

С.В. Абрамов, В.Л. Веселов, А.А. Викторov, Н.А. Игнатова, О.О. Никитина  
(г. Чебоксары, Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова)

### РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТРАНСФОРМАТОРА С LC- НАГРУЗКОЙ\*

CALCULATION AND SIMULATION OF A PULSE TRANSFORMER WITH LC LOAD

*Рассмотрено проектирование импульсного трансформатора на тороидальном сердечнике и применен метод оценки параметров LC-фильтра.*

*The paper considers the design of a pulse transformer on a toroidal core and applies a method for estimating the parameters of an LC-filter.*

*Ключевые слова: LC-фильтр, Simulink, моделирование схем, расчет параметров, схемотехника, трансформатор.*

*Keywords: LC filter, Simulink, circuit simulation, parameter calculation, circuitry, transformer.*

Исходные данные для расчета трансформатора: напряжение первичной обмотки трансформатора  $U_1 = 100$  В, напряжение вторичной обмотки  $U_2 = 10$  кВ, ток вторичной обмотки  $I_2 = 5$  мА, частота входных импульсов  $f = 10$  кГц.

Для обеспечения нормального режима работы трансформатора в составе электрической схемы необходимо, чтобы индуктивность намагничивания была как можно больше. Этого можно добиться, выбрав сердечник из материала с высокой относительной магнитной проницаемостью  $\mu \geq 100000$ , что позволит во много раз увеличить индуктивность намагничивания, почти не изменяя индуктивности рассеяния трансформатора [1]. В качестве сердечника был выбран тороидальный сердечник типа ГМ501 ОЛ 155/135-10.

Расчет импульсного тороидального повышающего трансформатора будем проводить, используя методики, описанные в [2-6]. Результаты расчета трансформатора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Расчетные параметры импульсного трансформатора

Параметр	Величина	Единица измерения
Число витков первичной / вторичной обмотки	84 / 13164	витков
Индуктивность намагничивания	0,135	Гн
Индуктивность первичной / вторичной обмотки	136 / 3,345	мкГн / Гн

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда молодежных стартапов ФГБОУ ВО «ЧГУ им. И.Н. Ульянова» (приказ №350 общ. от 07.10.2020).

© Абрамов С.В., Веселов В.Л., Викторov А.А., Игнатова Н.А., Никитина О.О., 2020.  
САПР и моделирование в современной электронике. С. 313 – 316.

На рис. 1 представлена трехмерная модель трансформатора, выполненная на основе расчетных параметров с выбранным типом сердечника.

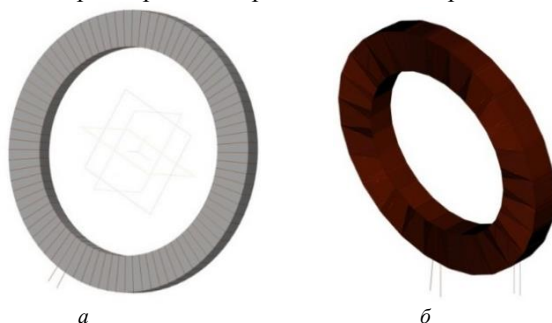


Рис. 1. Трехмерная модель трансформатора: первичная обмотка (а); вторичная обмотка (б)

Для проверки правильности расчета параметров трансформатора в MATLAB/Simulink была собрана схема (рис. 2) для моделирования необходимых режимов работы. Схема состоит из двух идеальных источников питания постоянного напряжения, двух транзисторов, формирующих на первичной обмотке трансформатора прямоугольные импульсы и задающего генератора сигнала управления транзисторами, и включает в себя, исследуемый трансформатор.

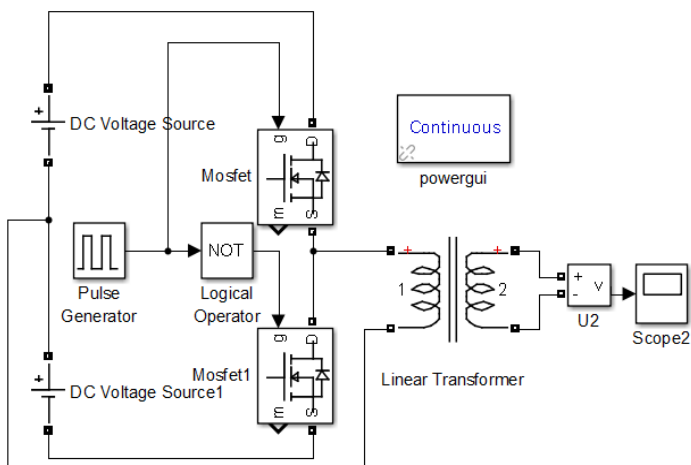


Рис. 2. Тестовая схема для проверки режимов работы трансформатора

В схеме на рис. 2 на вход трансформатора подается переменный импульсный сигнал с частотой 10 кГц и амплитудой  $U_1 = 100$  В, формируемый двумя транзисторными ключами (рис. 3). Напряжение на вторичной обмотке

трансформатора повторяет входное напряжение, а амплитуда  $U_2 = 10$  кВ, соответствует амплитуде заданной в исходных данных.

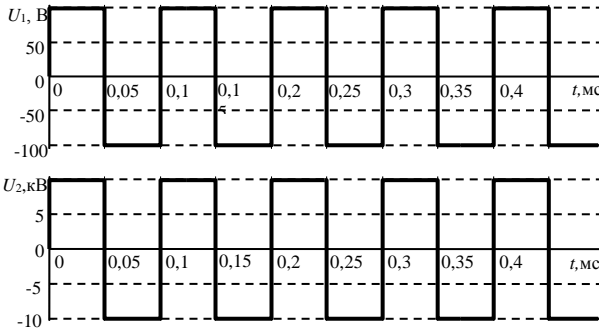


Рис. 3. Результаты моделирования работы трансформатора при импульсном входном сигнале

Формируемые транзисторными ключами импульсы подаются на трансформатор и усиливаются до амплитуды 10 кВ, ко вторичной обмотке которого, подключается низкочастотный LC-фильтр (рис. 4).

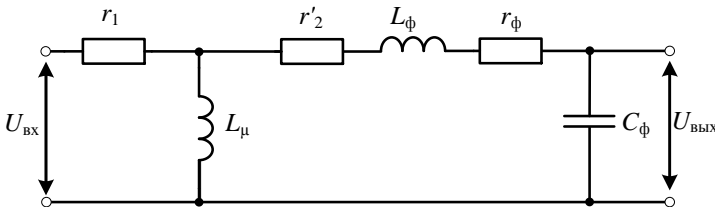


Рис. 4. Упрощенная схема замещения трансформатора и LC-фильтра

Передаточная функция, приведенной на рис. 4 упрощенной схемы замещения, определяется выражением

$$W(p) = \frac{L_{\mu} p}{(L_{\mu} p + r_1)(C_{\phi} L_{\phi} p^2 + C_{\phi} (r'_2 + r_{\phi}) p + 1)}. \quad (1)$$

На рис. 5, а представлена логарифмическая АЧХ, полученная из выражения (1) при известных параметрах трансформатора.

Полученные на основе анализа ЛАЧХ емкость и индуктивность LC-фильтра были выбраны равными  $C_{\phi} = 1$  нФ,  $L_{\phi} = 1$  Гн. Количество витков можно рассчитать, используя методики описанные в [3-4, 7]. Используя приближенную формулу, приведенную в [4] для выбранного типа сердечника количество витков будет равно

$$N = \sqrt{\frac{L \cdot 10^3}{A_L}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^3}{70 \cdot 10^{-6}}} = 4 \text{ витка,}$$

где  $A_L$  – индуктивный фактор (коэффициент индуктивности) Гн. Для выбранного типа сердечника  $A_L = 60\text{-}70$  мкГн.

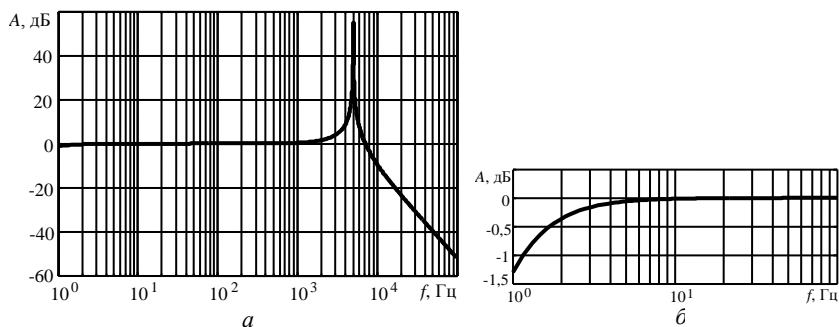


Рис.5. ЛАЧХ, полученная по передаточной функции (1) (а); низкочастотный участок ЛАЧХ (б)

Таким образом, при проектировании импульсного трансформатора на тороидальном сердечнике были достигнуты требуемые параметры, а результаты расчетов проверены моделированием на тестовой схеме. В результате применения метода оценки параметров LC-фильтра удалось спроектировать компактный высоковольтный фильтр.

### Список литературы

1. Вдовин, С.С. Проектирование импульсных трансформаторов/ С.С. Вдовин. – Изд. 2-е, перераб и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 208 с.
2. Гончарук, А.И. Расчет и конструирование трансформаторов/ А.И. Гончарук. – М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 256 с.
3. Colonel WM., McLyman T. Transformer and inductor design handbook third edition, revised and expanded [Электронный ресурс] / Kg Magnetics, Inc. Idyllwild, California, U.S.A. – Режим доступа: [https://coefs.uncc.edu/mnoras/courses/power-electronics/tr\\_design/](https://coefs.uncc.edu/mnoras/courses/power-electronics/tr_design/) (дата обращения 07.09.2020).
4. Powder core catalog [Электронный ресурс] / Magnetics Inc. – Режим доступа: [https://ferrite.ru/uploads/pdf/products/2011MagneticsPowderCore\\_Catalog.pdf](https://ferrite.ru/uploads/pdf/products/2011MagneticsPowderCore_Catalog.pdf) (дата обращения 07.09.2020).
5. Стародубцев, Ю.Н. Теория и расчет трансформаторов малой мощности/ Ю.Н. Стародубцев. – М.: ИП РадиоСофт. – 2005. – 320 с.
6. Magnetics design 4 – Power Transformer Design [Электронный ресурс] / Texas Instruments. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/ml/slup126/slup126.pdf> (дата обращения 07.09.2020).
7. Савин, М. Расчет и конструирование планарного трансформатора для обратноходового преобразователя/ М. Савин, С. Абрамов // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2019. – № 8 (189). – С. 40-44.

Материал поступил в редколлегию 12.10.20.