

УДК 621.316.9

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ТРЕХФАЗНОГО
ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ТРЕХФАЗНОМ КОРОТКОМ
ЗАМЫКАНИИ**

Абазоков И.А., Белойванов М.С., Притоманов В.В.,

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ г. Шахты

Рассмотрены вопросы создания однофазной модели двухобмоточного трансформатора в математическом пакете Simulink. Предложена модель для расчета и исследования динамических режимов трехфазного двухобмоточного трансформатора. На примере распределительного трансформатора ТМ-1000/10 10/0,4кВ проведены расчеты тока короткого замыкания в первой и во второй обмотках трансформатора и анализ установившихся несимметричных режимов, возникающих при коротком замыкании. Проведен анализ результатов моделирования и сравнение результатов моделирования с параметрами реально существующей модели трансформатора.

Исследование несимметричных режимов работы трехфазных трансформаторов целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с использованием мощных современных программных средств, таких как Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink. Существенно большие возможности по расчету систем электроснабжения предоставляют многочисленные блоки трехфазных трансформаторов.

Ключевые слова: трехфазное короткое замыкание, моделирование, трансформатор.

**SIMULATION OF DYNAMIC REGIMES OF THREE-PHASE TWO-WINDING
TRANSFORMER AT THREE-PHASE SHORT-CIRCUIT**

Abazokov I.A., Belayvanov M.S., Pritomanov V.V.

Institute of Service and Entrepreneurship (Branch) of DSTU

The questions of creating a single-phase model of a two-winding transformer in the mathematical package of Simulink are considered. A model is proposed for calculating and studying the dynamic regimes of a three-phase two-winding transformer. On the example of the TM-1000/10 10 / 0.4 kV distribution transformer, the short-circuit current in the first and the second windings of the transformer was calculated and the steady-state asymmetric regimes resulting from a short circuit were analyzed. The analysis of simulation results and the comparison of simulation results with the parameters of a real-world transformer model are carried out.

The study of asymmetric modes of operation of three-phase transformers is advisable to be carried out by computer simulation using powerful modern software tools such as Matlab with the built-in Simulink visual modeling package. Significantly great possibilities for the calculation of power supply systems are provided by numerous blocks of three-phase transformers.

Keywords: three-phase short circuit, simulation, transformer.

Исследование несимметричных режимов работы трехфазных трансформаторов целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с использованием

мощных современных программных средств, таких как Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink. Существенно большие возможности по расчету систем электроснабжения предоставляют многочисленные блоки трехфазных трансформаторов.

В качестве объекта моделирования принят трансформатор ТМ-1000, мощностью 1000кВА.

Трансформаторы ТМ-1000 изготавливаются с естественным масляным охлаждением в корпусе с расширительным бачком. Выбор данной модели трансформатора обусловлен широким распространением и повсеместным использованием его в бытовых электрических сетях [5].

Основные технические характеристики трансформатора приведены в таблице 1:

Таблица 1. - Основные технические характеристики трансформатора

Тип, $S_{2H}, кВА$	$U_{1H},$ кВ	$U_{2H},$ кВ	$P_{xx},$ кВт	$P_k,$ кВт	$I_{xx},$ %	$u_k,$ %	Схема, группа соединения обмоток
ТМ 1000	10	0,4	1,9	12,2	1,7	5,5	Y/YH-0

где:

S_{2H} – номинальная мощность трансформатора,

U_{1H} - номинальное высшее напряжение,

U_{2H} - номинальное низшее напряжение,

Ниже приведены результаты расчётов внешней характеристики трансформатора ТМ-1000/10 при подключении к нему активно-индуктивной нагрузки с $\cos\varphi_{нагр} = 0,8$ и тока короткого замыкания в первой и во второй обмотках трансформатора ТМ-1000/10, воспользовавшись блоком **Linear Transformer** пакета моделирования Matlab Simulink

Параметры обмоток трансформатора и намагничивающей ветви с учетом следующих допущений: параметры первой обмотки и приведенные параметры второй обмотки приняты равными; при подсчете номинального тока исключено влияние намагничивающего тока; на холостом ходу ЭДС и напряжение первой обмотки приняты равными друг другу [4].

С учетом принятых допущений и на основании данных, представленных в таблице 1, находим активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток трансформатора, а также параметры намагничивающей ветви:

$$I_{1n} \approx \frac{S_{2H}}{\sqrt{3}U_{1H}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 57,7367 A - \text{номинальный фазный ток первичной обмотки};$$

$$z_k = \frac{U_{2H} \cdot u_k \%}{\sqrt{3} \cdot I_{2H} \cdot 100\%} = \frac{10000 \cdot 5,5\%}{\sqrt{3} \cdot 57,7367 \cdot 100\%} = 5,5 Ом - \text{полное сопротивление короткого}$$

замыкания;

$$r_k = \frac{P_k}{3I_{2H}^2} = \frac{12000}{3 \cdot 57,7367^2} = 1,1999 \text{ Ом} - \text{ активная составляющая полного сопротивления}$$

короткого замыкания;

$$R_1 \approx R_2' = \frac{r_k}{2} = \frac{1,1999}{2} = 0,59995 \text{ Ом} - \text{ активное сопротивление первой обмотки и}$$

приведенное активное сопротивление второй;

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{0,59995}{25^2} = 0,0009599 \text{ Ом} - \text{ активное сопротивление второй обмотки, здесь}$$

$k = 10/0,4 = 25$ коэффициент трансформации;

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,1999^2} = 5,3675 \text{ Ом} - \text{ реактивное сопротивление короткого}$$

замыкания;

$$L_1 \approx L_2' = \frac{x_k}{2\omega} = \frac{5,3675}{2 \cdot 2\pi \cdot 50} = 8,5426 - \text{ индуктивность рассеяния первой обмотки и}$$

приведенная индуктивность рассеяния второй обмотки;

$$L_2 = \frac{L_2'}{k^2} = \frac{8,5426}{25^2} = 0,01366848 \text{ мГн} - \text{ индуктивность рассеяния второй обмотки;}$$

$$P_{xx} = 3E_{\phi 1} I_{xxa} \approx 3U_{\phi 1} \frac{U_{\phi 1}}{R_m} \rightarrow R_m = \frac{U_1^2}{P_{xx}} = \frac{10000^2}{1900} = 52631,58 \text{ Ом} - \text{ активное}$$

сопротивление параллельной ветви намагничивающего контура схемы замещения, потери в которой равны потерям холостого хода (магнитным потерям);

$$I_{xxa} = \frac{U_{\phi 1}}{R_m} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot R} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 52631,58} = 0,1097 \text{ А} - \text{ активная составляющая тока холостого}$$

хода;

$$I_{xx} = I_{In} \cdot \frac{I_{xx} \%}{100\%} = 57,7367 \frac{1,7}{100} = 0,9815 \text{ А} - \text{ ток холостого хода;}$$

$$I_{xxr} = \sqrt{I_{xx}^2 - I_{xxa}^2} = \sqrt{0,9815^2 - 0,1097^2} = 0,9754 \text{ А} - \text{ реактивная (намагничивающая)}$$

составляющая тока холостого хода;

$$L_m = \frac{U_{\phi 1}}{\omega I_{xxr}} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot \omega I_{xxr}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 314,159 \cdot 0,9754} = 18,84169 \text{ Гн} - \text{ взаимная индуктивность}$$

обмоток.

На следующем этапе проведено моделирование рассчитанных параметров трансформатора в модели, построенной в Simulink [1],[2].

В соответствие с выкладками и расчетами, принята модель, представленная на рисунке 1.

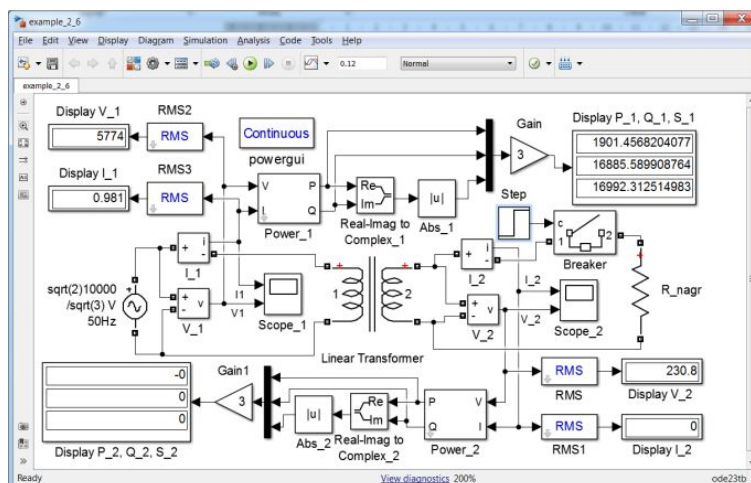


Рисунок 1 – Модель фазы трансформатора

Время расчета задано равным 0.12 с. Во вкладке **Simulation - Model Configuration Parameters** вносятся изменения по решателю и относительной точности согласно рисунку 2.

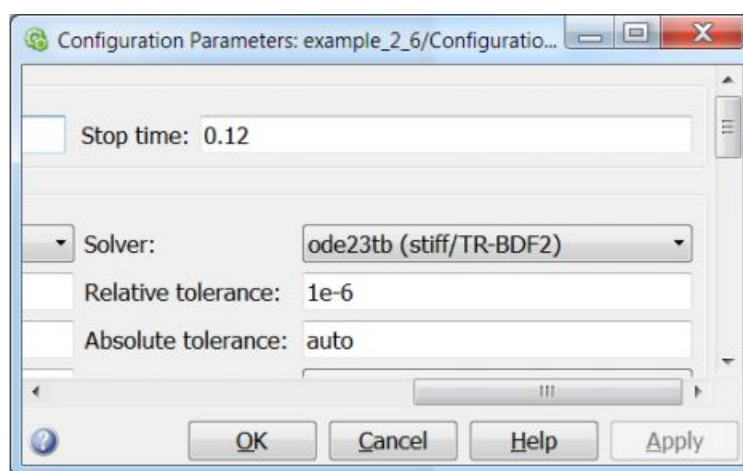


Рисунок 2 – Конфигурационные параметры «решателя»

В блоке **Step** установлен параметр **Step time** равное 0.02 с. Поскольку рассматривается одна фаза трехфазного трансформатора, то в окно параметров источника переменного напряжения необходимо ввести амплитудное значение фазного напряжения

$$U_{m\phi 1} = \frac{\sqrt{2}U_1}{\sqrt{3}}, \text{ и частоту } 50 \text{ Гц.}$$

В окне параметров блока сопротивлений выбран тип ветви **R** и в окне **Resistance (Ohms)** установлен параметр **inf**, что означает бесконечность. Последнее необходимо для моделирования установившегося режима холостого хода.

Результаты моделирования представлены на дисплеях рисунке 3.

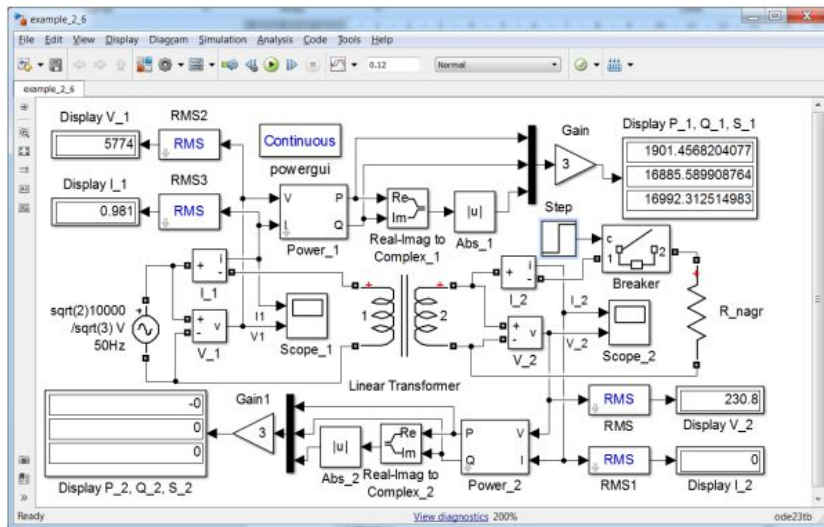


Рисунок 3 – Установившийся режим холостого хода

В верхнем правом углу на **Display P₁, Q₁, S₁** показаны значения мощностей.

Потери не отличаются от паспортных значений, а токи холостого хода достаточно близки к паспортным (**Display I₁** в верхнем левом углу). Следует отметить значительную реактивную мощность, потребляемую трансформатором в режиме холостого хода (16,9 кВАр). В блоке **Display P₁, Q₁, S₁** установлен формат **long**.

Для проведения опыта короткого замыкания необходимо изменить сопротивление нагрузки на 10^{-12} Ом, **Step time** на 0.02 с, напряжение источника уменьшено до напряжения короткого замыкания, т.е. до $U_{кз} = \frac{\sqrt{2}U_1}{\sqrt{3}} \cdot 0,055$, а относительную точность установлена 10^{-8} .

$$U_{кз} = \frac{\sqrt{2}U_1}{\sqrt{3}} \cdot 0,055, \text{ а относительную точность установлена } 10^{-8}.$$

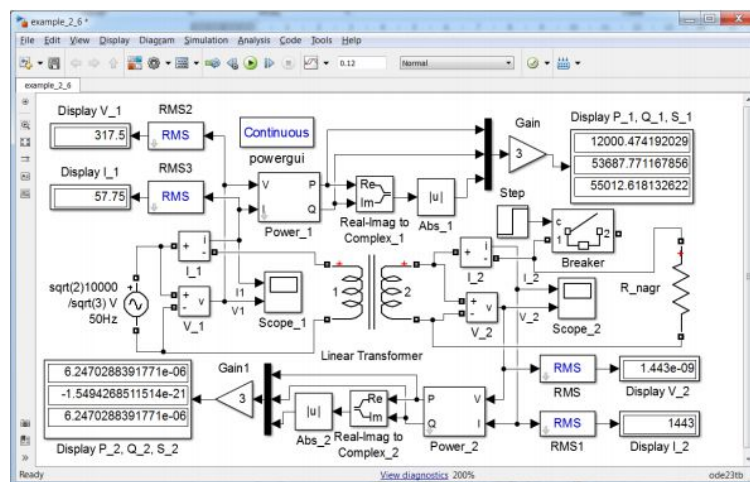


Рисунок 4 – Опыт короткого замыкания

Результаты расчета, представленные в дисплеях на рисунке 4, показывают, что потери короткого замыкания совпали с паспортными данными, а токи обмоток также достаточно близки паспортным значениям, это свидетельствует о хорошей сходимости.

Следует отметить, что в модели имеется возможность рассчитать токи и напряжения в установившийся режим работы, не прибегая к решению дифференциальной системы

уравнений, а используя алгебраические уравнения. Для этого двойным щелчком мышки по блоку **Continuous** необходимо вызывать программу **powergui**. Изменяя параметры схемы, например, замыкая вторичную обмотку, и можно получить результаты, представленные на рисунке 5.

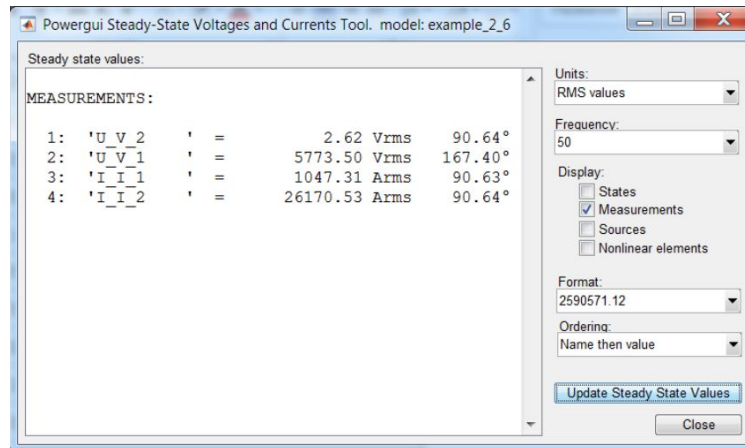


Рисунок 5 – Токи и напряжения в установившемся режиме работы

Расчет переходного процесса короткого замыкания осуществим при неблагоприятной фазе $\alpha_0 = \varphi + \frac{\pi}{2} = 1.3509 + \frac{\pi}{2} = 2,9217$. Введем это значение фазового сдвига в окно параметров источника переменного напряжения, преобразовав радианы в градусы. На рисунке 6 представлены кривые переходного процесса во вторичной обмотке трансформатора. Следует отметить, что и кривая тока в первичной обмотке качественно имеет такой же вид, как и во вторичной обмотке (рисунок 7).

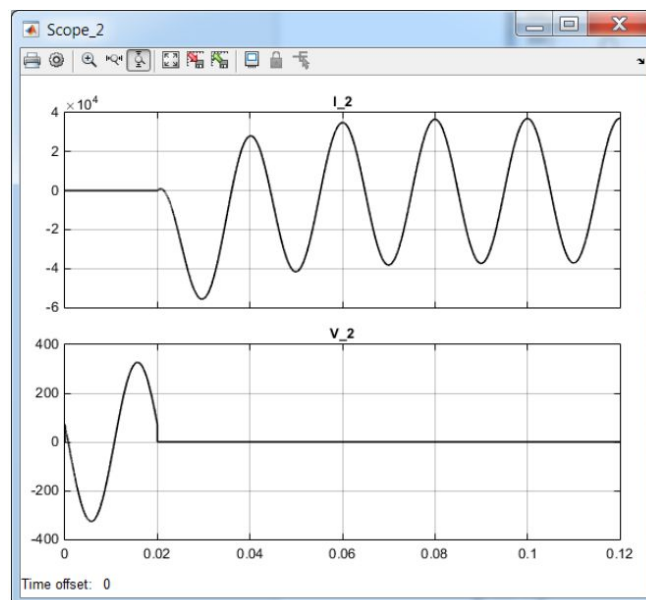


Рисунок 6 – Кривые переходного процесса во вторичной обмотке трансформатора

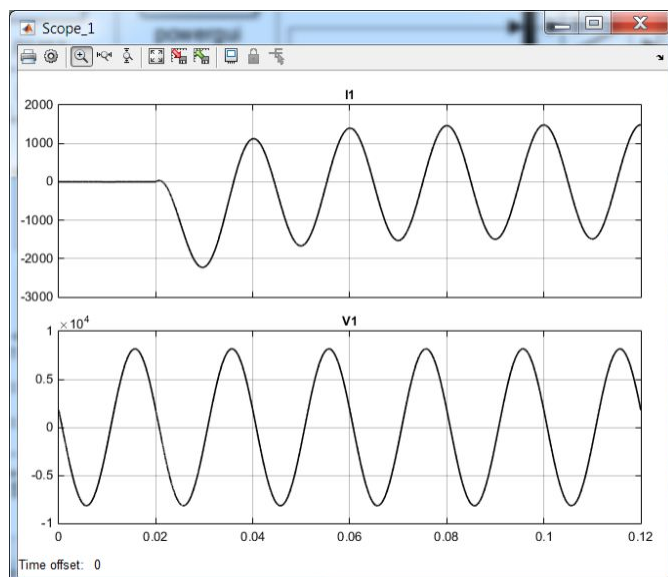


Рисунок 7 – Кривые переходного процесса в первичной обмотке трансформатора
 В результате моделирования опыта короткого замыкания и холостого хода одной обмотки трансформатора были получены следующие результаты:

Потери короткого замыкания – 12 кВт (паспортные 10,8 кВт)

Потери холостого хода – 1,901 кВт (паспортные 1,6 кВт)

Приведенные в статье примеры моделей и полученные результаты моделирования демонстрируют большие возможности математического моделирования при анализе переходных процессов в трансформаторах напряжения и позволяют сократить время проектирования и затраты на разработку прототипов трансформаторов

Список литературы

1. Курбатов, Е. А. MATLAB 7. Самоучитель. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006
2. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; Питер, 2008.
3. Дьяконов, В. П. и Пеньков, А. А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике. Справочник. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009.
4. Валюкевич Ю.А., Алепо А.В., Дубовсков В.В., Яковенко Д.М. Анализ влияния конструктивных параметров манипулятора с параллельной структурой на точность позиционирования схвата опубликована в журнале "Фундаментальные исследования" № 11 (часть 4) 2016, стр. 687-690.
5. Валюкевич Ю.А., Алепо А.В., Дубовсков В.В., Яковенко Д.М. Определение параметров движения схвата параллельного манипулятора с гибкими звеньями под действием на груз внешней возмущающей силы "Фундаментальные исследования" № 2 (часть 1) 2016, стр. 28-32.