

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет) в качестве методических указаний к лабораторной работе для студентов, обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 11.03.01 Радиотехника

Составители:
Б.В. Скворцов
А.В. Паршина

САМАРА
Издательство Самарского университета
2017

УДК 621.3 (075)

ББК 32.84я7

Ш 645

Составители: ***Б.В. Скворцов, А.В. Паршина***

Рецензент: канд. техн. наук, доц. С.А. А к у л о в

Широкополосный трансформатор: метод. указания / сост.: *Б.В. Скворцов, А.В. Паршина*. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 16 с.

Приведены основные теоретические сведения о принципах работы, переходных процессах и методиках расчета основных параметров широкополосного трансформатора. Приводятся: схема целевой установки, краткие теоретические сведения, программа экспериментального исследования и контрольные вопросы для подготовки отчета по лабораторной работе.

Рекомендованы в качестве методических указаний к лабораторной работе для студентов института информатики, математики и электроники, обучающихся по направлению подготовки 11.03.01 Радиотехника.

УДК 621.3 (075)

ББК 32.84я7

Краткие теоретические сведения

Трансформатор является неотъемлемой частью большинства источников питания. Он предназначен для гальванической развязки источника первичного напряжения и нагрузки с одновременным преобразованием (повышением или понижением) переменного напряжения. Представляет собой замкнутый магнитопровод, на который намотаны индуктивные обмотки (рис 1). Различные другие конструкции магнитопроводов с описанием применяемых обмоток приведены в работах [1,2].

В настоящей работе исследуется трансформатор с магнитной связью при работе в диапазоне частот от источника гармонического сигнала и в импульсном режиме. Однако все, что касается режима работы магнитной цепи, в полной мере справедливо и для трансформаторов типа длинной линии.

Принцип работы обмоточного трансформатора поясняется рис. 1.

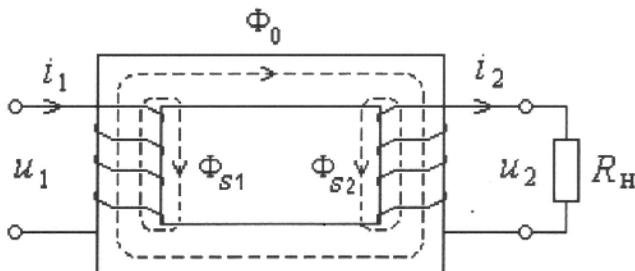


Рис. 1. Функциональная схема трансформатора

При подключении к первичной обмотке трансформатора источника сигнала u_1 (например, гармонического) по обмотке протекает ток i_1 . В результате протекания переменного тока вокруг первичной обмотки создается переменное магнитное поле, характеризующееся потоками Φ_0 и Φ_{s1} . Часть тока первичной обмотки, необходимая для

создания потока Φ_0 , носит название тока намагничивания i_μ . Изменяющиеся во времени потоки Φ_0 и Φ_{S1} индуцируют в первичной обмотке электродвижущие силы (практически уравнивающие входное напряжение u_1):

$$e_1 = -d\Psi_0 / dt = -w_1 d\Phi_0 / dt; e_{S1} = -d\Psi_{S1} / dt,$$

где w_1 – число витков в первичной обмотке трансформатора; $\Psi_0 = w_1\Phi_0$, Ψ_{S1} – потокосцепления первичной обмотки с магнитными потоками Φ_0 и Φ_{S1} .

Магнитный поток Φ_0 , пронизывая витки вторичной обмотки (с числом витков w_2), наводит в ней ЭДС $e_2 = -w_2(d\Phi_0 / dt)$. Если вторичная обмотка замкнута на сопротивление Z_H , в цепи будет проходить ток i_2 , который создает вокруг вторичной обмотки свое магнитное поле. Часть магнитного потока Φ_{S2} сцепляется только с витками вторичной обмотки, а основная часть замыкается по сердечнику и направлена навстречу потоку Φ_0 . Ток первичной обмотки при этом возрастет на $\Delta i = \Delta i_2(w_2 / w_1)$, компенсируя размагничивающее действие тока вторичной обмотки, так что магнитный поток Φ_0 останется практически постоянным.

Магнитный поток Φ_0 , пересекающий витки обеих катушек, носит название основного магнитного потока, а потоки Φ_{S1} и Φ_{S2} , связанные только с одной из обмоток, – магнитными потоками рассеяния, соответственно, первичной и вторичной обмоток. В трансформаторе с ферромагнитным сердечником (где, как правило, $\Phi_s \ll \Phi_0$) основной магнитный поток замыкается по сердечнику, но нужно помнить, что первичное определение разделения магнитных потоков на основной поток и потоки рассеяния зависит от сцепления их с обмотками. Поэтому основной магнитный поток присутствует и в трансформаторе без ферромагнитного сердечника. И, наоборот, в некоторых специальных трансформаторах (например, в составе феррорезонансных стабилизаторов) специально создается часть магнитопровода для замыкания по ней потоков рассеяния обмоток.

При гармоническом характере процессов в трансформаторе магнитные потоки и ток намагничивания отстают от входного напряжения на угол, близкий к 90° . Амплитуда магнитной индукции в сердечнике $B_0 = \Phi_0 / S_c$, характеризующая основной магнитный поток, связана с амплитудой входного напряжения U_1 следующим соотношением:

$$B_0 \approx U_1 / \omega w_1 S_c ,$$

где $\omega = 2\pi f$; f – частота входного воздействия; S_c – площадь поперечного сечения сердечника трансформатора. Приведенное соотношение также показывает, что значение магнитного потока Φ_0 определяется напряжением U_1 и практически не зависит от тока нагрузки I_2 .

Для получения заданных частотных характеристик цепи, использующей трансформатор, к параметрам последнего предъявляются определенные требования. В качестве таких параметров реального трансформатора наиболее часто используют значения элементов эквивалентной схемы.

Один из вариантов такой схемы, так называемая физическая эквивалентная схема, приведен на рис. 2, а.

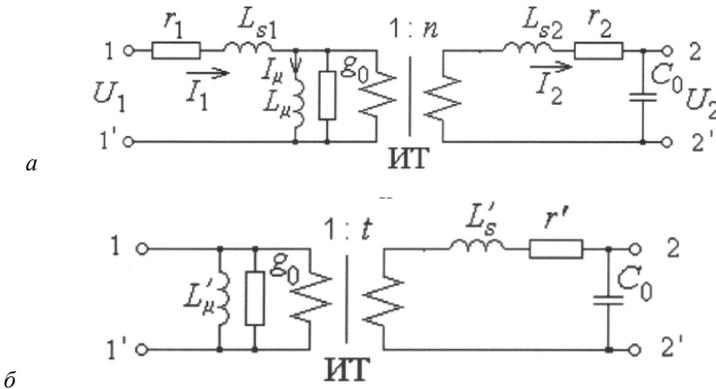


Рис. 2. Эквивалентные схемы трансформатора:
 а – физическая эквивалентная схема,
 б – преобразованная эквивалентная схема

Изображенный на этой схеме идеальный трансформатор (ИТ) отображает основное свойство трансформатора – изменение значений напряжений и токов в первичной и во вторичной цепях. Коэффициент трансформации идеального трансформатора определяется как отношение чисел витков реального трансформатора $n=w_2/w_1=U_2/U_1$ (при любом значении связи между обмотками).

На схеме обозначены также: $L_\mu = \Psi_0/I_\mu = w_1\Phi_0/I_\mu$ – индуктивность намагничивания, определяемая основным магнитным потоком Φ_0 ; L_{S1}, L_{S2} – индуктивности рассеяния первичной и вторичной обмоток трансформатора, обусловленные потоками рассеяния Φ_{S1} и Φ_{S2} ; r_1, r_2 – резистивные сопротивления обмоток трансформатора; g_0 – проводимость, определяемая потерями в сердечнике трансформатора на перемагничивание и на вихревые токи; C_0 – эквивалентная емкость, характеризующая электрическую энергию, запасенную в межвитковых и межобмоточных емкостях трансформатора.

Основой для составления эквивалентной схемы (без учета емкостных связей) послужили уравнение равновесия магнитодвижущих сил в магнитопроводе и уравнения, отражающие баланс напряжений в цепях первичной и вторичной обмоток:

$$i_1 w_1 - i_2 w_2 = \Phi_0 R_\mu ; u_1 = -e_1 - e_{S1} + i_1 r_1 ; e_2 = u_2 - e_{S2} + i_2 r_2 ; (1)$$

где $e_{S2} = -d\Psi_{S2} / dt = -L_{S2} di_2 / dt$ – ЭДС, наводимая во вторичной обмотке потоком рассеяния вторичной обмотки; $R_\mu = l_{cp} / \mu\mu_0 S_c$ – магнитное сопротивление магнитопровода; l_{cp} – длина средней магнитной силовой линии в сердечнике; μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

Уравнения равновесия (1) и, более наглядно, эквивалентная схема позволяют оценить изменение характеристик трансформатора в широком диапазоне частот. При анализе характеристик трансформатора используется также преобразованная эквивалентная схема (рис. 2, б),

в которой на основе преобразования Нортонa три индуктивных элемента заменены двумя – индуктивностью рассеяния $L'_S = L_{S2} + L_{S1}t^2$ и индуктивностью намагничивания $L'_\mu = L_\mu / k_{CB}$. При таком преобразовании изменяется также коэффициент трансформации идеального трансформатора в эквивалентной схеме $t = nk_{ce}$, где $k_{ce} = (1 - L_{K3}/L_{XX})^{1/2}$ – коэффициент связи между обмотками трансформатора; L_{K3} и L_{XX} – индуктивность одной из обмоток при коротком замыкании и разрыве другой обмотки, $r' = r_2 + r_1 t^2$.

В области низких частот основное влияние на частотные характеристики трансформатора оказывает индуктивность намагничивания L_μ что проявляется в увеличении тока намагничивания (I_μ), а, следовательно, и тока первичной обмотки трансформатора I_1 .

Если за критерий ограничения полосы рабочих частот принять уровень повышения тока I_1 на 3 дБ, то связь между L_μ и нижней граничной частотой f_H при заданном сопротивлении нагрузки R_H определится соотношением

$$2\pi f_H L_H \cong R_H / n^2. \quad (2)$$

В области верхних частот характер частотных характеристик определяют индуктивности рассеяния L'_S , паразитная емкость C_0 и, возможно, наличие емкости нагрузки C_H , а влияние индуктивности L_μ практически не сказывается. Поэтому при емкостном характере нагрузки на верхних частотах может наблюдаться подъем частотной характеристики коэффициента передачи $K = U_1 / U_2$. Частота f_0 этого подъема характеристики определяется из выражения

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_S(C_0 + C_H)}} \quad (3)$$

где C_n – емкость в цепи нагрузки; $L'_s a$ – индуктивность рассеяния обеих обмоток трансформатора, приведенная к вторичной обмотке.

При резистивном характере нагрузки частотная зависимость коэффициента передачи может быть монотонно падающей к верхним частотам. В этом случае индуктивности рассеяния определяют верхнюю граничную частоту

$$f_B \cong R_H / 2\pi L'_s a \quad (4)$$

Здесь за границу полосы пропускания также принят уровень спада частотной характеристики 3 дБ.

При анализе искажений импульсных сигналов в процессе их трансформации можно воспользоваться преобразованием Фурье, определяющим взаимосвязь переходной характеристики с частотной характеристикой коэффициента передачи. Но достаточно просто можно провести такой анализ отдельно для областей малых и больших времен, которым соответствуют упрощенные эквивалентные схемы для областей верхних и нижних частот.

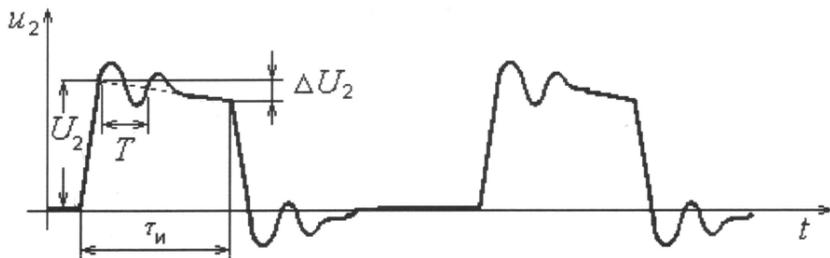


Рис. 3. Переходные процессы при передаче импульсных сигналов

При передаче импульсных сигналов индуктивность рассеяния и емкость C_0 определяют искажения фронтов передаваемых импульсов, т. е. характер переходного процесса в области малых времен. В частности, по периоду T колебательного процесса при передаче фронтов

импульса (рис. 3) можно определить L'_S используя очевидное соотношение

$$T = 2\pi\sqrt{L'_S(C_0 + C_H)} \quad (5)$$

Индуктивность намагничивания определяет форму переходной характеристики в области больших времен. Так, спад вершины импульса $\lambda = \Delta U_2 / U_2$ связан с L_μ следующим соотношением:

$$\lambda = (\tau_H / L_\mu) \left[(R_1 R_2 / n^2) / (R_1 + R_2 / n^2) \right],$$

где $R_1 = r_1 + R_\Gamma$ и $R_2 = r_2 + R_H$ – резистивные сопротивления в цепях первичной и вторичной обмоток (включая внутреннее сопротивление источника сигнала R_Γ и сопротивление нагрузки R_H).

Основные характеристики трансформаторов

Кроме классических параметров, таких как активное и индуктивное сопротивление обмоток и сопротивление потерь трансформатор характеризуется также следующими параметрами:

1. *Коэффициент трансформации* по каждой обмотке:

$$K_i = \frac{W_i}{W_1},$$

где W_1 , W_i – число витков первичной и i -ой вторичной обмоток соответственно. При этом действующие значения напряжений на обмотках связаны соотношением:

$$U_i = K_i \cdot U_1.$$

2. *Мощность обмоток*: первичной – $S_1 = I_1 U_1$ и каждой вторичной $S_i = I_i U_i$, где I_i , U_i – действующие значения токов и напряжений на обмотках.

3. *Полная (габаритная) мощность*:

$$S_\Gamma = \frac{S_1 + \sum_{i=2}^N S_i}{N}.$$

В источниках питания постоянного тока трансформатор характеризуется также коэффициентом использования:

$$K_{исп} = \frac{P_H}{S_T}, \quad (6)$$

где P_H – суммарная мощность выпрямленного тока всего источника питания.

В идеальном случае коэффициент использования трансформатора должен стремиться к единице. Сущность расчёта любого трансформатора состоит в том, чтобы по заданным входным и выходным напряжениям и токам определить число витков первичной и вторичных обмоток, диаметр и марку провода, тип и материалы сердечника, габариты. Подробная методика дается во всех радиотехнических справочниках, например в [3, 4].

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка предназначена для выполнения следующих экспериментальных исследований:

1. Исследование работы трансформатора в широком диапазоне частот при гармоническом и импульсном воздействиях.
2. Исследование основных характеристик трансформатора на холостом ходу и под нагрузкой.
3. Приобретение навыков экспериментального определения параметров эквивалентной схемы трансформатора.

Упрощенная принципиальная схема установки приведена на рис. 4. Исследуемый трансформатор содержит первичную и вторичную обмотки с числами витков w_1, w_2 . К первичной обмотке трансформатора подключен источник сигнала u_1 , к вторичной – нагрузка R_H . Для коррекции частотных характеристик параллельно R_H можно подключать корректирующие конденсаторы C_k , ($C_{k1}=C_{k2}=3900$ пФ).

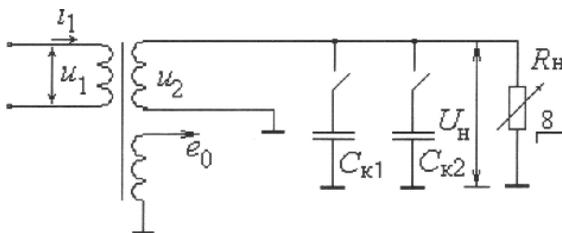


Рис. 4. Упрощенная принципиальная схема установки

Одна из дополнительных обмоток используется как измерительная и работает в режиме, близком к холостому ходу, поэтому напряжение на ней практически равно ЭДС, наводимой основным магнитным потоком в соответствии с числом витков этой обмотки w_3 . Нагрузкой этой обмотки служит высокое входное сопротивление интегрирующей цепи, выходное напряжение которой на основании закона электромагнитной индукции будет пропорционально (по форме и по величине) основному магнитному потоку, т.е. магнитной индукции в сердечнике трансформатора:

$$B(t) = \frac{\Phi_0}{S} = \frac{1}{w_3 S} \int_0^t e_0 dt$$

где e_0 – ЭДС на зажимах обмотки; S – площадь поперечного сечения магнитопровода.

Помимо исследуемого широкополосного трансформатора лабораторный макет содержит встроенные генератор тестовых сигналов и мультиметр.

Генератор позволяет получать сигналы: синусоидальной и прямоугольной (меандр) формы. Установка формы, частоты и амплитуды тестовых сигналов осуществляется с помощью органов управления, расположенных на лицевой панели макета (рис. 5).

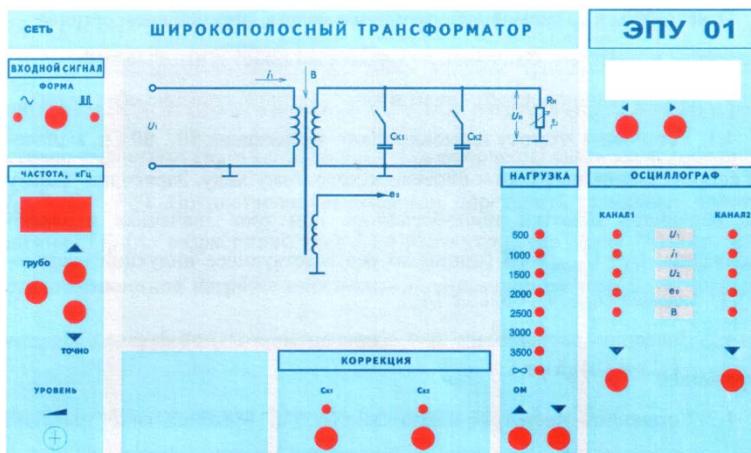


Рис. 5. Лицевая панель лабораторной установки

Органы управления мультиметром позволяют выводить значения измеряемых величин сигналов в контрольных точках схемы – амплитуды (половины размаха переменной составляющей) напряжения U_1 и тока первичной обмотки I_1 , напряжения на вторичной обмотке U_2 , магнитной индукции B в сердечнике трансформатора, вызванной основным магнитным потоком и ЭДС E_0 . Выбор измеряемой величины осуществляется соответствующими кнопками, расположенными под жидкокристаллическим дисплеем.

Наличие двух выходов на внешний осциллограф позволяет одновременно наблюдать формы токов и напряжений в различных точках схемы: u_1 , i_1 , u_2 , e_0 , B . Для исследования взаимосвязи сигналов во времени рекомендуется на один из каналов двухлучевого осциллографа постоянно подавать опорный сигнал (например, напряжение на первичной обмотке трансформатора) и этим сигналом синхронизировать развертку осциллографа.

Если используемый осциллограф имеет вход усилителя горизонтального отклонения луча, то возможно наблюдать кривую перемагничивания материала магнитопровода при синусоидальном и импульсном воздействиях.

Программа и порядок выполнения работы

Ознакомиться со схемой лабораторного макета, размещением органов управления и контроля. Включить лабораторный макет и осциллограф.

1. Исследование процесса намагничивания сердечника трансформатора.

1.1. Установить частоту гармонического напряжения 50 Гц, а значение сопротивления нагрузки – близким к холостому ходу. Зарисовать форму тока первичной обмотки трансформатора при трех значениях входного напряжения: $U_1 = U_{1\text{ном}} = 4\text{В}$ (примерно соответствующее индукции насыщения), U_1 меньше $U_{1\text{ном}}$, U_1 больше $U_{1\text{ном}}$.

1.2. Повторить эксперимент п. 1.1 при прямоугольной форме входного напряжения.

1.3. Установить частоту сигнала 50 Гц. Максимальное значение индукции в сердечнике не должно превышать индукцию насыщения.

При гармонической и прямоугольной формах входного напряжения проследить за изменением формы и временного положения (по отношению к входному напряжению) тока i_1 и магнитной индукции B при изменении сопротивления нагрузки. Зарисовать временные диаграммы i_1 и B при номинальной нагрузке $R_H = 1.5 \text{ кОм}$ и в режиме холостого хода.

2. Исследование трансформатора при гармоническом воздействии.

2.1. Исследование характеристик холостого хода трансформатора. Установить максимальное сопротивление нагрузки и частоту гармонического сигнала 50...80 Гц. Изменяя входное напряжение U_1 , снять зависимости: $I_1 = F(U_1)$, $U_2 = F(U_1)$. Построить графики, вычислить коэффициент трансформации $n = U_2 / U_1$. Установить на входе величину U_1 , не приводящую к заметным искажениям формы тока i_1 и определить индуктивность первичной обмотки трансформатора $L_1 = U_1 / (2\pi f I_1)$.

2.2. Исследование нагрузочных характеристик трансформатора. Изменяя сопротивление нагрузки от 1.5 кОм до $R_H = 4$, снять зависи-

мости $U_2 = F(I_2)$, при $U_1 \approx 4$ В, $C_k = 0$, $f = 500 \dots 1000$ Гц. Ток I_2 вычислять по соотношению $I_2 = U_2 / R_H$. Построить графики, вычислить относительные изменения U_2 , E_0 , B .

2.3. Исследование частотных характеристик трансформатора: Установить $U_1 = 3$ В. При резистивном характере нагрузки ($R_H = 1,5$ кОм) и резистивно-емкостном ($R_H = 1,5$ кОм, $C_{к1}$ и $C_{к2}$ включены) снять зависимости: $U_2 = F(f)$, $I_1 = F(f)$. По построенным графикам определить граничные частоты: нижнюю f_H (по возрастанию тока I_1) и верхнюю f_s (по спаду U_2). При резистивно-емкостной нагрузке определить резонансную частоту f_0 , соответствующую максимуму U_2 / U_1 и по соотношению

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L'_s(C_0 + C_H)}} \quad , \quad \text{оценить индуктивность рассеяния.}$$

Емкость C_0 принять равной 2000 пФ.

3. Исследование трансформатора при импульсном воздействии.

3.1. Зарисовать временные диаграммы u_1 , u_2 , e_0 , i_1 , B при резистивной нагрузке $R_H = 1,5$ кОм для двух значениях частоты повторения прямоугольных импульсов $f = 100$ и 1000 Гц. Поддерживать постоянное значение амплитуды $U_1 = 5$ В.

3.2. При резистивно-емкостной (или только емкостной) нагрузке, добившись колебательного характера переходного процесса (см. рис. 3), определить период колебаний и по соотношению $T = 2\pi\sqrt{L'_s(C_0 + C_H)}$ вычислить индуктивность рассеяния обмоток трансформатора. Для удобства наблюдения рекомендуется установить частоту следования импульсов $2 \dots 5$ кГц.

Содержание отчета

1. Принципиальная схема макета.
2. Временные диаграммы, таблицы экспериментальных данных, графики снятых характеристик и зависимостей.
3. Краткие выводы.

Вопросы для самопроверки

1. Объяснить характер процессов в трансформаторе при гармоническом и импульсном воздействиях.
2. Почему снижается магнитная проницаемость материала сердечника при импульсном характере входного сигнала?
3. Объяснить физический смысл параметров эквивалентной схемы трансформатора.
4. Каково назначение магнитопровода в трансформаторе?
5. Как изменяется значение основного магнитного потока (магнитной индукции) в сердечнике трансформатора при изменении напряжения на первичной обмотке, сопротивления нагрузки, магнитной проницаемости материала сердечника, частоты входного сигнала?
6. Объяснить причины возникновения и характер потерь в трансформаторе, перечислить меры по снижению этих потерь. Какие потери в трансформаторе определяются в опыте холостого хода и в опыте короткого замыкания
7. С какой целью сердечник низкочастотного трансформатора выполняется наборным, из листов электротехнической стали?
8. Как изменяются индуктивность намагничивания и индуктивности рассеяния обмоток при существенном изменении магнитной проницаемости материала сердечника?
9. Назвать основные характеристики трансформаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Скворцов, Б.В.* Элементы и устройства электропитания радиоэлектронной аппаратуры / *Б.В. Скворцов, Г.А. Колюхов.* – Самара: Изд-во СГАУ, 2011. – 132 с.
2. *Ефимов, И.П.* Источники питания РЭА : учеб. пособие / *И.П. Ефимов;* 2-е изд., испр. – Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2002. – 136 с.
3. *Найвельт, Г.С.* Источники электропитания РЭА: справочник / *Г.С. Найвельт.* – М.: Радио и связь, 1985. – 570 с.
4. *Белкин, А.В.* Справочник радиолюбителя-конструктора / *А.В. Белкин.* – М.: Радио и связь, 2003. – 560 с.

Учебное издание

ШИРОКОПОЛОСТНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

Методические указания к лабораторной работе

Составители:

***Скворцов Борис Владимирович,
Паршина Александра Валерьевна***

Редактор И.И. Спиридонова
Доверстка И.И. Спиридонова

Подписано в печать 9.06.2017. Формат 60 x 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,0.

Тираж 25 экз. Заказ . Арт. 67/2017.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА (САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета. 443086 Самара, Московское шоссе, 34.