

**Г.С. Цыкин**

# **Трансформаторы низкой частоты**

**Москва  
«Книга по Требованию»**

УДК 53  
ББК 22.3  
Г11

Г11 **Г.С. Цыкин**  
Трансформаторы низкой частоты / Г.С. Цыкин – М.: Книга по Требованию, 2023. – 424 с.

**ISBN 978-5-458-47506-8**

Расчет трансформаторов низкой частоты. Книга будет полезна радиолюбителям занимающимся разработкой ламповых усилителей низкой частоты.

**ISBN 978-5-458-47506-8**

© Издание на русском языке, оформление  
«УОУО Media», 2023  
© Издание на русском языке, оцифровка,  
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.



# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ТРАНСФОРМАТОРОВ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ

## *Глава I*

### ВВЕДЕНИЕ

#### § 1.1. Историческая справка

В 1877 г. Павел Николаевич Яблочков изобрёл трансформатор переменного тока, названный им „индукционной катушкой“ (см. список литературы, Л1 и Л2). В 80-х годах прошлого столетия были также опубликованы работы профессора А. Г. Столетова, посвящённые исследованию магнитных свойств железа [Л3]. На этой основе были в дальнейшем разработаны подробная теория и конструкции разнообразных электрических машин и трансформаторов, получивших широкое применение во многих отраслях техники.

Роль русских учёных в создании и разработке теории трансформаторов не ограничивается открытиями Яблочкова и Столетова; ряд последующих работ наших учёных и исследователей дал возможность довести эту теорию до того уровня, на котором она находится в настоящее время. Работы Б. А. Введенского, Г. С. Ландсберга, В. К. Аркадьева по теории магнетизма [Л4, Л5] позволили глубже раскрыть сущность электромагнитных процессов в металлах.

В 30-х годах прошлого столетия русским учёным Э. Х. Ленцом были сформулированы основные законы электромагнитной индукции, положенные впоследствии в основу теории трансформаторов и электрических машин. Ряд дальнейших исследований в области электротехники, завершившихся работами К. А. Круга, П. Л. Калантарова и Л. Р. Неймана [Л6, Л7] дали подробный анализ явлений в электрических цепях, что позволило создать теорию и разработать методику практического расчёта трансформаторов низкой частоты.

Основы теории таких трансформаторов были заложены в работах М. В. Шулейкина и А. И. Берга по усилителям и получили дальнейшее развитие в работах автора, Г. В. Войшвилло и С. Н. Кризе [Л8, Л9, Л10].

На указанных материалах построены методы анализа и расчёта трансформаторов низкой частоты, изложенные в последующих главах настоящей книги.

## § 1.2. Типы трансформаторов низкой частоты и их назначение

Как уже сформулировано выше, трансформатором низкой частоты называют трансформатор, преобразующий ток или напряжение электрического сигнала, имеющего спектр звуковых или сверхзвуковых частот. По месту расположения в схеме трансформаторы низкой частоты можно разделить на входные, промежуточные и выходные.

Входным называют трансформатор, включаемый между источником сигнала и цепью входа электронного устройства, например, между электродинамическим микрофоном и цепью управляющая сетка — катод входной лампы электронного усилителя (рис. 1.1). Кроме заданных электрических характеристик, к входному трансформатору в зависимости от назначения, устройства и схемы могут предъявляться особые требования, например, симметричность входной или выходной цепи, определённая величина входного сопротивления, хорошая защищённость от внешних электростатических и магнитных полей и др.

Промежуточным называют трансформатор, включаемый между выходной (анодной, коллекторной) цепью предыдущей и входной (сеточной, эмиттерной) цепью последующей ступени электронного устройства (рис. 1.2).

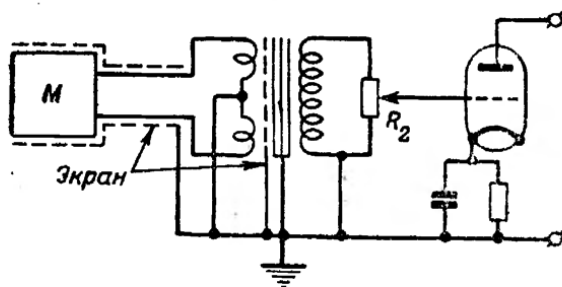


Рис. 1.1. Схема симметричного микрофонного входного устройства с трансформатором и регулятором усиления

средней точки напряжений, низкого выходного сопротивления, быстрого затухания нестационарных процессов при импульсном возбуждении и др.

Выходным называют трансформатор, включаемый между выходной цепью электронного устройства и нагрузкой

последующей ступени электронного устройства (рис. 1.2). К промежуточному трансформатору, кроме заданных электрических характеристик, в зависимости от его назначения могут предъявляться требования получения двух равных и симметричных относительно

рис. 1.3), например, между цепью анода выходной лампы электронного усилителя и цепью звуковой катушки электродинамического громкоговорителя. Кроме заданных характеристик, к выходному трансформатору в зависимости от его назначения предъявляют требования заданной величины

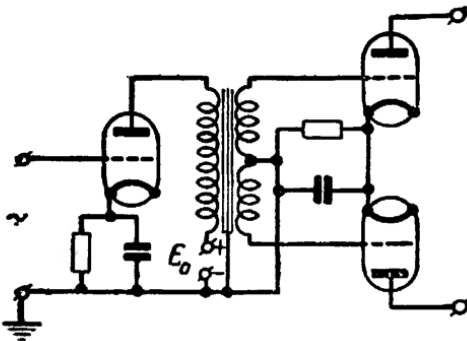


Рис. 1.2. Схема перехода с одноктактной ступени на двухтактную с промежуточным трансформатором

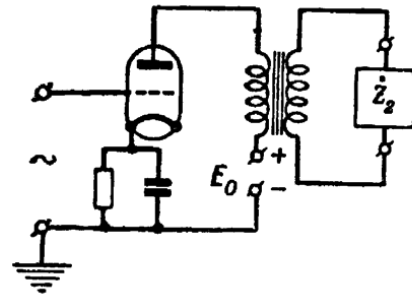


Рис. 1.3. Простейшая схема выходной ступени с трансформатором

входного или выходного сопротивления, симметричности входной или выходной цепи, ограниченной величины вносимых трансформатором нелинейных искажений и т. д.

### § 1.3. Эквивалентная схема трансформатора низкой частоты и различные случаи его работы

Общая эквивалентная схема трансформатора низкой частоты, работающего от генератора на нагрузку, дана на рис. 1.4. Как обычно, эквивалентная схема приведена к

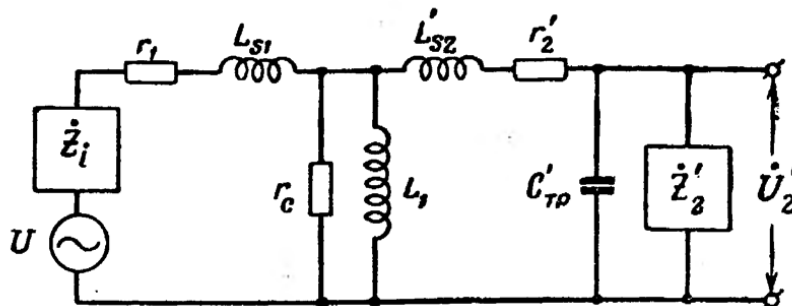


Рис. 1.4. Общая эквивалентная схема трансформатора низкой частоты, работающего с генератора на нагрузку

первичной обмотке трансформатора. Обозначения на схеме следующие:

- $U$  — эдс генератора, включённого в первичную обмотку,
- $Z_i$  — внутреннее сопротивление генератора,
- $r_1$  — активное сопротивление первичной обмотки трансформатора,

- $L_{s1}$  — индуктивность рассеяния первичной обмотки трансформатора,
- $r_c$  — сопротивление потерь в сердечнике,
- $L_1$  — индуктивность первичной обмотки трансформатора,
- $L'_{s2}$  — индуктивность рассеяния вторичной обмотки, приведённая к первичной,
- $r'_2$  — активное сопротивление вторичной обмотки, приведённое к первичной,
- $C'_{mp}$  — собственная ёмкость трансформатора, приведённая к первичной обмотке,
- $Z'_2$  — сопротивление нагрузки трансформатора, приведённое к первичной обмотке,
- $\dot{U}_2$  — напряжение на нагрузке, приведённое к первичной обмотке.

Как известно из общего курса электротехники, формулы приведения для перевода величин из вторичной обмотки трансформатора в первичную имеют следующий вид:

$$\dot{U}'_2 = \frac{\dot{U}_2}{n}; \quad Z'_2 = \frac{Z_2}{n^2}; \quad C'_{mp} = C_{mp} n^2; \quad r'_2 = \frac{r_2}{n^2}; \quad L'_{s2} = \frac{L_{s2}}{n^2}, \quad (1.1)$$

где  $n$  — коэффициент трансформации, равный отношению числа витков вторичной обмотки  $w_2$  к числу витков первичной  $w_1$

$$n = \frac{w_2}{w_1}. \quad (1.2)$$

Генератором или источником эдс для трансформатора низкой частоты, как это видно из сказанного выше, могут являться микрофон, электронная лампа или полупроводниковый прибор, электромагнитный или электродинамический датчик, читающая головка аппарата для магнитной записи звука, проводная или кабельная линия связи и т. д. Нагрузка трансформатора в зависимости от его назначения также может быть различной — это может быть измерительный прибор, громкоговоритель, входная цепь электронной лампы или полупроводникового прибора, звукозаписывающая головка и т. д.

Так как характер внутреннего сопротивления источника эдс и нагрузки, а также зависимость электродвижущей силы источника эдс от частоты для разных случаев различны, общая эквивалентная схема цепи может иметь много разновидностей, электрические характеристики которых очень разнообразны.

Основные случаи применения трансформаторов низкой частоты для удобства анализа можно свести к нескольким группам, различающимся по общей эквивалентной схеме, а именно:

а) трансформаторы с активной нагрузкой во всей полосе рабочих частот, работающие от источника эдс с активным сопротивлением и электродвижущей силой, не зависящей от частоты;

б) трансформаторы с индуктивной нагрузкой в области высших рабочих частот, работающие от источника эдс с активным сопротивлением и электродвижущей силой, не зависящей от частоты;

в) трансформаторы с ёмкостной нагрузкой в области высших рабочих частот, работающие от источника эдс с активным сопротивлением и электродвижущей силой, не зависящей от частоты;

г) трансформаторы с активной нагрузкой, работающие от источника эдс с индуктивным сопротивлением в области высших частот и электродвижущей силой, не зависящей от частоты;

д) трансформаторы с ёмкостной нагрузкой в области высших частот, работающие от источника эдс с индуктивным сопротивлением на высших частотах и электродвижущей силой, не зависящей от частоты;

е) трансформаторы с активной нагрузкой, работающие от источника эдс с индуктивным сопротивлением и электродвижущей силой, пропорциональной частоте;

ж) трансформаторы с ёмкостной нагрузкой в области высших частот, работающие от источника эдс с индуктивным сопротивлением и электродвижущей силой, пропорциональной частоте;

з) трансформаторы с активной нагрузкой, работающие от источника эдс с ёмкостным сопротивлением на низших частотах и электродвижущей силой, не зависящей от частоты;

и) трансформаторы с ёмкостной нагрузкой в области высших частот, работающие от источника эдс с ёмкостным сопротивлением на низших частотах и электродвижущей силой, не зависящей от частоты;

к) трансформаторы с активной нагрузкой или ненагруженные, работающие от источника эдс с активным сопротивлением и электродвижущей силой, не зависящей от частоты. В отличие от всех предыдущих случаев здесь рабочей является не полоса частот от низшей частоты до высшей, а лишь одна определённая частота, и напряжение на вторичной обмотке трансформатора не должно быть постоянным в полосе рабочих частот, а должно резко падать при изменении частоты в обе стороны от рабочей;

л) трансформаторы с активной или ёмкостной нагрузкой, работающие от источника импульсных сигналов с активным сопротивлением и эдс, не зависящей от частоты.

Анализ электрических характеристик указанных выше случаев приводит к различной методике расчёта и различным

расчётным формулам, так как эквивалентные схемы для отдельных групп различны. В дальнейших главах производится анализ эквивалентных схем и выводятся расчётные формулы для перечисленных выше групп трансформаторов.

Следует заметить, что ввиду большего объёма, веса и стоимости трансформаторной схемы связи по сравнению с резистивной, применять трансформаторную схему следует лишь в тех случаях, когда она необходима для выполнения особых требований, или её применение почему-либо является целесообразным.

#### § 1.4. Искажения, вносимые трансформатором, и их оценка

Как известно, условием отсутствия искажений сигнала является точная идентичность формы кривой тока или напряжения на выходе системы форме кривой тока или напряжения на входе. Трансформатор низкой частоты представляет собой нелинейную систему с конечной постоянной времени; точный анализ искажений, вносимых такой системой при воздействии на неё непериодического сигнала произвольной формы, очень сложен и не позволяет получить конкретные расчётные формулы.

При усилении звуковых сигналов для упрощения анализа считают сигнал периодическим, а систему линейной, и находят частотные искажения и фазовые сдвиги путём вывода уравнений частотной и фазовой характеристик. Нелинейные искажения находят отдельно, заменяя сигнал синусоидальным колебанием. Такие упрощения вполне допустимы для большинства цепей электроакустической аппаратуры, где в основном и применяются трансформаторы низкой частоты. Поэтому в дальнейшем изложении анализ вносимых трансформатором искажений в большинстве случаев и будет производиться указанным образом.

В импульсных устройствах и генераторах колебаний прямоугольной формы приходится учитывать нестационарные процессы в системе; искажения формы сигнала, вносимые трансформатором при прохождении через него импульсных сигналов, рассмотрены в гл. IX.

Для оценки вносимых трансформатором низкой частоты искажений сигнала на практике рассматривают отдельно следующие виды искажений: а) частотные, б) фазовые, в) нелинейные, г) искажения формы импульса, д) посторонние помехи.

Частотные и фазовые искажения, вносимые трансформатором, а также искажения формы прямоугольного импульса обусловлены индуктивностями и ёмкостями обмоток трансформатора и могут быть найдены из анализа эквивалентной схемы. Проектируя трансформатор надлежащим образом, эти искажения можно снизить до заданной величины.

Трансформатор низкой частоты может исказить форму даже стационарного синусоидального сигнала по двум причинам. Первой причиной является нелинейность характеристики намагничивания магнитного материала сердечника трансформатора; нелинейные искажения, вызванные этой причиной, увеличиваются с ростом индукции в сердечнике и понижением частоты сигнала. При малых индукциях они незначительны и с ними приходится считаться лишь в выходных и модуляционных трансформаторах средней и большой мощности, где индукция превышает несколько килогаусс. Эти искажения могут быть снижены до заданной величины выбором надлежащей индукции в сердечнике; их расчёт дан в § XI.2, XI.3 и XI.4.

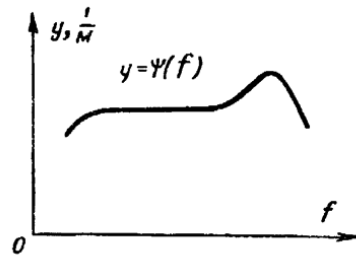


Рис. I.5. Частотная характеристика

Вторая причина искажений формы стационарного синусоидального сигнала имеет место в трансформаторах, работающих с отсечкой тока в одной или обеих обмотках. Переходные процессы, вызываемые прохождением несинусоидальных импульсов тока через обмотки трансформатора, искажают форму напряжения на обмотках. Искажения этого вида растут с увеличением частоты; для их снижения необходимо увеличивать затухание цепи и уменьшать индуктивность рассеяния трансформатора. Расчёт искажений, вызванных этой причиной, и способы их уменьшения рассматриваются в § XI.6.

Напряжение помех на обмотках трансформатора вызывается ёмкостными и индуктивными связями подводящих проводов, деталей схемы и самого трансформатора с источниками электростатических и магнитных полей — силовыми трансформаторами, электродвигателями, дросселями питания, проводами. Для ограничения помех и защиты от них необходимо правильно располагать детали проектируемой аппаратуры, а в некоторых случаях экранировать как сам трансформатор, так и опасные в отношении помех цепи.

Для суждения о величине частотных искажений в системе с трансформатором пользуются частотной характеристикой, представляющей собой зависимость коэффициента усиления системы от частоты (рис. I.5). По вертикальной оси в линейном или логарифмическом масштабе откладывают *относительный коэффициент усиления*  $y$ , представляющий собой отношение коэффициента усиления на данной частоте к коэффициенту усиления на средних частотах:

$$y = \frac{1}{M} = \frac{K}{K_0} . \quad (I.3)$$

Величина  $M$ , обратная относительно коэффициенту усиления, обычно называется *коэффициентом частотных искажений*.

Частотные искажения часто выражают в логарифмических единицах — децибелах или неперах. Переход от относительных единиц к логарифмическим и обратно, а также переход от одних логарифмических единиц к другим производится по формулам:

$$\left. \begin{aligned} y_{\text{дб}} &= 20 \lg y = -20 \lg M = 8,68 y_{\text{неп}} \\ y_{\text{неп}} &= \ln y = -\ln M = 0,115 y_{\text{дб}} \\ y &= 10^{\frac{y_{\text{дб}}}{20}} = 10^{-\frac{M_{\text{дб}}}{20}} = e^{y_{\text{неп}}} = e^{-M_{\text{неп}}} \\ M &= 10^{\frac{M_{\text{дб}}}{20}} = 10^{-\frac{y_{\text{дб}}}{20}} = e^{M_{\text{неп}}} = e^{-y_{\text{неп}}} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

Вносимые трансформатором фазовые искажения определяются его фазовой характеристикой, представляющей собой зависимость от частоты угла сдвига фазы выходного напряжения по отношению к эдс источника сигнала (рис. 1.6). Как известно, фазовые искажения отсутствуют, если указанный угол на любой частоте равен нулю или изменяется прямо пропорционально частоте.

В электроакустической аппаратуре фазовые искажения не играют существенной роли, а поэтому в трансформаторах, предназначенных для этой аппаратуры, фазовую характеристику не рассчитывают.

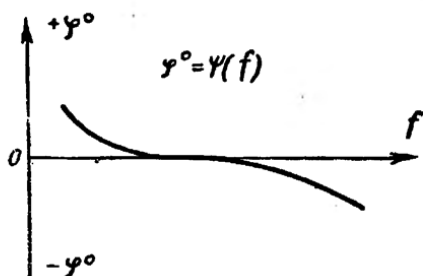


Рис. 1.6. Фазовая характеристика

Нелинейные искажения принято характеризовать коэффициентом гармоник  $\kappa_2$ . Коэффициент гармоник определяется как отношение действующего значения тока или напряжения, появившихся в системе высших гармоник, к действующему значению тока или напряжения основной частоты при подаче на вход системы синусоидальной эдс:

$$\begin{aligned} \kappa_2 &= \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} \\ &= \frac{\sqrt{I_{m2}^2 + I_{m3}^2 + I_{m4}^2 + \dots}}{I_{m1}} = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + U_{m4}^2 + \dots}}{U_{m1}} \end{aligned} \quad (1.5)$$

Здесь  $I_1, I_2, I_3, I_4$  — действующие значения токов основной частоты, второй, третьей и четвертой гармоник;

$U_1, U_2, U_3, U_4$  — действующие значения напряжений;

$I_{m1}, I_{m2}, I_{m3}, I_{m4}$  — амплитудные значения токов основной частоты, второй, третьей и четвертой гармоник;

$U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}, U_{m4}$  — амплитудные значения напряжений.

Коэффициент гармоник выражают либо в виде правильной дроби, либо в процентах; в последнем случае правая часть ф-л (1.5) умножается на 100.

## Глава II

### ТРАНСФОРМАТОРЫ С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

#### § II.1. Применение и эквивалентная схема

Под сокращённым названием трансформаторов с активной нагрузкой понимают трансформаторы с активной нагрузкой, работающие от источника сигнала с активным сопротивлением и эдс, постоянной в рабочей полосе частот. Несмотря на то, что всякий источник сигнала и всякая нагрузка кроме активной составляющей сопротивления имеют также и реактивную составляющую, сопротивление источника и нагрузки можно считать активным, если во всей полосе рабочих частот реактивная составляющая значительно меньше активной.

К этой группе относятся следующие трансформаторы, имеющие большое практическое применение:

а) входные трансформаторы, сильно нагруженные со стороны вторичной обмотки активным сопротивлением, и работающие от угольного или электродинамического микрофона, резистивного датчика, удлинителя, скорректированной линии связи и других источников, сопротивление которых можно считать активным в рабочей полосе частот, а эдс не зависящей от частоты;

б) промежуточные трансформаторы, сильно нагруженные активным сопротивлением на вторичной обмотке;

в) выходные трансформаторы, работающие на измерительный, пишущий, регистрирующий или преобразующий прибор с практически активным сопротивлением в рабочей полосе частот, удлинитель, скорректированную линию связи, электрический фильтр с активным входным сопротивлением;

г) выходные трансформаторы, работающие на нагрузку, род которой может изменяться в широких пределах. Примером является выходной трансформатор лабораторного генератора звуковой частоты или лабораторного усилителя, а также выходной трансформатор усилителя проводного вещания; в этих случаях нагрузку трансформатора приходится считать чисто активной, так как величина реактивной составляющей нагрузки может колебаться в широких пределах и даже менять знак.