

УДК 621.31

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Семёнов А.С.

Политехнический институт (филиал) ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» в г. Мирном, e-mail: sash-alex@yandex.ru

В статье рассмотрено исследование режимов работы однофазного трансформатора при помощи математического моделирования в пакете программ MatLab. Рассмотрены режимы холостого хода и короткого замыкания. Описана математическая модель с подробным содержанием блоков, приведен расчет относительных параметров трансформатора на основании паспортных данных завода изготовителя, произведено описание программы исследования, куда должно входить определение параметров схемы замещения при помощи опытов холостого хода и короткого замыкания, снятие нагрузочных и рабочих характеристик трансформатора, математическое моделирование режимов работы однофазного трансформатора. Результаты исследования являются построение нагрузочной диаграммы и рабочих характеристик трансформатора, также необходимо привести формы напряжения и тока на первичной и вторичной обмотке трансформатора, полученные с помощью осциллографа в модели.

Ключевые слова: трансформатор, режимы работы, холостой ход, короткое замыкание, моделирование, пакет программ MatLab

RESEARCH OF OPERATING MODES SINGLE-PHASE TRANSFORMER BY MATHEMATICAL MODELING

Semenov A.S.

Polytechnic institute (branch) of North-Eastern Federal University named after M.K. Ammosov in Mirny, e-mail: sash-alex@yandex.ru

The article deals with the study of operating modes of a single-phase transformer with the help of mathematical modeling in MatLab software package. Are considered idle and short-circuit. The mathematical model with the detailed content of the blocks, is a calculation of the relative transformer parameters on the basis of the passport data of the manufacturer, produced the study program description, which should include a definition of the parameters of the equivalent circuit with the help of experiments idling and short circuit protection, removal of the load and the working characteristics of the transformer, mathematical modeling modes of operation of single-phase transformer. Results of the study are construction diagrams and load characteristics of the transformer, it is also necessary to bring the forms of voltage and current on a primary and secondary winding of the transformer produced by using an oscilloscope model.

Keywords: transformer, modes, the idle speed, short circuit, simulation, MatLab software package

Трансформатором называется статистическое электромагнитное устройство с двумя или несколькими обмотками, использующие явление электромагнитной индукции для преобразования токов и напряжений одной системы в токи и напряжения другой. Особо важную роль трансформаторы играют при передаче электрической энергии на большие расстояния, так как в этом случае до поступления её потребителю она подвергается многократному (3-5 раз) преобразованию с низкого напряжения в высокое напряжение и обратно.

Режим холостого хода. В режиме холостого хода ток во вторичной цепи равен нулю (нагрузка не подключена). При подаче на первичную обмотку трансформатора синусоидального питающего напряжения по ней протекает ток. Под действием связывающего обе обмотки магнитного потока в обеих обмотках наводится ЭДС самоиндукции. Режим холостого хода позволяет определить важные характеристики и параметры трансформатора для практики, такие как коэффициент трансформации, потери

в ферромагнитном сердечнике, индуктивное сопротивление контура намагничивания.

Режим короткого замыкания. Вторичная обмотка при этом замыкается накоротко, а на первичную обмотку подается напряжение U такой величины, при которой ток первичной обмотки имеет номинальное значение. Величина U даже для трансформаторов малой мощности не превышает 10-25 % от номинального значения.

Содержание работы. Необходимо определить параметры схемы замещения при помощи опытов холостого хода и короткого замыкания, снять нагрузочные и рабочие характеристики трансформатора, произвести математическое моделирование режимов работы однофазного трансформатора. На последнем пункте остановимся подробнее.

Описание математической модели. Структурная схема виртуальной лабораторной установки для исследования режимов работы однофазного трансформатора представлена в виде математической модели, реализованной в пакете программ MatLab.

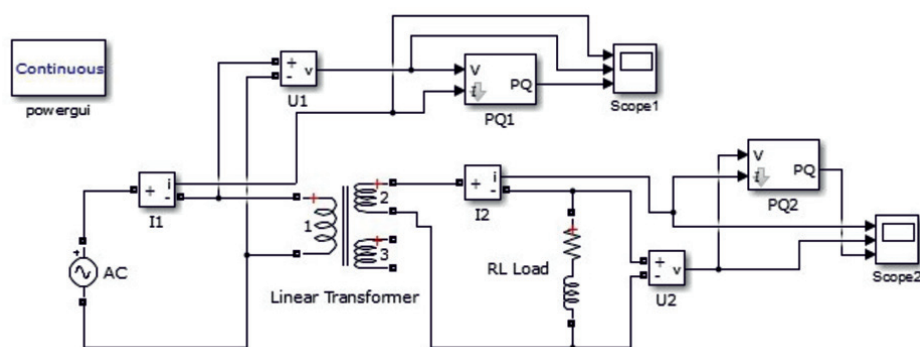


Рис. 1. Модель для исследования режимов работы однофазного трансформатора

Модель содержит:

– источник переменного напряжения AC из библиотеки Power System Blockset/Electrical Sources;

– измерители напряжения U_1 и U_2 , измерители тока I_1 и I_2 в первичной и вторичной цепях трансформатора из библиотеки Power System Blockset/Measurement;

– исследуемый трансформатор (*Linear Transformer*) и нагрузку (*RL Load*) из библиотеки Power System Blockset/Elements;

– измерители активной и реактивной мощности в первичной и вторичной цепях трансформатора (*PQ1* и *PQ2*) из библиотеки Power System Blockset/Extras/Measurement;

– блок пользователя (*Powergui*), который измеряет значения U_1 , U_2 , I_1 , I_2 ;

– блоки *Display1*, *Display2* для количественного представления измеренных параметров и блоки *Scope1*, *Scope1* для наблюдения формы кривых, которые являются блоками главной библиотеки Simulink/Sinks.

Параметры однофазного трансформатора, подлежащего исследованию, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры трансформатора

Тип трансформатора	S_n [кВА]	U_k [%]	P_k [Вт]	P_{10} [Вт]	I_{10} [%]
ОС-10/0,66	10	4,5	280	90	7

Базовыми значениями параметров трансформатора являются: расчетная полная мощность S , обозначенная как P [ВА], номинальная частота (Гц), действующее номинальное напряжение (В) соответствующей обмотки. Для каждой обмотки относительные сопротивления и индуктивность определяются выражениями:

$$R_n(pu) = \frac{R_n}{Z_{bn}}; L_n(pu) = \frac{X_n}{Z_{bn}},$$

$$\text{где } Z_{bn} = \frac{U_n^2}{S}.$$

Расчет относительных параметров трансформатора осуществляется на основании паспортных данных завода изготовителя по выражениям:

$$R_m = \frac{R_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 \cdot I_{10} \cdot \cos \phi_0},$$

$$L_m = \frac{x_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 \cdot I_{10} \cdot \sin \phi_0},$$

$$\phi_0 = \arccos \frac{P_{10}}{U_1 \cdot I_{10}}$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2 \cdot Z_b} = \frac{S \cdot U_k \cdot \cos \phi_k}{2 \cdot U_1^2 \cdot I_n},$$

$$L_{p1} = L'_{p2} = \frac{x_k}{2 \cdot Z_b} = \frac{S \cdot U_k \cdot \sin \phi_k}{2 \cdot U_1^2 \cdot I_n},$$

$$\phi_k = \arccos \frac{P_k}{U_k \cdot I_n}.$$

При этом номинальный ток трансформатора определяем из выражения:

$$I_n = \frac{S}{U_1}.$$

В полях окна настройки параметров трансформатора последовательно задаются:

- мощность трансформатора и частота;
- действующее напряжение и относительные параметры схемы замещения первичной обмотки;
- действующее напряжение и относительные параметры схемы замещения вторичных обмоток;
- относительные параметры ветви намагничивания;

– переменные состояния трансформатора, которые измеряются блоком *Multimeter*.

Поскольку блок *Multimeter* не используется, то в поле *Measurement* из выпадающего меню выбирается опция *None*.

В полях окна настройки параметров источника питания задаются:

- амплитуда источника (В);
- начальная фаза в градусах;
- частота (Гц);
- образец времени (с);
- переменные, измеряемые блоком *Multimeter*.

Напряжение и частота источника должны соответствовать параметрам трансформатора. В полях окна настройки параметров нагрузки задаются R, L, C. Для исключения реактивных элементов индуктивность должна быть задана равной нулю, а емкость – бесконечности (*inf*). В окне настройки параметров измерителя мощности

указывается частота, на которой измеряется активная и реактивная мощность. В полях окна настройки дисплея указывается формат представления числовых результатов, в поле *Decimation* (разбивка) задается число шагов вычисления, через которые значения выводятся на дисплей.

Порядок проведения исследования.

Тип трансформатора для выполнения эксперимента выбираем согласно условиям работы. Заполняем окно настройки параметров моделирования. Определяем параметры схемы замещения. Сравнение их с заданными параметрами производится в окне настройки при помощи методов холостого хода и короткого замыкания. При холостом ходе нагрузка отключена, трансформатор запитан номинальным напряжением. Действующие значения напряжений и токов трансформатора при холостом ходе определяются в окне блока *Powergui*.

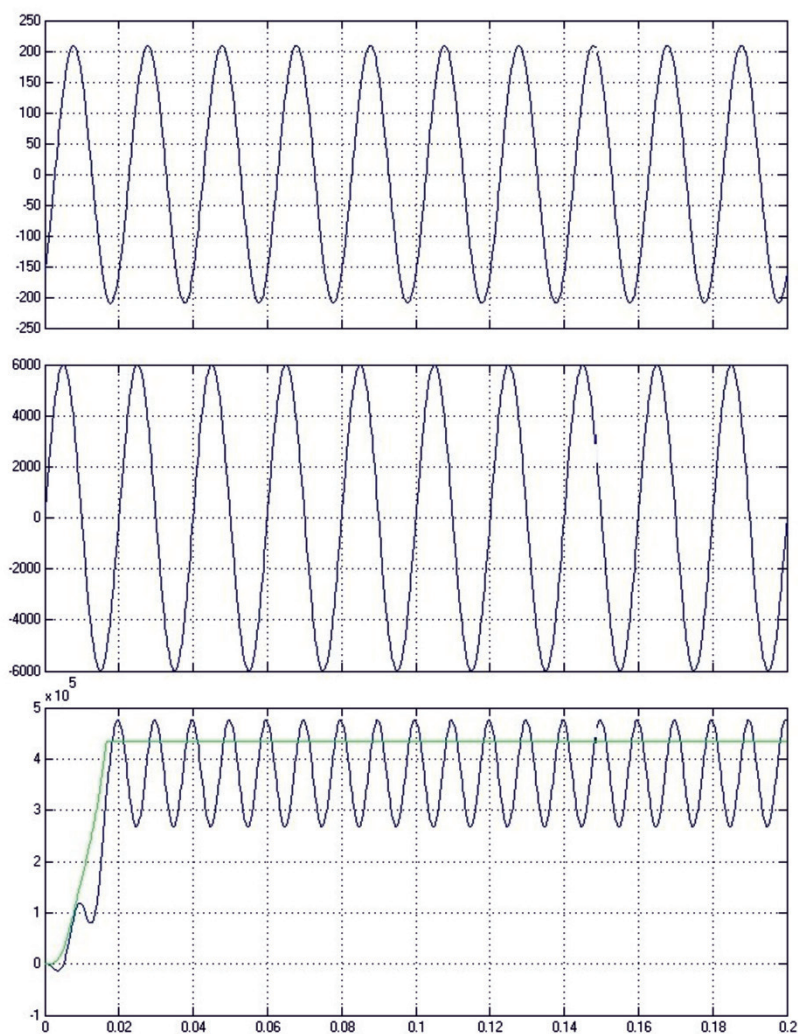


Рис. 2. Результаты моделирования на первичной обмотке трансформатора

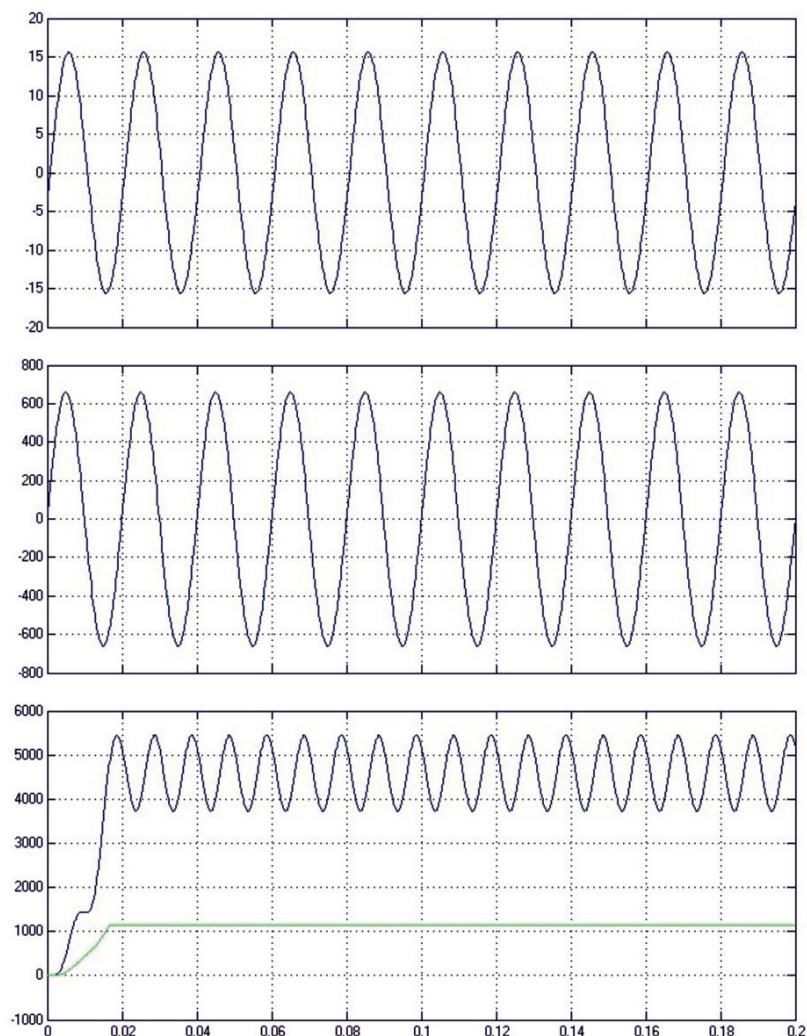


Рис. 3. Результаты моделирования на вторичной обмотке трансформатора

Таблица 2

Измеренные и рассчитанные значения

Нагр.	Измерения								Вычисления		
R _н [Ом]	P1 [Вт]	Q1 [ВА]	U1 [В]	I1 [А]	P2 [Вт]	Q2 [ВА]	U2 [В]	I2 [А]	φ ₁ [град]	cos φ ₁ [град]	η

Активная мощность в режиме холостого хода равна потерям в сердечнике трансформатора. Относительные параметры ветви намагничивания рассчитываются по выражениям, приведенным выше. Опыт короткого замыкания проводится при коротком замыкании во вторичной цепи. При этом напряжение источника питания должно быть равно напряжению короткого замыкания трансформатора (U_k). Активная мощность в режиме короткого замыкания при первичном токе короткого замыкания равным номинальному, определяет потери в обмотках трансформатора. После проведения опытов

и расчета параметров следует сравнить их с теми, которые были введены в окно параметров.

Снятие нагрузочной и рабочих характеристик трансформатора производится на модели (рис. 1) при изменении сопротивления нагрузки от 0,2 до 1,2 от $R_{ном}$. При этом для каждого значения сопротивления нагрузки осуществляется моделирование.

Номинальное сопротивление нагрузки рассчитывается по формуле:

$$R_{ном} = \frac{U_1^2}{S}.$$

Результаты исследования. После проведения исследований заполняем табл. 2.

Вычисления производятся по выражениям:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad \phi = \arctg \frac{Q_1}{P_1}.$$

По данным таблицы строим нагрузочную характеристику трансформатора и на отдельном рисунке – рабочие характеристики. Приводим формы напряжения и тока на первичной и вторичной обмотке трансформатора, полученные с помощью осциллографа *Scope*.

Список литературы

- Егорова А.А., Семёнов А.С., Петрова М.Н. // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2-2. – С. 840.
- Рушкин Е.И., Семёнов А.С. Анализ энергоэффективности системы электропривода центробежного насоса при помощи моделирования в программе MATLAB // В сборнике: Студенческий научный форум Материалы V Международной студенческой электронной научной конференции: электронная научная конференция (электронный сборник). Российская Академия Естествознания, 2013. URL: <http://www.scienceforum.ru/2013/210/2633> (дата обращения: 12.02.2013).
- Рушкин Е.И., Семёнов А.С. // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-2. – С. 341–342.
- Рушкин Е.И., Семёнов А.С. // Технические науки – от теории к практике. – 2013. – № 20. – С. 34–41.
- Семёнов А.С. // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2014. – Т. 11. № 1. – С. 51–59.
- Семёнов А.С. // Естественные и технические науки. – 2013. – № 4 (66). – С. 296–298.
- Семёнов А.С. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 9-2. – С. 29–34.
- Семёнов А.С. Моделирование автоматизированного электропривода. Методические указания по выполнению лабораторных работ. – Москва, 2012. – 60 с.
- Семёнов А.С. Моделирование режимов работы электродвигателей насосов малой и средней мощности водоотливных установок применительно к подземным рудникам // В сборнике: Современная наука: тенденции развития материалы II Международной научно-практической конференции, (30 июля 2012 г.): сборник научных статей: в 3 томах. Редактор: Бисалиев Р.В. – Краснодар, 2012. – С. 112–116.
- Семёнов А.С. // Наука в центральной России. – 2012. – № 25. – С. 23–27.
- Семёнов А.С. Преподавание учебных дисциплин у специальностей «Электроснабжение» и «Электромеханика» с использованием программы MATLAB // В сборнике: Студенческий научный форум материалы VI Международной студенческой электронной научной конференции: электронный ресурс, 2014. URL: <http://www.scienceforum.ru/2014/422/4146> (дата обращения: 03.03.2014).
- Семёнов А.С. Программа MATLAB. Методические указания к лабораторным работам. – Москва, 2012. – 40 с.
- Семёнов А.С. // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-1. – С. 232–236.
- Семенов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М., Матул Г.А. // Естественные и технические науки. – 2014. – № 3 (71). – С. 165–171.
- Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. Моделирование режимов работы электроприводов горного оборудования / монография. Подробный анализ систем электроприводов, их моделирование, сопоставление параметров и выводы о возможном применении / Saarbrücken, Deutschland, 2013. – 112 с.
- Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. Преподавание учебных дисциплин у специальностей «Электроснабжение» и «Электромеханика» с использованием программы MATLAB // В книге: Наука и инновационные разработки – Север: сборник тезисов докладов международной научно-практической конференции. Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова. – 2014. – С. 105–106.
- Семёнов А.С., Кугушева Н.Н., Хубиева В.М. // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8-5. – С. 1066–1070.
- Семёнов А.С., Пак А.Л., Шипулин В.С. // Приволжский научный вестник. – 2012. – № 11 (15). – С. 17–23.
- Семёнов А.С., Рушкин Е.И. Моделирование электродвигателя привода рабочего органа комбайна АМ-105 // В сборнике: Наука и инновационные разработки – Север, 2014. – С. 195–199.
- Семёнов А.С., Хазиев Р.Р. Выбор электродвигателя проходческого комбайна путём математического моделирования // В сборнике: Студенческий научный форум – 2015 Электронное издание, 2015. URL: <http://www.scienceforum.ru/2015/902/16211> (дата обращения: 08.03.2015).
- Семёнов А.С., Хазиев Р.Р. // Международный студенческий научный вестник. 2015. – № 5-5. – С. 694–698.
- Семёнов А.С., Хубиева В.М., Кугушева Н.Н. Моделирование режимов работы систем электроснабжения горных предприятий / монография. Политехнический институт (филиал) Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Аммосова. – Москва, 2015. – 100 с.
- Семёнов А.С., Хубиева В.М., Петрова М.Н. // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 10-3. – С. 523–528.
- Семёнов А.С., Шипулин В.С., Рушкин Е.И. Моделирование режимов работы микро-ГЭС и ветрогенераторной установки // В сборнике: Современные исследования в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности сборник научных статей по материалам I Международной научно-практической конференции. Минобрнауки России, Юго-западный государственный университет (ЮЗГУ); редколлегия: А.В. Филинович. – 2012. – С. 102–107.
- Хубиева В.М., Петрова М.Н., Семёнов А.С. Проектирование электропривода подборщика путем моделирования. Производится расчет электропривода подборщика добычного комбайна и математическое моделирование его режимов работы / Saarbrücken, Deutschland, 2015. – 96 с.
- Шипулин В.С., Семёнов А.С. Моделирование режимов работы системы электроснабжения добычного участка подземного рудника // В сборнике: Студенческий научный форум Материалы V Международной студенческой электронной научной конференции: электронная научная конференция (электронный сборник). Российская Академия Естествознания, 2013. URL: <http://www.scienceforum.ru/2013/210/2631> (дата обращения: 12.02.2013).
- Шипулин В.С., Семёнов А.С. // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8-2. – С. 344–347.
- Semenov A.S. Model a low power the wind generator setup // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – № 12. – С. 65–66.
- Semenov A.S., Shipulin V.S. Analysis of energy efficiency of the system drive centrifugal pump GRAT-4000 by modeling in MATLAB // Europäische Fachhochschule. – 2013. – № 1. – С. 228–230.