

**УДК 621.316.9**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОДНОТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ**

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

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

В работе рассмотрено построение модели однотрансформаторной подстанции в среде Matlab Simulink, прикладной библиотеке SymPowerSystems. Проведен расчет переходных процессов при коротких замыканиях, набросе и сбросе нагрузки, подключении асинхронного двигателя, а также трехфазном коротком замыкании.

Трансформаторные подстанции являются основным звеном системы электроснабжения промышленных предприятий, гражданских объектов. В связи с этим моделирование переходных процессов, протекающих в этих подстанциях, является важной и актуальной задачей. Результаты моделирования позволят правильно выбрать оборудование, оценить влияние различных переходных процессов на качество электроснабжения, выбрать компенсирующие устройства и т.д. В работе рассмотрено построение и моделирование однотрансформаторной подстанции, как наиболее распространенной. Также в работе проанализирована применимость полученной модели в реальных условиях проектирования систем электроснабжения.

Ключевые слова: трехфазное короткое замыкание, моделирование, трансформатор.

## **SIMULATION OF TRANSITION PROCESSES IN A SINGLE TRANSFORMER SUBSTATION**

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

Institute of Service and Entrepreneurship (Branch) of DSTU

In this paper, we consider the construction of a single-transformer substation model in the Matlab Simulink environment, the application library of SymPowerSystems. The calculation of transients during short circuits, overloading and load shedding, connection of an asynchronous motor, as well as a three-phase short circuit is carried out.

Transformer substations are the main link in the power supply system of industrial enterprises and civilian objects. In this connection, the modeling of the transient processes taking place in these substations is an important and urgent task. The results of modeling will allow to choose the right equipment, assess the influence of various transient processes on the quality of power supply, choose compensating devices, etc. In this work, the construction and modeling of a single-transformer substation, as the most common one, is considered. Also, the applicability of the obtained model in real conditions for the design of power supply systems is analyzed.

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

Модель цеха показана на рисунке 1. Зададимся следующими параметрами подстанции:

1) Трехфазный источник напряжения [1]: первичное линейное напряжение – 10 кВ; частота напряжения – 50 Гц; соединение фаз обмотки источника –  $Y_n$ .

2) Кабельная линия L\_1 (блок **Three-Phase Series RLC Branch**): активное сопротивление – 0,2 Ом; индуктивность – 2,48E-5 Гн.

3) В качестве трансформатора выберем трансформатор ТМ-1000, мощностью 1000кВА которые применяются для преобразования трехфазного электрического тока в электрических сетях переменного тока частотой 50 Гц.

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.

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	$P_{к},$ кВт	$I_{xx},$ %	$u_{к},$ %	Схема, группа соединения обмоток
ТМ 1000	10	0,4	1,9	12,2	1,7	5,5	Y/Y <sub>H</sub> -0

где:

$S_{2H}$  – номинальная мощность трансформатора,

$U_{1H}$ - номинальное высшее напряжение,

$U_{2H}$ - номинальное низшее напряжение.

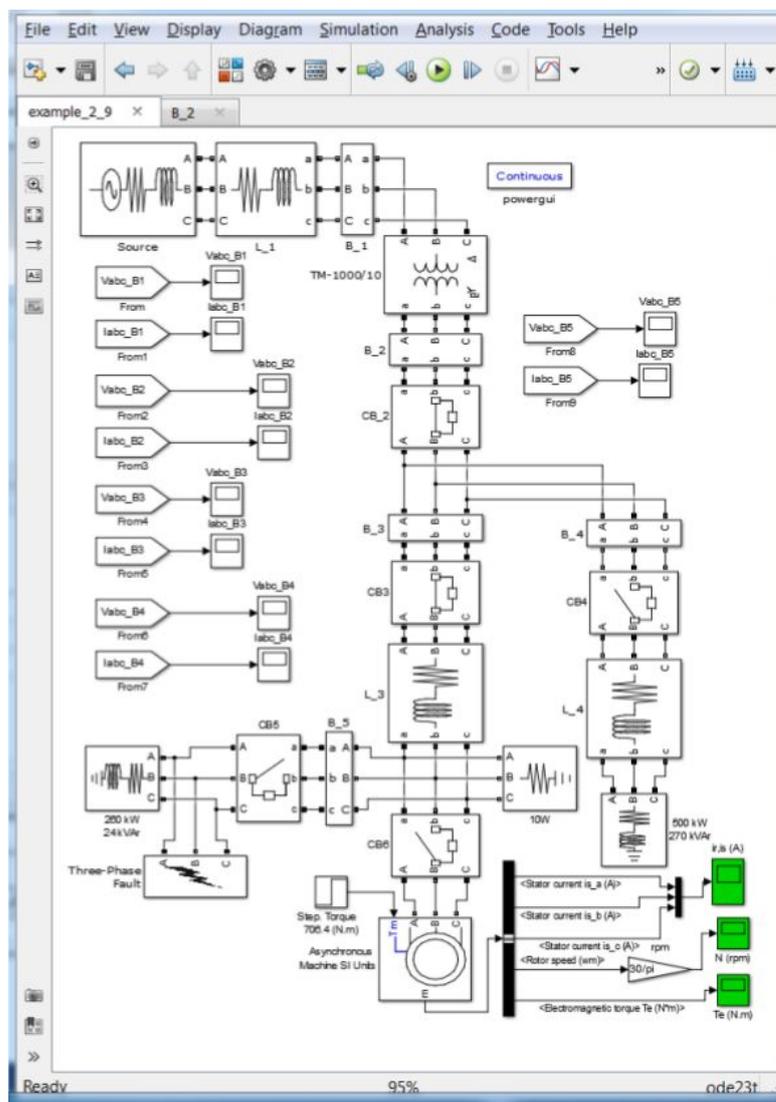


Рисунок 1 — Модель одноторансформаторной подстанции в программе Matlab Simulink

4) Блоки **B2**, **B3**, **B4**, **B5** это блоки измерения трехфазных напряжений и токов (Three-Phase V-I Measurement).

5) Выключатель **CB2** (блок **Three-Phase Breaker**): активное сопротивление – 0,00014 Ом; время отключения (**Switching times (s)**)– (10.5), т.е. при данном времени расчета (125/50) этот выключатель будет находиться в замкнутом состоянии, время отключения (**Switching times (s)**)– (10.5).

6) Выключатель **CB3**: активное сопротивление – 0,00041 Ом; время отключения – (10.5).

7) Кабельная линия **L\_3**: активное сопротивление – 0,0032 Ом; индуктивность – 1,8E-6 Гн.

8) Выключатель **CB5**: активное сопротивление – 0,00041 Ом; время включения и отключения (5/50 101/50), т.е. через пять периодов нагрузка по пункту 9 подключается к трансформатору, а через 101 период отключается, при этом отключается и ток короткого замыкания, который создается с помощью блока по пункту 10.

9) Последовательная трехфазная RLC нагрузка 260 kW 24 kVAr (блок **Three-Phase Series RLC Load**): активная мощность – 260 кВт; реактивная мощность индуктивного характера – 24 ВАр.

10) Блок **Three-Phase Fault** (Блок трехфазный замыканий) [2]: трехфазное короткое замыкание – отмечены флажками три фазы; установлено время короткого замыкания (100/50 1010/50); сопротивление дуги (**Fault resistance Ron (Ohm)**:) – 0,001 Ом.

11) Выключатель **CB6**: активное сопротивление – 0,0011Ом, подключает асинхронный двигатель через десять периодов – (10/50).

12) Параметры асинхронного двигателя:

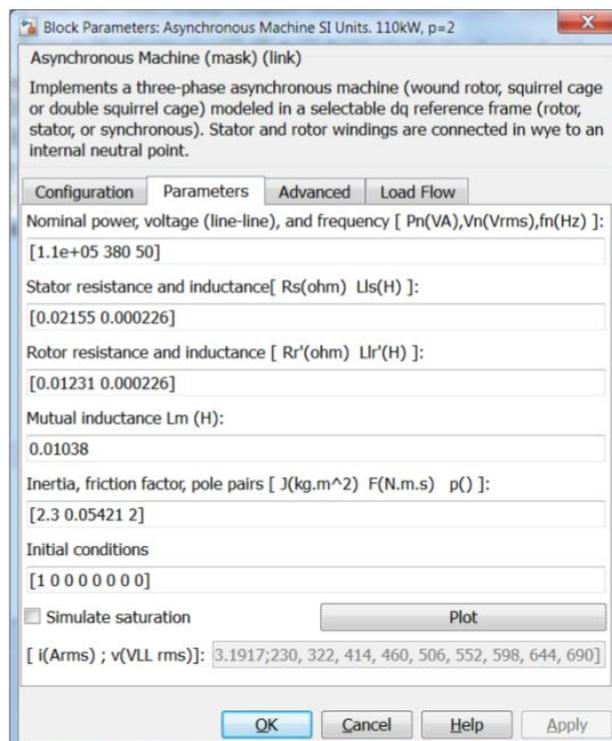


Рисунок 2 — Параметры асинхронного двигателя

**Nominal power, voltage (line-line), and frequency (Pn(VA), Vn(Vrms), fn(Hz))** – номинальная активная мощность двигателя, линейное напряжение и частота.

**Stator resistance and inductance (Rs(ohm) Lls(H))**: – активное сопротивление и индуктивность рассеяния обмотки статора.

**Rotor resistance and inductance (Rr'(ohm) Llr'(H))**: – приведенные к обмотке статора активное сопротивление и индуктивность рассеяния обмотки ротора.

**Mutual inductance Lm (H)**: – взаимная индуктивность обмоток, расположенных на статоре и роторе.

**Inertia, friction factor, pole pairs (J(kg.m^2) F(N.m.s) p())**: – момент инерции, коэффициент трения, число пар полюсов [3].

**Initial conditions** – начальные условия переменных (скольжение, электрический угол, амплитуды токов трех фаз статора, соответствующие фазы этих токов).

**Simulate saturation** – моделирование насыщения.

**Plot** – построение кривой намагничивания. Во вкладке **Advanced** (расширенный) предложена дискретная модель (**Discrete solver model**) и возможность выбора соответствующего метода расчета.

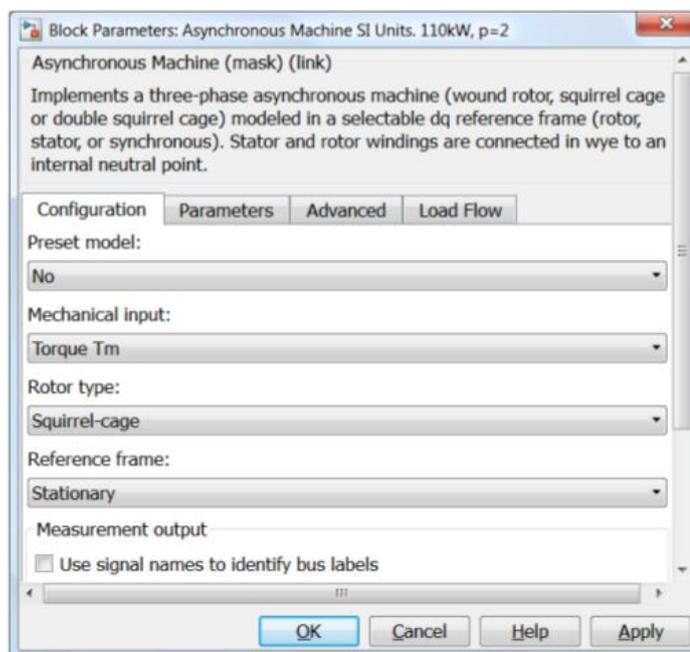


Рисунок 3- Конфигурация асинхронного двигателя.

-**Preset model**: (установленные модели). В выпадающем списке можно выбрать асинхронный двигатель для загрузки его параметров;

- **Mechanical input**: (механический вход). В зависимости от выбора на механический вход можно подать **Torque Tm** (момент), **Speed w** (скорость) или создать порт механического вращения, для взаимодействия с механическим валом библиотеки Simscape;

- **Rotor type**: (тип ротора). В выпадающем списке можно выбрать тип ротора: фазный, "беличья клетка" (короткозамкнутый ротор) или ротор с двойной "беличьей клеткой";

- **Reference frame**. Система координат, которая принимается в математической модели машины: неподвижная относительно ротора; неподвижная относительно статора, вращающаяся синхронно с полем.

13) Блок нагрузки **10W (Three-Phase Series RLC Load)** необходим для корректной работы модели при отсутствии нагрузки в конце линии.

14) Выключатель **CB4** с активным сопротивлением 0,00025Ом подключает активно-индуктивную нагрузку (пункт 15) через семьдесят пять периодов– (75/50).

15) Кабельная линия L<sub>4</sub>: активное сопротивление – 0,0016 Ом; индуктивность – 1.11E-6 Гн.

16) Последовательная трехфазная RLC нагрузка 500 kW 270 kVA<sub>r</sub> (блок **Three-Phase Series RLC Load**): активная мощность – 500 кВт; реактивная мощность индуктивного характера – 270 Вар.

В данной модели время расчета составляет сто двадцать пять периодов 125/50. Выключатели **CB2** и **CB3** во время расчета находятся в замкнутом состоянии.

В модели задана следующая последовательность коммутаций выключателей и блока коротких замыканий:

- 1) пять периодов трансформатор работает на холостом ходу (5/50);
- 2) в момент времени (5/50) выключатель **CB5** подключает активно- индуктивную нагрузку (блок 260 kW 24 kVA<sub>r</sub>);
- 3) через десять периодов (10/50) выключатель **CB6** подключает асинхронный двигатель (**Asynchronous Machine SI Units**), мощностью 110 кВт;
- 4) через пятьдесят периодов (50/50) после разгона двигателя на холостом ходу на него набрасывают номинальную нагрузку (блок **Step. Torque 706.4 (N.m)**);
- 5) через семьдесят пять периодов выключатель **CB4** подключает ещё одну активно-индуктивную нагрузку (блок 500 kW 270 kVA<sub>r</sub>);
- 6) через сто периодов (100/50) с помощью блока **Three-Phase Fault** осуществляется трехфазное короткое замыкание;
- 7) через сто один период (101/50) выключатель **CB5** отключает короткое замыкание и нагрузку.

На рисунке 4 представлены результаты расчета токов при моделировании перечисленных выше семи переходных процессов (с учетом холостого хода).

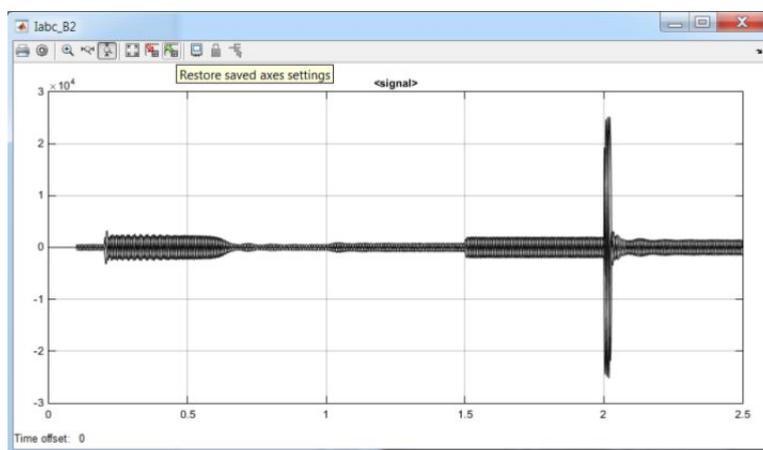


Рисунок 4 — Результаты расчетов при моделировании переходных процессов (моделирование токов)

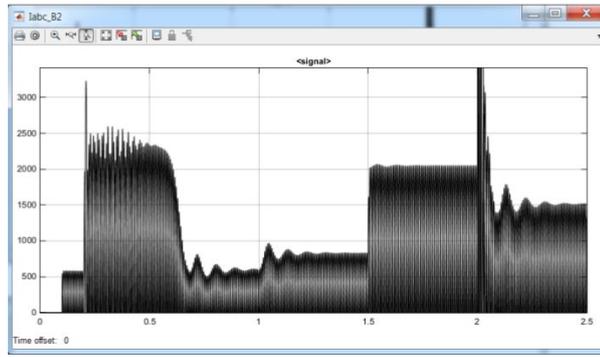


Рисунок 5 - Положительная часть синусоидальных токов

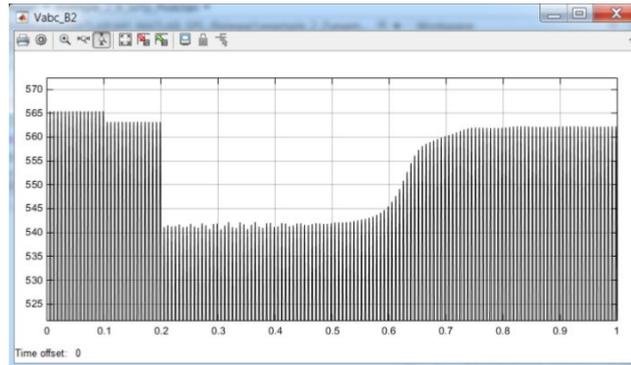


Рисунок 6 - Результаты расчетов при моделировании переходных процессов  
(моделирование напряжений)

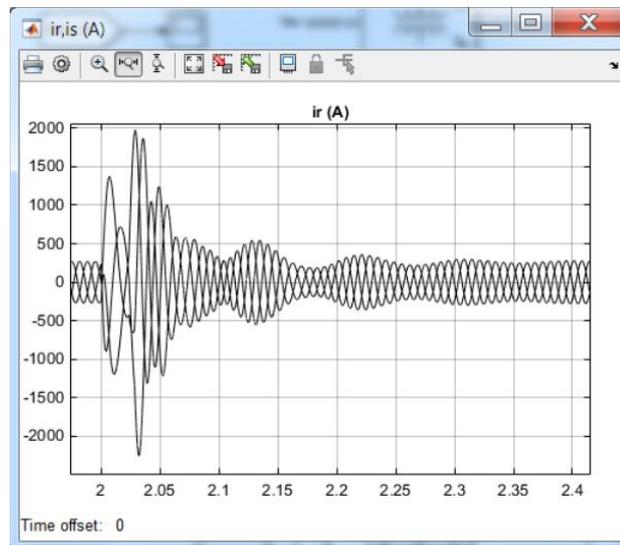


Рисунок 7 - Результаты расчетов при моделировании переходных процессов  
(моделирование токов асинхронного двигателя)

В связи с тем, что на этом рисунке показаны не только токи нагрузки, но и токи трехфазного короткого замыкания [4], увидеть особенности переходных процессов при набросе нагрузки можно только изменив масштаб. На рисунке 5 показана положительная часть синусоидальных кривых токов, которая дает представление о переходных процессах.

Изменение токов в трансформаторе приводит к соответствующим изменениям напряжений (Рисунок 6). Наибольшее снижение напряжения, если не считать короткое

замыкание, наблюдается при пуске асинхронного двигателя. Следует отметить, что трехфазное короткое замыкание оказывает негативное влияние на асинхронный двигатель. В частности, наблюдаются токи, соизмеримые с пусковыми токами (рисунок 7) [5].

Результаты моделирования показывают, что Simulink позволяет качественно и количественно оценивать переходные процессы в однострансформаторной подстанции, проводить расчет переходных процессов при коротких замыканиях, набросе и сбросе нагрузки, подключении асинхронного двигателя, трехфазном коротком замыкании. Это может упростить выбор оборудования, помочь оценить влияние различных переходных процессов на качество электроснабжения, выбрать компенсирующие устройства и улучшить понимание процессов, происходящих при коммутациях энергетических сетей в процессе обучения.

### **Список литературы**

1. Копылов, И. П. Математическое моделирование электрических машин. –М.: : Высш. шк., 2001 г.
2. Черных, И В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М: ДМК Пресс; Питер, 2008.
3. Дьяконов, В. П., 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.