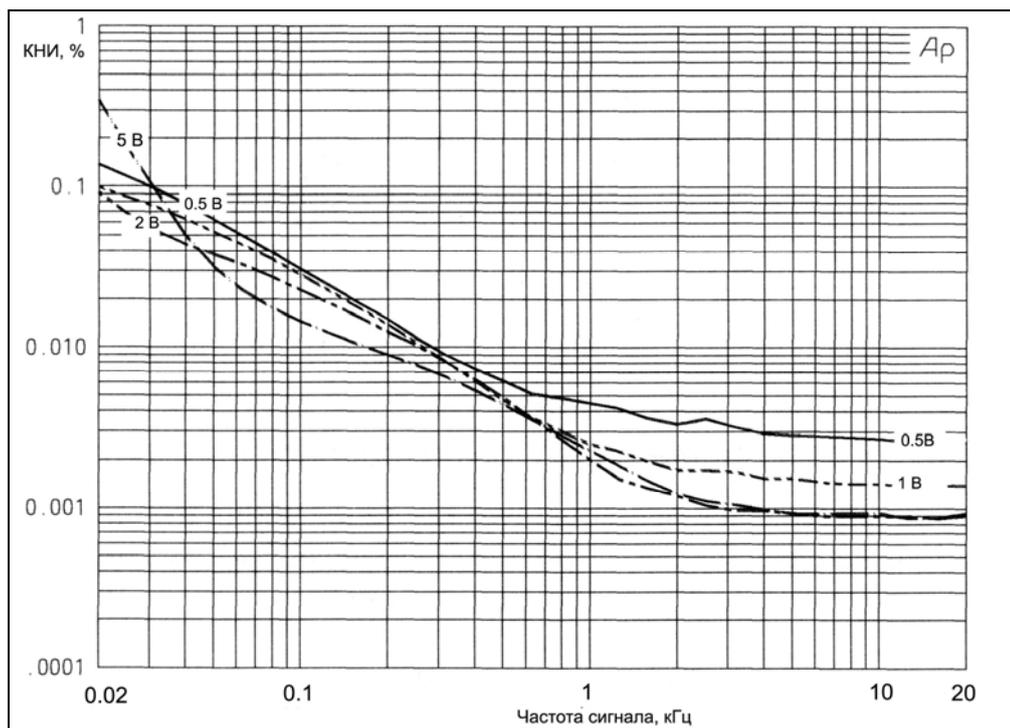


Рис. 5

Драйвер дифференциальной линии с трансформаторным выходом

В качестве усилительного элемента драйвера используется так называемый «композитный усилитель» [4], который обладает как отличными параметрами для постоянного тока (низкое напряжение смещения, малый дрейф, высокое входное сопротивление, - их величину определяют свойства ОУ DA1), так и высоким качеством выходного каскада (большой выходной ток, низкие искажения при работе на низкоомную нагрузку, характерные для ОУ DA2). При очевидных достоинствах такой схемы, как простота и возможность применения различных трансформаторов, у нее есть очень существенный недостаток, – сильный рост искажений сигнала с понижением его частоты (см. зависимость уровня искажений трансформатора LL1517 от частоты и напряжения сигнала на рис.6):



**Рис. 6**

Зависимость искажений трансформатора LL1517 от частоты и амплитуды сигнала

Этот рост искажений связан с физикой работы трансформатора, т.е. увеличением индукции в магнитопроводе по мере снижения частоты сигнала и соответствующим заходом магнитного потока в нелинейную область характеристики намагничивания. С этим явлением можно бороться путем увеличения физических размеров магнитопровода, т.е. увеличением его активного объема, что приводит к росту габаритов и стоимости трансформатора, его распределенной и межобмоточной емкости и, как результат, ухудшению параметров на высоких частотах.

Оригинальное и изящное решение этой проблемы было предложено в [5]. На рис. 7 представлена принципиальная схема драйвера линии с трансформаторным выходом, обладающего малыми искажениями в области низких частот. Принцип действия схемы основан на том, что кроме основной цепи ООС, усилитель охвачен дополнительной обратной связью, сигнал которой снимается с резистора, включенного в цепь первичной обмотки выходного трансформатора. Напряжение на этом резисторе пропорционально току первичной обмотки и в точности повторяет его форму. Сигнал этой обратной связи заводится в цепь неинвертирующего входа ОУ, и она является положительной. Для получения наилучших результатов с точки зрения уровня искажений, необходимо выдержать следующее соотношение:

$$R_{\text{п}} / R_5 = R_3 / R_1 \quad (6)$$

где  $R_{\text{п}}$  – активное сопротивление первичной обмотки, Ом

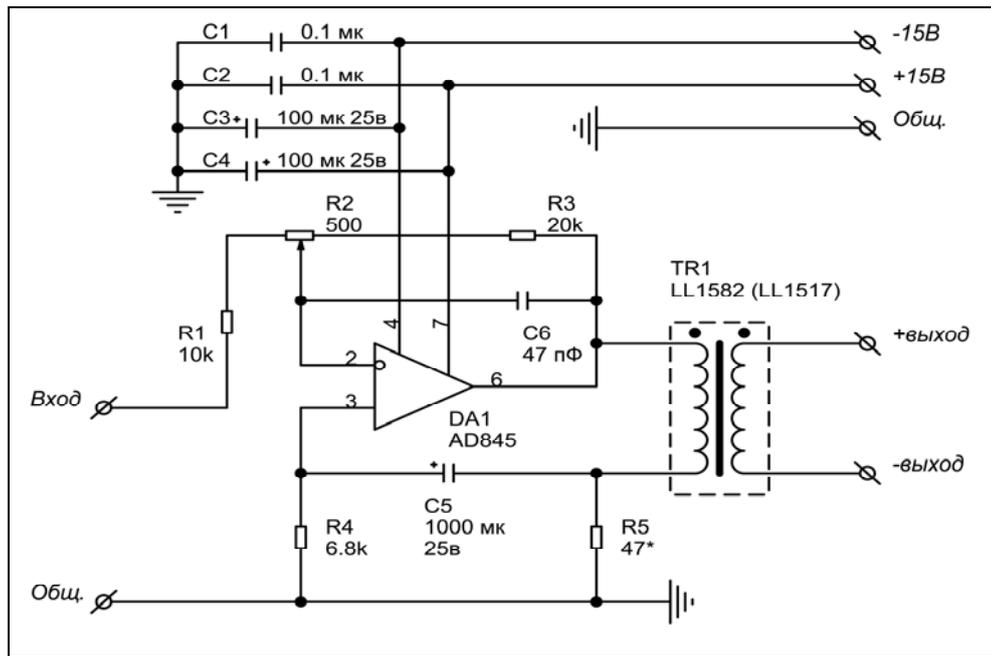


Рис. 7

Драйвер дифференциальной линии со смешанной обратной связью

Чем выше точность его выполнения, тем в большей степени могут быть снижены искажения трансформатора. Для этого необходимо, чтобы, во-первых, сопротивление источника сигнала для этого драйвера было минимальным, а во-вторых, постоянная времени цепи, образованной разделительным конденсатором и сопротивлением в цепи неинвертирующего входа была как минимум в 100...500 раз больше периода колебания нижней рабочей частоты [1]. Результаты измерения коэффициента нелинейных искажений, полученные для трансформатора LL1517, включенного в схему драйвера со смешанной обратной связью [1], приведены на рис.8:

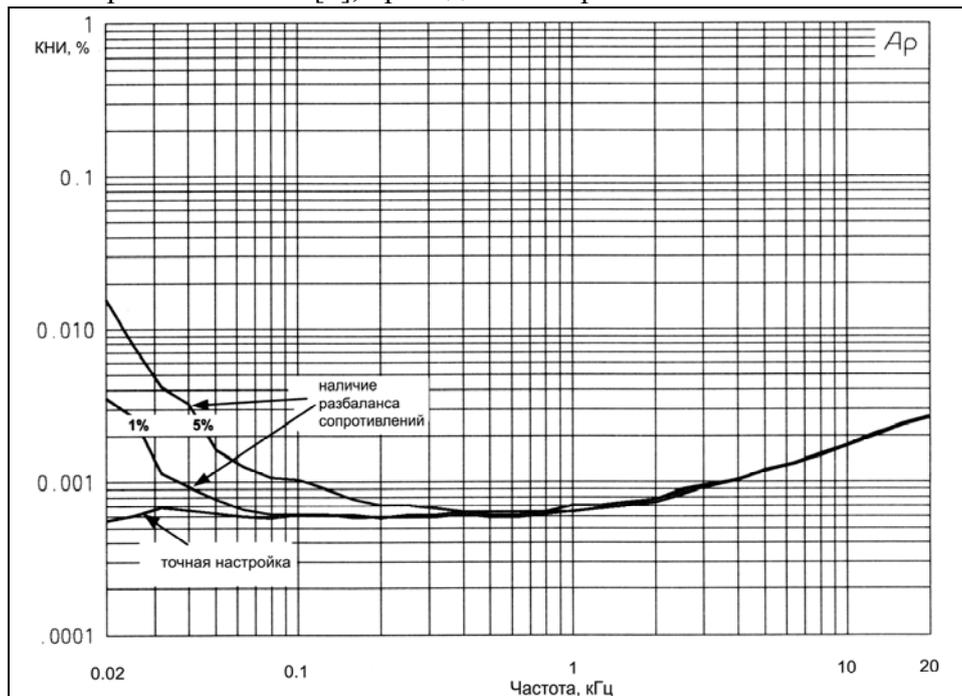


Рис. 8

Зависимость уровня искажений драйвера со смешанной ОС от частоты сигнала

Из сравнения рис.6 и рис.8 можно сделать вывод о высокой эффективности такого способа включения трансформатора (Рост искажений на высоких частотах для полной схемы драйвера на рис.7 обусловлен снижением коэффициента усиления ОУ на этих частотах и не имеет отношения к трансформатору). Учитывая отличные результаты работы драйверов с трансформаторным выходом и смешанной обратной связью, ряд фирм – производителей трансформаторов, в частности, Lundahl, рекомендуют такой способ включения своих линейных симметричных трансформаторов, как типовой [6].

Еще одна область применения согласующих трансформаторов – это преобразование дифференциальных сигналов в однофазные и наоборот. Это позволяет простыми средствами организовать помехозащищенную симметричную линию при наличии только однофазных выходов и входов. Кроме того, такие трансформаторы обеспечивают гальваническую развязку приемника и драйвера, что позволяет в ряде случаев решить проблемы с наводками от магнитных полей на замкнутые контуры общего провода. Часто такие трансформаторы выполняются в виде законченных устройств в малогабаритных корпусах, с одной стороны которых имеется однофазный вход (выход), подключаемый к источнику (приемнику) сигнала, а с другой – дифференциальные, соединяемые линией передачи. В зарубежной литературе эти приборы часто называют «устранителями проблем». К таким трансформаторам относятся, например, приборы LL2615 и LL2616 (см. рис. 9):



Рис. 9  
«Устранители проблем» Lundahl

Более старая, но в последнее время вновь ставшая относительно актуальной в связи с «ламповым ренессансом» в звуковоспроизводящей аппаратуре роль согласующих трансформаторов – это фазоинверторы. На рис.10 приведена упрощенная схема двухтактного выходного каскада и фазоинвертора лампового усилителя мощности. С помощью трансформатора, две вторичные обмотки которого включены соответствующим образом, можно достаточно просто получить два противофазных и одинаковых по величине сигнала, необходимых для возбуждения выходного каскада. Следует обратить внимание на то, что, несмотря на большие габариты и стоимость по сравнению с бестрансформаторным фазоинвертором, рассматриваемый каскад имеет ряд преимуществ, основные из которых – низкое активное сопротивление обмоток и относительно

невысокое выходное сопротивление по переменному току, а также возможность работы фазоинверторного каскада в качестве усилителя мощности [7].

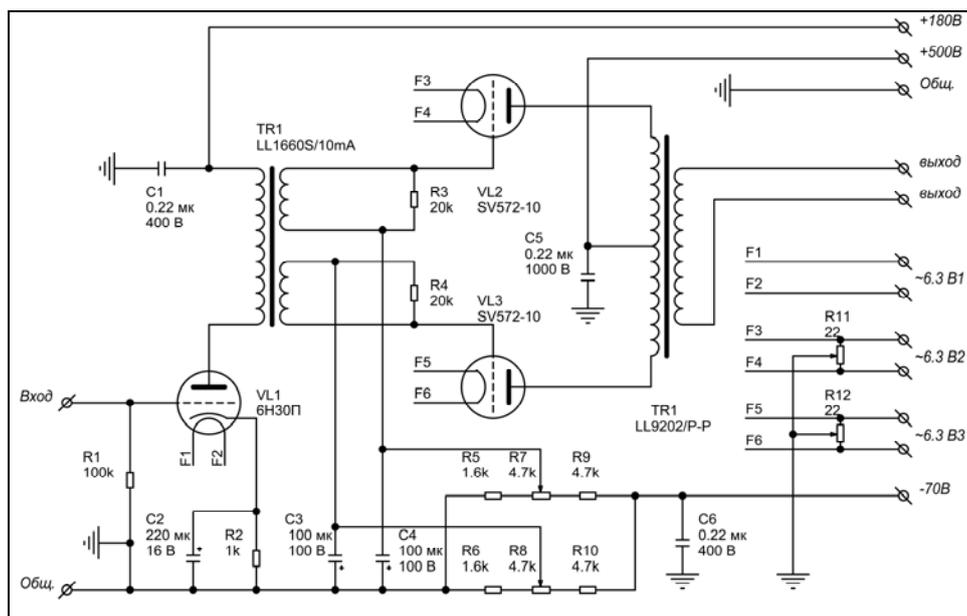


Рис. 10

Упрощенная схема двухтактного выходного каскада лампового усилителя

Это позволяет использовать лампы выходного каскада в режиме с токами управляющей сетки, что, с одной стороны, увеличивает КПД каскада и улучшает использование напряжения анодного питания, а с другой – дает возможность работать на участках характеристик ламп с наименьшим изменением крутизны и внутреннего сопротивления, что благоприятно сказывается на уровне и спектральном распределении продуктов искажений. Такие решения (причем не только в фазоинверсных, но и в однотактных каскадах) широко применяются в ламповой звуковоспроизводящей аппаратуре самого высокого класса, в частности в усилителе Project T1 фирмы Marantz, Ongaku фирмы Audio Note, линейке усилителей Wavac и ряде других.

Типичным представителем межкаскадных согласующих трансформаторов с возможностью работы в фазоинверторах является LL1660S.

### 3. Выходные трансформаторы.

Уникальное свойство трансформаторов преобразовывать величину сопротивления нагрузки, подключенной к одной из обмоток в эквивалентное сопротивление в другой пропорционально квадрату коэффициента трансформации практически без потерь полезной мощности сигнала в течение почти полувека играло ведущую роль в технике звукоусиления. По сути дела, трансформаторная связь анодных цепей электронных ламп с высоким выходным сопротивлением, небольшими рабочими токами и высокими напряжениями с низкоомными динамическими громкоговорителями длительное время являлась единственно возможным способом реализации мощных выходных каскадов усилителей звуковых сигналов. Появление в конце 50-х...начале 60-х годов прошлого века серийных мощных транзисторов существенно потеснило ламповую аппаратуру в этой области, но и в транзисторных усилителях долгое время применялись согласующие и выходные трансформаторы (достаточно вспомнить схемы транзисторных радиоприемников 60-х годов) и только разработка достаточно линейных и надежных транзисторов и соответствующей схемотехники практически исключила массовое применение выходных трансформаторов в звуковой аппаратуре.

В начале 90-х годов разработчики высококачественной звуковой аппаратуры вновь обратили внимание на практически забытые в период «царства транзисторов»

электроракуумные приборы. Достаточно много фирм на Западе освоило или возобновило выпуск ламповой звукоусилительной техники, причем самой высокой категории качества и соответствующей цены. И для этой техники потребовались выходные трансформаторы.

В зависимости от типа выходного каскада, – одноконтного или двухконтного, выходные трансформаторы имеют существенные отличия друг от друга. Трансформаторы для одноконтных выходных каскадов (упрощенную схему см. на рис. 11) являются понижающими согласующими трансформаторами.

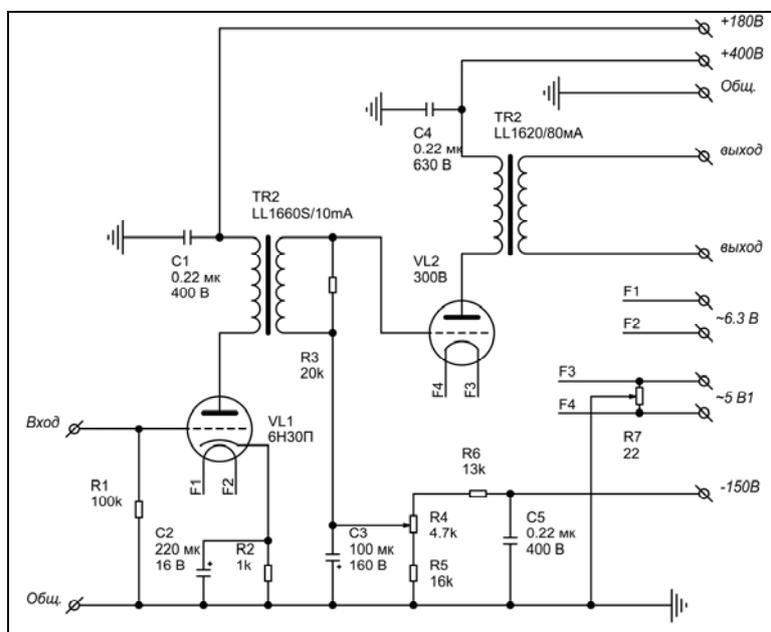


Рис. 11

Упрощенная схема выходного каскада одноконтного лампового усилителя

Поскольку эти приборы передают значительные мощности, то их размеры и масса, определяемые используемыми магнитопроводами, достаточно велики и могут достигать десятка килограмм. Через первичную обмотку выходного трансформатора одноконтного каскада протекает постоянный ток анода лампы, что может вызывать насыщение магнитопровода и резкое ухудшение его магнитных свойств. Чтобы этого не происходило, в магнитопровод вводят немагнитный зазор, который резко увеличивает эквивалентную длину силовой линии магнитного потока и тем самым стабилизирует величину магнитной проницаемости.

В трансформаторах для двухконтных выходных каскадов (рис.10) постоянного подмагничивания либо нет вовсе, либо его величина мала и позволяет обойтись технологическим зазором магнитопровода.

При работе трансформаторов магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой, не полностью используется вторичной. Часть потока бесполезно рассеивается в пространстве, причем, чем меньше период колебания частоты сигнала, тем большая часть потока может рассеяться. Это явление называют рассеянием и характеризуют эквивалентной величиной – индуктивностью рассеяния. Чем она выше, тем хуже работает трансформатор с ростом частоты, тем больше спад его АЧХ на высоких частотах. Для снижения индуктивности рассеяния используются специальные способы намотки катушек, называемые секционной намоткой. Процесс изготовления таких трансформаторов очень плохо поддается автоматизации и стоимость высококачественных приборов весьма высока. Подробно с теорией и свойствами различных типов трансформаторов можно ознакомиться в [8] и [9].

Выходные трансформаторы для ламповых усилителей мощности с момента начала «лампового ренессанса» выпускают достаточно много зарубежных фирм, наиболее

известные из которых – Lundahl (Швеция), Magnequest (США), Hammond (США), Tango (Япония), Tamradio (Япония), Plitron (Канада). Продукцию этих фирм отличает высокое качество, стабильность параметров и достаточно высокая цена, тем не менее не уменьшающая спрос на трансформаторы. Типичными представителями выходных трансформаторов для двухтактных и одноктактных выходных каскадов ламповых усилителей являются приборы семейств LL1620, LL1623, LL1627 производства Lundahl.

#### 4. Импульсные трансформаторы.

В современной электронной аппаратуре широко распространены различные виды импульсных сигналов. Это сигналы цифровых данных, видеосигналы, и т.п. При их передаче как внутри аппарата, так и между различными устройствами возникают похожие проблемы, что и при передаче аналоговых низкочастотных сигналов. Передача импульсных сигналов на сколько-нибудь значительное расстояние сопровождается воздействием различного рода помех и защита от них является первостепенной задачей при построении канала передачи. Очевидно, что существенную часть помех можно устранить, применив передачу сигнала в дифференциальном виде по витой паре. В этом случае наводки от внешних полей с большой длиной волны будут создавать синфазную помеху, подавляемую в дифференциальном приемнике. Осуществив гальваническую развязку приемника сигнала от источника, можно устранить помехи, связанные с наличием замкнутых «земляных» петель. Обе задачи успешно решаются с помощью импульсных трансформаторов. Наиболее широко распространены два вида таких приборов – для передачи цифровых потоков и для передачи видеосигналов.

Первые предназначены для передачи последовательных данных с ограниченным спектром как снизу, так и сверху. К ним, в первую очередь, относятся трансформаторы передачи данных стандартов AES / EBU и SPDIF, используемых в профессиональной и бытовой цифровой звуковой технике. Такие трансформаторы выполняются на ферритовых магнитопроводах или магнитопроводах из аморфного металла, их обмотки содержат небольшое число витков, а диапазон рабочих частот составляет максимум 0.05...15МГц. Линейность в данном случае непринципиальна и никак не нормируется. Наиболее известны AES / EBU трансформаторы фирм Pulse Engineering типа PE65612 и Lundahl типа LL1572. Типовая схема организации помехозащищенного цифрового входа стандарта AES / EBU с использованием приемника типа CS8416 приведена на рис.12:

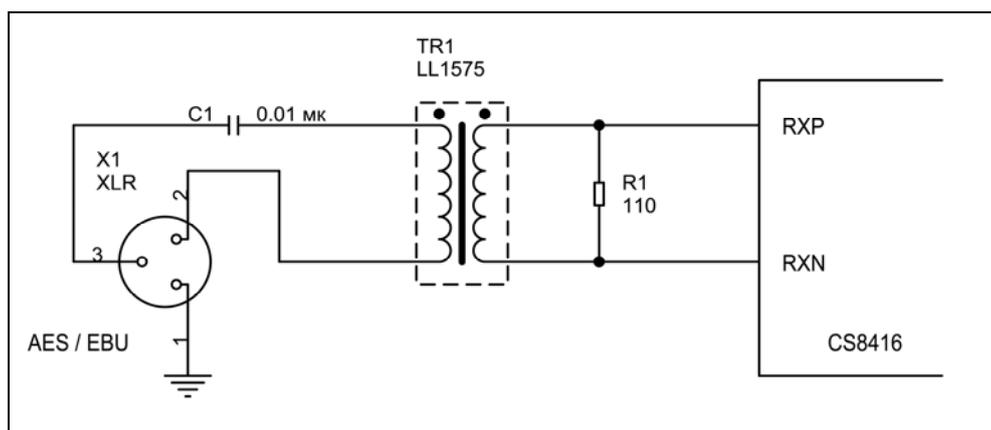


Рис. 12

Входная цепь приемника цифровых сигналов AES / EBU

Несколько иными параметрами обладают трансформаторы для работы в локальных сетях Ethernet. Для этих приборов нормируется гораздо более широкая полоса рабочих частот сверху (до 100МГц и выше) и высокое рабочее напряжение изоляции, поскольку устройства локальной сети передачи данных могут быть теоретически подключены к разным питающим сетям, между которыми может быть высокий потенциал, либо

переменная составляющая значительного уровня. Часто такие трансформаторы встраивают непосредственно в корпус разъема RJ-45, стандартного для локальных сетей (напр., J0026D21B фирмы Pulse Engineering).

Трансформаторы для передачи видеосигналов во многом похожи на рассмотренные выше цифровые, но, в отличие от них, обладают более широким рабочим диапазоном частот, в первую очередь снизу (обычно от 15...20Гц) и нормируемой величиной искажения прямоугольного импульса. Типичным представителем таких приборов является трансформатор LL1575 производства Lundahl.

Широкое распространение получили телекоммуникационные изолирующие трансформаторы, предназначенные для работы в модемах. Строго говоря, они не являются импульсными трансформаторами, поскольку по условиям работы они могут передавать как импульсные, так и аналоговые сигналы. Основной отличительной чертой таких приборов является очень высокое рабочее напряжение изоляции – до 3000В и выше. Столь высокие значения его необходимы из-за того, что в телефонных линиях достаточно высока вероятность возникновения перенапряжений относительно заземления или нейтрали питающей электросети, и трансформатор должен обеспечить защиту элементов схемы модемов в таких случаях.

В кратком обзоре невозможно коснуться всех областей применения и всех типов столь обширной группы приборов, как трансформаторы. В частности, специально не рассматривались трансформаторы источников электропитания (как низкочастотные, так и импульсные), силовые трансформаторы электросетей, радиочастотные и СВЧ - трансформаторы и многие другие. Их особенностям, свойствам и применению посвящено огромное количество литературы и научных трудов.

Рассмотрение весьма небольшой группы типов трансформаторов позволяет сделать вывод, что эти приборы, несмотря на свою долгую историю, не утратили своих позиций и во многих случаях позволяют просто и изящно решить задачи, непосильные другим средствам.

### *Литература*

1. Op Amp Applications. Edited by W. G. Jung, Analog Devices, Inc., Norwood, MA, 2002
2. W. Jung. "Microphone Preamplifiers for Audio". Analog Dialogue, Vol. 28, No.2, 1994
3. JT-11-P-1 Line Input Transformer Datasheet. Jensen Transformers, Van Nuys, CA, USA
4. W. Jung, S. Wurcer. "A High Performance Audio Composite Line Stage". Ch.5 in Amplifier Applications Guide, edited by W. Kester, Analog Devices, Inc., Norwood, MA, 1992.
5. Werner Baudisch. "Schaltungsanordnung mit Verstärker mit Ausgangsubartrager", German patent DE2901567, July 24, 1980.
6. Per Lundahl. "Mixed Feedback Drive Circuits For Audio Output Transformers", Lundahl Transformers, Norrtälje, Sweden.
7. Г. В. Войшвилло. «Усилители низкой частоты на электронных лампах». М., Связьиздат, 1963
8. Г. С. Цыкин. «Трансформаторы низкой частоты». М., Государственное издательство по технике связи, 1937
9. Г. С. Цыкин. «Трансформаторы низкой частоты». М., Связьиздат, 1955
10. Официальный сайт компании Lundahl: [www.lundahl.se](http://www.lundahl.se)
11. Официальный сайт компании Analog Devices: [www.analog.com](http://www.analog.com)
12. Официальный сайт компании Plitron: [www.plitron.com](http://www.plitron.com)
13. Официальный сайт компании Hammond Manufacturing:
14. Официальный сайт компании Pulse Engineering:
15. Официальный сайт компании Cirrus Logic:
16. Официальный сайт компании Clare: