

# МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 621.311.001.57

**Андрей Владимирович Затонский**

ФГАОУ ВО ПНИПУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Березниковский филиал), доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации технологических процессов, Россия, Березники, e-mail: zxenon@narod.ru

**Игорь Сергеевич Долгополов**

ФГАОУ ВО ПНИПУ «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (Березниковский филиал), магистрант, Россия, Березники, e-mail: demarsel@mail.ru

## Моделирование трехобмоточного силового трансформатора в Matlab Simulink

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Анализ энергоэффективности электрических сетей 110 кВ затруднен отсутствием возможности проведения экспериментов на действующем оборудовании, а именно на силовых трансформаторах. Существующие методики математического расчета электрических сетей не дают широкой возможности исследования режимов работы сетей 110 кВ. Вычислительные эксперименты в целях анализа энергоэффективности работы оборудования снижают риски повреждения оборудования и травмирования обслуживающего персонала, а также позволяют исследовать необходимые режимы работы электрической сети 110 кВ, включая силовые трансформаторы.

**Материалы и методы.** Модель трансформатора разработана в виртуальной лаборатории Matlab с помощью библиотеки Simpowersystem.

**Результаты.** Приведены паспортные данные трансформатора типа ТДТН-25000/110-У1. Исследовано применение схемы звезды вместо Т-образной схемы замещения в трехобмоточном трансформаторе. Разработаны виртуальные модели для проведения экспериментов короткого замыкания и холостого хода. Выполнен расчет кривой намагничивания сердечника трансформатора. С использованием предложенной виртуальной модели трансформатора типа ТДТН-25000/110-У1 исследованы процессы короткого замыкания и холостого хода. Показано соответствие результатов моделирования паспортным данным реального трансформатора. Получены осциллограммы броска тока намагничивания, также соответствующие реальным.

**Выводы.** Погрешность выполнения модели по сравнению с паспортными данными реального трансформатора не превышает 5 %. Модель рекомендуется использовать для анализа энергоэффективности электрических сетей 110 кВ. Перспективой исследования для данной модели силового трансформатора является добавление в модель условий работы регулятора напряжения под нагрузкой.

**Ключевые слова:** моделирование трехобмоточного трансформатора, схема замещения силового трансформатора, опыт холостого хода, напряжение короткого замыкания

**Andrey Vladimirovich Zatonskiy**

Perm National Research Polytechnic University (Berezniki branch), Doctor of Engineering Sciences, Professor of Automation of Technological Processes Department, Russia, Berezniki, e-mail: zxenon@narod.ru

**Igor Sergeevich Dolgopolov**

Perm National Research Polytechnic University (Berezniki branch), Master Degree Student, Russia, Berezniki, e-mail: demarsel@mail.ru

## Simulation of three winding power transformer in Matlab Simulink

### Abstract

**Background.** It is difficult to analyze the energy efficiency of 110 kV electrical networks due to the lack of the possibility to conduct experiments on operating equipment, namely on power transformers. The existing methods of mathematical calculation of electrical networks do not provide a wide opportunity to study the modes of 110 kV networks. Computational experiments to analyze the energy efficiency of equipment operation reduce the risks of equipment damage and injury of maintenance personnel. Also, it allows you to explore the necessary operation modes of a 110 kV electrical network, including power transformers.

**Materials and methods.** The transformer model is developed in the Matlab virtual laboratory using the Simpowersystem toolbox.

**Results.** The passport data of the transformer of the type TDTN-25000/110-U1 are given. The use of a star circuit instead of a T-shaped equivalent circuit is studied since the transformer has three windings. Virtual models are developed to conduct short circuit and open circuit experiments. The calculation of the magnetization curve of the transformer core is carried out. Using a new virtual model of a transformer of the TDTN-25000/110-U1 type, the processes of short circuit and open circuit are studied. The correspondence of the simulation results and the passport data of a real transformer is presented. The oscillograms of the magnetizing current inrush are obtained. They also correspond to the real ones.

**Conclusions.** The model error in comparison with the passport data of a real transformer does not exceed 5 %. The model is recommended to be used to analyze the energy efficiency of 110 kV electrical networks. The promising trend to research the model of a power transformer is to add the voltage regulator under load as the operation condition.

**Key words:** modeling of a three-winding transformer, power transformer substitution diagram, no-load experience, short-circuit voltage

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2022.4.064-072

**Введение.** Анализ энергоэффективности электрической сети 110 кВ охватывает множество проблем, связанных с потерей мощности при переключениях, низкой загруженностью сети, а также с возникновением ненормальных режимов работы оборудования. Для анализа энергоэффективности сети необходимо учитывать работу нелинейных элементов сети и создавать разные режимы работы. К сожалению, в электроэнергетике все силовое оборудование обслуживается согласно графику по заранее оформленным заявкам, время обслуживания максимально сокращено для проведения конкретной регламентной работы. А проведение каких-либо экспериментов на действующем оборудовании в большинстве случаев вообще запрещено.

Но с развитием компьютерной техники и методов программирования появля-

ются специальные виртуальные математические лаборатории, которые делают возможным создание «виртуального двойника» действующей электроустановки. Так как анализ энергоэффективности электрической сети 110 кВ невозможен без создания нелинейных моделей элементов сети, то предлагается создать нелинейный элемент сети, «виртуальный двойник» силового понижающего трансформатора, затем провести серию экспериментов для анализа точности полученной модели на соответствие паспортным данным реального трансформатора, а также проверить наличие броска тока намагничивания модели трансформатора.

**Методы исследования.** Рассмотрим трансформатор типа ТДТН-25000/110-У1, основные параметры которого показаны в табл. 1.

Таблица 1. Основные параметры силового трансформатора ТДТН-25000/110-У1<sup>1</sup>

Наименование	Значение	
Условное обозначение схемы и группы соединения обмоток	Ун/Ун/D-0-11	
Номинальная частота, Гц	50	
Номинальные мощности обмоток трансформатора, ВА	ВН	25000000
	СН	25000000
	НН	25000000
Устройства регулирования на стороне ВН/СН	РПН/ПБВ	
Диапазон регулирования с помощью устройства РПН/ПБВ	± 16 % в ± 9 ступеней / ± 2 x 2,5 %	
Номинальные напряжения обмоток трансформатора на основном 10 ответвлении, В	ВН	115000
	СН	38500
	НН	6600
Номинальные токи обмоток трансформатора на основном 10 ответвлении, А	ВН	125,5
	СН	374,9
	НН	2186,9
Потери короткого замыкания при 75С на основном 10 ответвлении пара обмоток ВН-НН, Вт	140000	
Потери холостого хода, Вт	25500	
Ток холостого хода, %	0,55	
Напряжение короткого замыкания на стороне ВН-СН на основном 10 ответвлении, %	10,5	
Напряжение короткого замыкания на стороне ВН-НН на основном 10 ответвлении, %	17,5	
Напряжение короткого замыкания на стороне СН-НН на основном 3 ответвлении ПБВ, %	6,5	
Тип исполнения	Трехобмоточный	

Схема трехобмоточного трехфазного понижающего силового трансформатора показана на рис. 1.

Обмотка высокого напряжения (ВН) имеет класс напряжения 110 кВ, собрана в звезду, а ее нейтральный вывод при монтаже трансформатора в нашем случае глухо заземлен. По стороне среднего напряжения в трансформаторе используется вторичная обмотка среднего напряжения (СН), схема которой собрана в звезду, нулевой вывод данной обмотки не заземляется и не зануляется. По стороне низкого напряжения (НН) третичная обмотка собрана в треугольник.

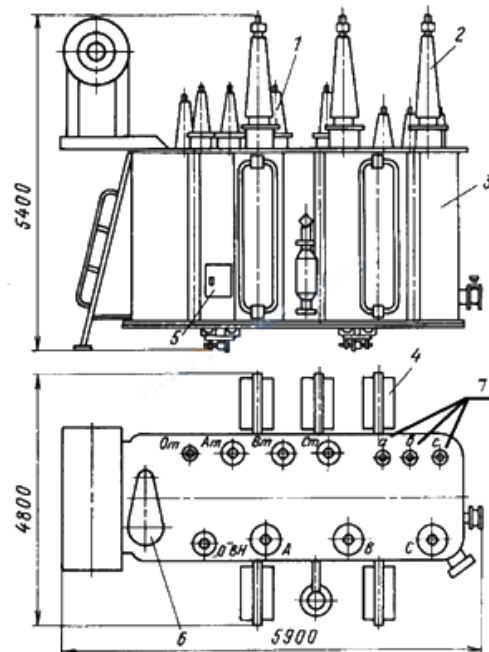


Рис. 1. Основные элементы силового трансформатора: 1 – ввод среднего напряжения (СН) 38500 В; 2 – ввод высокого напряжения (ВН) 115000 В; 3 – бак трансформатора; 4 – система охлаждения; 5 – шкаф автоматического управления дутьем; 6 – переключающее устройство РПН; 7 – ввод низкого напряжения (НН) 6600 В

*Расчет параметров схемы замещения силового трансформатора. Схема замещения трехобмоточного трансформатора представляет собой не Т-образную схему, а звезду (рис. 2).*

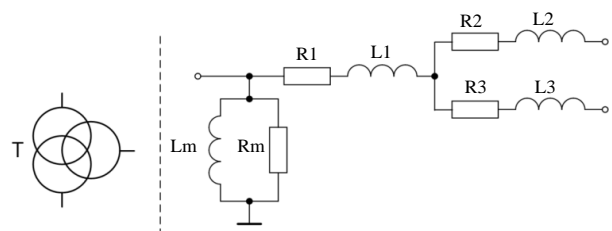


Рис. 2. Схема замещения трехобмоточного трансформатора

Анализ литературы [1–4] показал наличие различных методик расчета схем замещения силового трансформатора, но в научных статьях [5–13] показана непригодность расчета трехобмоточных трансформаторов по Т-образной схеме и необходимость расчета схемы замещения «звезда». В [1] и [10, 7] показан наиболее удобный расчет – не в именованных единицах, а в относительных, приведенных к базисному току.

<sup>1</sup> Паспортные данные силового трансформатора ТДТН-25000/110-У1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://lider-energo.ru/uploads/oil-trans/transformatiori-tdtdts.pdf>

Согласно паспортным данным, указанным в табл. 1, выполним расчет трансформатора [1].

Определим напряжение короткого замыкания:

$$U_{KB} \% = 0,5(U_{K\text{ ВН-СН}} + U_{K\text{ ВН-НН}} - U_{K\text{ СН-НН}}) =$$

$$= 0,5(10,5 + 17,5 - 6,5) = 10,75 \%;$$
 (1)

$$U_{KC} \% = 0,5(U_{K\text{ ВН-СН}} + U_{K\text{ СН-НН}} - U_{K\text{ ВН-НН}}) =$$

$$= 0,5(10,5 + 6,5 - 17,5) = -0,25 \% \approx 0 \%;$$
 (2)

$$U_{KH} \% = 0,5(U_{K\text{ СН-НН}} + U_{K\text{ ВН-НН}} - U_{K\text{ ВН-СН}}) =$$

$$= 0,5(6,5 + 17,5 - 10,5) = 6,75 \%;$$
 (3)

Найдем активное сопротивление обмоток:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{1}{2} \frac{\Delta P_{K3}}{S_{\text{НОМ}}} =$$

$$= \frac{1 \times 140000}{2 \times 25000000} = 0,0028.$$
 (4)

Найдем полное сопротивление обмоток:

$$Z_1 = Z_B = \frac{U_{KB} \%}{100 \%} = \frac{10,75}{100} = 0,1075;$$
 (5)

$$Z_2 = Z_C = \frac{U_{KC} \%}{100 \%} \approx 0;$$
 (6)

$$Z_3 = Z_H = \frac{U_{KH} \%}{100 \%} = \frac{6,75}{100} = 0,0675.$$
 (7)

Найдем индуктивное сопротивление:

$$X_1 = X_B = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} =$$

$$= \sqrt{0,1075^2 - 0,0028^2} = 0,1074;$$
 (8)

$$X_2 = X_C = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \approx 0;$$
 (9)

$$X_3 = X_H = \sqrt{Z_3^2 - R_3^2} =$$

$$= \sqrt{0,0675^2 - 0,0028^2} = 0,0674.$$
 (10)

Тогда индуктивность обмоток составит:

$$L_1 = X_1 = 0,1074;$$
 (11)

$$L_2 = X_2 \approx 0;$$
 (12)

$$L_3 = X_3 = 0,0674.$$
 (13)

Рассчитаем активное сопротивление цепи намагничивания:

$$R_m = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\Delta P_{XX}} = \frac{25000000}{25500} = 980,4.$$
 (14)

Рассчитаем индуктивность цепи намагничивания:

$$L_m = \frac{100 \%}{I_{XX} \%} = \frac{100}{0,55} = 181,8.$$
 (15)

Реальный силовой трансформатор при включении на холостой ход вызывает

бросок тока, величина броска тока превышает номинальный в 3–4 раза. Это связано с намагничиванием сердечника трансформатора. График характеристики кривой намагничивания показан на рис. 3.

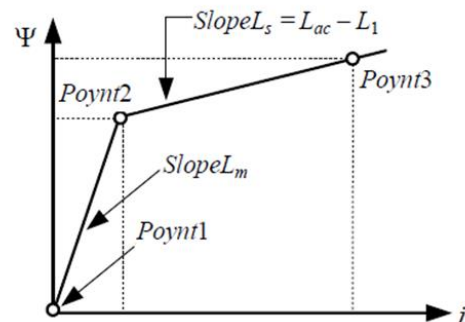


Рис. 3. График характеристики кривой намагничивания:  $SlopeL_m$  – прямая намагничивания сердечника трансформатора в линейной области;  $Point2$  – точка перегиба характеристики намагничивания сердечника трансформатора, характеризующая начало насыщения;  $SlopeL_s$  – прямая характеризующая глубокое насыщение сердечника трансформатора;  $L_{ac}$  – индуктивность полного насыщения;  $L_1$  – индуктивность обмотки ВН

Выполним расчет кривой намагничивания сердечника силового трансформатора. Для расчета кривой намагничивания необходимо иметь точные данные о конструкции и материале сердечника. К сожалению, эти данные доступны только заводу-изготовителю. Но анализ источников [10, 14, 15] показал, что точка излома перегиба характеристики намагничивания  $\Psi_{Point2}$  лежит в пределах от 1,1 до 1,2 о.е. Тогда примем  $\Psi_{Point2} = 1,15$  о.е.

Согласно источникам [10, 7], необходимо ограничить насыщение сердечника трансформатора. Для этого примем дополнительную точку  $Point4$ .

Рассчитаем координаты точки  $Point1$ :

$$I_{Point1} = 0;$$
 (16)

$$\Psi_{Point1} = 0.$$
 (17)

Рассчитаем координаты точки  $Point2$ :

$$I_{Point2} = \frac{\Psi_{Point2} \times I_{XX}}{100} = \frac{1,15 \times 0,55}{100} = 0,00633.$$
 (18)

Рассчитаем координаты точки  $Point3$ :

$$I_{Point3} = 1;$$
 (19)

$$L_{ac} = 2 \times \frac{U_{K\text{ ВН-СН}}}{100} = 2 \times \frac{10,5}{100} = 0,21;$$
 (20)

$$SlopeL_s = L_{ac} - L_1 = 0,21 - 0,1074 = 0,1025;$$
 (21)

$$\Psi_{Point3} = \Psi_{Point2} + SlopeL_s =$$

$$= 1,15 + 0,1025 = 1,2525.$$
 (22)

Рассчитаем координаты точки  $Point4$ :

$$I_{Point4} = 3; \quad (23)$$

$$\Psi_{Point4} = 1,27. \quad (24)$$

Для выполнения поставленных задач выберем Matlab в библиотеке Simpowersystem, рассмотрим Three-Phase Transformer (Three Windings). Данный элемент моделирует трехфазный трехобмоточный силовой трансформатор и дополнительно может учитывать нелинейность характеристик намагничивания магнитопровода трансформатора.

Заполним настройки элемента TDTN-25000/110 паспортными данными (табл. 1). У параметра Winding1 выбираем схему первичной обмотки звезда с заземленной нейтралью. У параметра Winding2 выбираем схему вторичной обмотки звезда с изолированной нейтралью. У параметра Winding3 выбираем схему третичной обмотки треугольник 11 группы. У параметра Saturable core устанавливаем галочку, благодаря этому наша модель будет иметь нелинейную характеристику намагничивания и создавать бросок тока холостого хода, похожий на реальный трансформатор. Из выпадающего списка выберем ALL measurements (V I Fluxes), это позволит выводить все токи и напряжения трансформатора на мультиметр.

Затем на вкладке Parameters установим расчетные данные из формул (1)–(15), как это показано на рис. 4. В графе Units выбираем pu – относительные единицы. Точки кривой намагничивания задаются в поле Saturation characteristic данными из формул (16)–(24).

Анализ зарубежных источников [16–21] показал, что модель выполнена аналогичным способом. Но отличия заключаются в графике характеристики кривой намагничивания (рис. 3), а именно в задании 4-й точки. В учебных целях прямой участок характеристики между точками  $Point3$  и  $Point4$  выполнен под небольшим углом относительно оси  $i$ , что означает насыщение магнитопровода. В дальнейшем, имея реальную осциллограмму, можно откорректировать наклон кривой между  $Point3$  и  $Point4$ , добившись идеального результата.

Для анализа точности расчетов необходимо выполнить обязательные приемосдаточные испытания: опыт холостого хода и опыт короткого замыкания.

Рис. 4. Параметры настройки элемента TDTN-25000/110 (вкладка Parameters)

**Результаты исследования.** *Виртуальный опыт холостого хода (ХХ).* Принцип опыта ХХ заключается в подключении трансформатора к источнику номинального напряжения с разомкнутыми вторичными обмотками. В процессе проведения опыта получают мощность холостого хода  $P_{ХХ}$ , ток холостого хода  $I_{ХХ}$ , номинальные напряжения и т.д. [3, 4].

Опыт проведен по схеме двух ваттметров. Для этого создана виртуальная схема испытания силового трансформатора, выполнена настройка решателя, выставлены необходимые значения во вкладке настроек [1, 22], решатель ode23tb. Благодаря этому решателю, графики, построенные осциллографом, получают без разрывов и «артефактов» (точность выбираем  $1e-7$ , максимальный шаг выбираем 0,0005 – данные параметры можно менять для достижения необходимой точности моделирования).

Важно во всех элементах модели настроить частоту сети 50 Гц, так как по умолчанию установлено 60 Гц.

Модель виртуального опыта холостого хода силового трансформатора показана на рис. 5. Она состоит из источника трехфазного напряжения, выключателя, измерительных трансформаторов тока и напряжения, силового трансформатора, мультиметра, осциллографа и дисплеев.



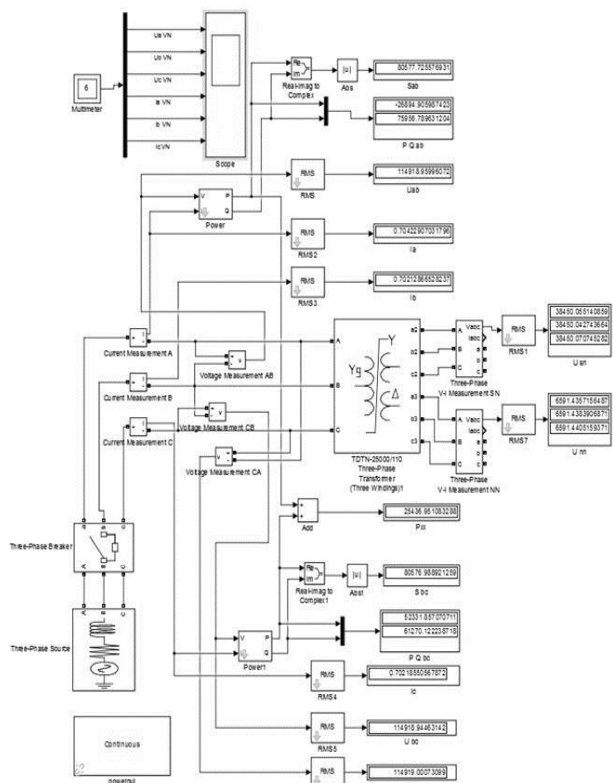


Рис. 5. Модель виртуального опыта холостого хода силового трансформатора

Время симуляции опыта холостого хода – 30 секунд. Все показания дисплеев приборов сведены в таблицу значений опыта холостого хода (табл. 2).

Таблица 2. Показания дисплеев приборов опыта холостого хода силового трансформатора

Обозначение прибора	Измеренная величина	Единицы измерения
U ab	114918	V
I a	0,70	A
I b	0,70	A
U sn	38450/38450/38450	V
U nn	6591/6591/6591	V
P xx	25436	Вт
I c	0.70	A
U bc	114918	V
U ca	114919	V

Данные анализа погрешности виртуальной модели сведены в табл. 3.

Таблица 3. Погрешности опыта холостого хода силового трансформатора

Параметр	Паспортное значение	Опыт XX	Погрешность
P xx	25500 Вт	25436 Вт	0,25 %
I xx	0,55%	0,7А или 0,55772 %	-1,4 %

Модель силового трансформатора показывает высокую точность при проведении опыта холостого хода.

Осциллограммы, записанные с помощью осциллографа, подключенного к мультиметру, показывают, что реальный силовой трансформатор при включении создает бросок тока, который многократно превышает максимальный рабочий ток. Это связано с тем, что идет процесс насыщения магнитопровода трансформатора. Также процесс намагничивания сердечника трансформатора искажает форму синусоиды. Необходимо проверить, выполняет ли наш виртуальный двойник силового трансформатора условия наличия броска тока, а так же искажение формы кривой синусоиды напряжения (осциллограммы показаны на рис. 6).

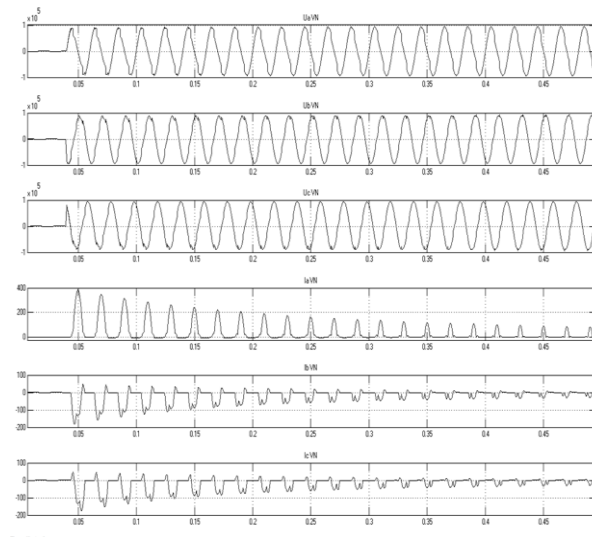


Рис. 6. Осциллограммы опыта холостого хода силового трансформатора

Модель ведет себя как реальный трансформатор. Согласно приведенным осциллограммам, четко просматривается переходный процесс, который становится незначительным на первой секунде, но полностью заканчивается на третьей секунде (2,5 с) моделирования. Бросок тока намагничивания достигает 385 А, что в 3 раза больше максимального рабочего тока  $I_{ВН} = 125,5$  А. Также на осциллограммах видно искажение формы синусоиды напряжения (Ua, Ub, Uc), как показано на рис. 6.

*Виртуальные опыты короткого замыкания.* Перед опытом короткого замыкания закорачивают вторичную обмотку, затем увеличивают напряжение на первичной обмотке до такого уровня, при котором ток

на закороченной обмотке будет равен максимальному рабочему току. При проведении реальных испытаний закорачивают обмотку высокого напряжения, а питание подают со стороны низкого напряжения. Это связано с мерами безопасности при проведении данных опытов, а также с технической сложностью плавного регулирования высокого напряжения (115000 В) [3, 4].

Так как ТДН-25000/110-У1 является трехобмоточным силовым трансформатором, необходимо выполнить 3 опыта короткого замыкания:

1 опыт – КЗ ВН-СН. Закорачивается обмотка среднего напряжения. Обмотка низкого напряжения остается разомкнутой.

2 опыт – КЗ ВН-НН. Закорачивается обмотка низкого напряжения. Обмотка среднего напряжения остается разомкнутой.

3 опыт – КЗ СН-НН. Закорачивается обмотка низкого напряжения. Обмотка высокого напряжения остается разомкнутой. Напряжение подают на обмотку среднего напряжения.

*Виртуальная модель опыта короткого замыкания ВН-СН.* Если разобрать схему, то на источнике напряжения будет 26800В. При собранной схеме и включенном выключателе линейное напряжение достигнет всего  $U_{кз\text{ ВН-СН}} = 12339\text{ В}$ , а ток на обмотке среднего напряжения – своего номинального значения (374 А).

*Виртуальная модель опыта короткого замыкания ВН-НН.* Если разобрать схему, то на источнике напряжения будет 34580 В. При собранной схеме и включенном выключателе линейное напряжение достигнет всего  $U_{кз\text{ ВН-НН}} = 20109\text{ В}$ , а ток на обмотке низкого напряжения – своего номинального значения (2186 А).

*Виртуальная модель опыта короткого замыкания СН-НН.* Если разобрать схему, то на источнике напряжения будет 45975 В. При собранной схеме и включенном выключателе линейное напряжение достигнет всего  $U_{кз\text{ СН-НН}} = 2602\text{ В}$ , а ток на обмотке низкого напряжения – своего номинального значения (2186 А).

Для анализа точности виртуальной модели силового трансформатора сведем все данные опытов короткого замыкания в табл. 4.

Модель силового трансформатора показывает высокую точность при проведении опытов короткого замыкания.

Таблица 4. Погрешности опыта короткого замыкания силового трансформатора

Параметр	Паспортное значение	Опыт КЗ	Погрешность
Р кз ВН-СН	140000 Вт	139354 Вт	0,46 %
U кз ВН-СН	10,5 %	12339 В или 10,7296 %	-2,18 %
Р кз ВН-НН	140000 Вт	140061 Вт	-0,04 %
U кз ВН-НН	17,5 %	20109 В или 17,48 %	0,08 %
Р кз СН-НН	140000 Вт	140076 Вт	-0,05 %
U кз СН-НН	6,5 %	2602 В или 6,75 %	-3,97 %

**Выводы.** Задача достигнута, получена нелинейная модель силового трансформатора ТРДН-25000/110. Проведенная серия экспериментов доказывает точность выполнения модели трансформатора в соответствии с паспортными данными реального трансформатора. Данная модель трансформатора позволит исследовать переходные процессы в сети 110 кВ, что делает анализ энергоэффективности электрической сети 110 кВ более подробным.

#### Список литературы

1. Костюченко Л.П. Имитационное моделирование систем электроснабжения в программе MATLAB: учеб. пособие. – Красноярск, 2012. – 215 с.
2. Ананичева С.С., Мызин А.Л. Схемы замещения и установившиеся режимы электрических сетей: учеб. пособие. – 6-е изд., испр. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 80 с.
3. **Controlling** the oil rectification process in a primary oil refining unit using a dynamic model / A.V. Zatonkiy, L.G. Tugashova, N.N. Alaeva, K.L. Gorshkova // *Petroleum Chemistry*. – 2017. – Т. 57, № 12. – С. 1121–1131.
4. Давыдкин М.Н., Басков С.Н. Лабораторный практикум «Электротехника и электроника». – Новотроицк: НФ НИТУ «МИ-СиС», 2013. – 164 с.
5. Герасимук А.В., Семькина И.Ю., Кипервассер М.В. Расчет параметров схемы замещения трансформаторов с расцепленной обмоткой с учетом устройства регулирования напряжения под нагрузкой в обмотке высшего напряжения // *Горное оборудование и электротехника*. – 2019. – № 2. – С. 52–59.
6. Евдокунин Г., Дмитриев М. Трансформаторы в электрической сети. Моделирование переходных процессов с учетом конфигурации магнитной системы // *Новости электротехники*. – 2008. – № 5(53). – С. 2–7.

7. **Дед А.В.** Расчет параметров simulink-модели силового трехфазного трансформатора для исследования длительных несимметричных режимов // Омский научный вестник. – 2017. – № 3(153). – С. 68–74.

8. **Мартынов В.А., Голубев А.Н., Евдаков А.Е.** Анализ динамических режимов работы трехфазных трехстержневых трансформаторов в пакете MATLAB // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 4. – С. 11–18.

9. **Разработка** модели переходных режимов с учетом взаимной индуктивности полей рассеяния для реализации цифрового двойника трансформатора / И.С. Снитыко, А.И. Тихонов, А.В. Ступов, В.Е. Мизонов // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 4. – С. 47–56.

10. **Новаш И.В., Румянцев Ю.В.** Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки MatLab-Simulink с учетом насыщения магнитопровода // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 12–24.

11. **Ягуп В.Г., Ягуп Е.В.** К определению параметров моделей трансформаторов // Светотехника и электроэнергетика. – 2014. – № 2. – С. 52–64.

12. **Кралин А.А., Тюриков М.П.** Моделирование трехстержневого трансформатора в simulink // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 3(110). – С. 238–242.

13. **Копотева А.В., Затонский А.В.** Математическая модель выбора ресурсосберегающих мероприятий на промышленном предприятии в условиях риска // Управление финансовыми рисками. – 2017. – № 1. – С. 60–70.

14. **EMTDC: Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation. User's Guide V4.3.1.** – Manitoba HVDC Research Centre, 2010. – 233 p.

15. **Kahrobaee S., Algrain M. C., Asgarpoor S.** Investigation and Mitigation of Transformer Inrush Current During Black Start of an Independent Power Producer Plant // Energy and Power Engineering. – 2013. – No. 5. – P. 1–7.

16. **Wiwit Kastawan, Erwin Yusuf, Afif Fadhilah.** Design of Phase-Shifting Transformer Based on Simulink Matlab Simulation // International journal of applied technology research. – 2020. – Vol. 1, No. 2. – P. 153–168.

17. **Romanyuk F., Novash I., Rumiantsev Y., Węgierek P.** Wye-connected current transformers simplified model validation in MATLAB-Simulink // Przegląd elektrotechniczny. – 2015. – R. 91, No. 11. – P. 292–295.

18. **Sánchez-Martos C., Gómez-González M., Jurado F.** Simulation of Magnetizing Inrush Current of Three-Phase Three-Legged Transformers by Direct Measurement of Coils Inductance // RE&PQJ. – March, 2013. – Vol.1, No.11. – P. 326–329.

19. **Experimental** simulation analysis for single phase transformer tests / Ali N. Hamoodi,

Bashar A. Hammad, Fawaz S. Abdullah // Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. – June, 2020. – Vol. 9, No. 3. – P. 862–869.

20. **Conversion** of RMS into Instantaneous Transformer Saturation Characteristics – Implementation in MATLAB/SPS-ST / Amir Tokić, Viktor Milardić, Mensur Kasumović, Damir Demirović // International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.). – September–October, 2019. – Vol. 14, No. 5.

21. **Linnik K.S., Neyman L.A.** Numerical simulation of electromagnetic processes in power transformers taking into account the nonlinearities of magnetic bonds // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. J. Phys.: Conf. Ser. 2032 012091.

22. **Черных И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

## References

1. Kostyuchenko, L.P. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem elektrosnabzheniya v programme MATLAB* [Simulation modeling of power supply systems in the MATLAB program]. Krasnoyarsk, 2012. 215 p.

2. Ananicheva, S.S., Myzin, A.L. *Skhemy zameshcheniya i ustanovivshiesya rezhimy elektricheskikh setey* [Equivalent schemes and steady-state modes of electrical networks]. Ekaterinburg: UrFU, 2012. 80 p.

3. Zatonkiy, A.V., Tugashova, L.G., Alaeva, N.N., Gorshkova, K.L. Controlling the oil rectification process in a primary oil refining unit using a dynamic model. *Petroleum Chemistry*, 2017, vol. 57, no. 12, pp. 1121–1131.

4. Davydkin, M.N., Baskov, S.N. *Laboratornyy praktikum «Elektrotehnika i elektronika»* [Laboratory workshop “Electrical engineering and electronics”]. Novotroitsk: NF NITU «MI-SiS», 2013. 164 p.

5. Gerasimuk, A.V., Semykina, I.Yu., Kiper-vasser, M.V. Raschet parametrov skhemy zameshcheniya transformatorov s rasshcheplennoy obmotkoy s uchetom ustroystva regulirovaniya napryazheniya pod nagruzkoy v obmotke vysshego napryazheniya [Calculation of the parameters of the equivalent circuit of transformers with a split winding considering the voltage regulation device under load of the higher voltage winding]. *Gornoe oborudovanie i elektrotehnika*, 2019, no. 2, pp. 52–59.

6. Evdokunin, G., Dmitriev, M. Transformatory v elektricheskoy seti. Modelirovanie perekhodnykh protsessov s uchetom konfiguratsii magnitnoy sistemy [Transformers in the electrical network. Modeling of transient processes considering the configuration of the magnetic system]. *Novosti elektrotehniki*, 2008, no. 5(53), pp. 2–7.

7. Ded, A.V. Raschet parametrov simulink-modeli silovogo trekhfaznogo transformatora dlya



issledovaniya dlitel'nykh nesimmetrichnykh rezhimov [Calculation of the parameters of a simu-link model of a power three-phase transformer to study long-term asymmetric modes]. *Omskiy nauchnyy vestnik*, 2017, no. 3(153), pp. 68–74.

8. Martynov, V.A., Golubev, A.N., Evdakov, A.E. Analiz dinamicheskikh rezhimov raboty trekhfaznykh trekhsterzhnevnykh transformatorov v pakete MATLAB [Analysis of the dynamic modes of operation of three-phase three-rod transformers in the MATLAB package]. *Vestnik IGEU*, 2016, issue 4, pp. 11–18.

9. Snit'ko, I.S., Tikhonov, A.I., Stupov, A.V., Mizonov, V.E. Razrabotka modeli perekhodnykh rezhimov s uchetom vzaimnoy induktivnosti poley rasseyaniya dlya realizatsii tsifrovogo dvoynika transformatora [Development of model of transient modes considering the mutual inductance of stray fields for the implementation of a digital twin of a transformer]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 4, pp. 47–56.

10. Novash, I.V., Rummyantsev, Yu.V. Raschet parametrov modeli trekhfaznogo transformatora iz biblioteki MatLab-Simulink s uchetom nasyscheniya magnitoprovoda [Calculation of the parameters of a three-phase transformer model from the MatLab-Simulink library considering the saturation of the magnetic circuit]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy i energeticheskikh ob"edineniy SNG*, 2015, no. 1, pp. 12–24.

11. Yagup, V.G., Yagup, E.V. K opredeleniyu parametrov modeley transformatorov [On determination of parameters of transformer models]. *Svetotekhnika i elektroenergetika*, 2014, no. 2, pp. 52–64.

12. Kralin, A.A., Tyurikov, M.P. Modelirovanie trekhsterzhnevnogo transformatora v simulink [Modeling a three-rod transformer in simulink]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva*, 2015, no. 3(110), pp. 238–242.

13. Kopoteva, A.V., Zatonskiy, A.V. Matematicheskaya model' vybora resursosberegayushchikh meropriyatii na promyshlennom predpriyatii v usloviyakh riska [Mathematical model to choose resource-saving measures at an industrial enterprise under risk conditions]. *Upravlenie finansovymi riskami*, 2017, no. 1, pp. 60–70.

14. EMTDC: Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation. User's Guide V4.3.1. Manitoba HVDC Research Centre, 2010. 233 p.

15. Kahrobaee, S., Algrain, M.C., Asgarpour, S. Investigation and Mitigation of Transformer Inrush Current During Black Start of an Independent Power Producer Plant. *Energy and Power Engineering*, 2013, no. 5, pp. 1–7.

16. Kastawan, W., Yusuf, E., Fadhilah, A. Design of Phase-Shifting Transformer Based on Simulink Matlab Simulation. *International journal of applied technology research*, 2020, vol. 1, no. 2, pp. 153–168.

17. Romanyuk, F., Novash, I., Rumiantsev, Y., Węgierek, P. Wye-connected current transformers simplified model validation in MATLAB-Simulink. *Przeгляд elektrotechniczny*, 2015, vol. 91, no. 11, pp. 292–295.

18. Sánchez-Martos, C., Gómez-González, M., Jurado, F. Simulation of Magnetizing Inrush Current of Three-Phase Three-Legged Transformers by Direct Measurement of Coils Inductance. *RE&PQJ*, March 2013, vol. 1, no. 11, pp. 326–329.

19. Hamoodi, Ali N., Hammad, Bashar A., Abdullah, Fawaz S. Experimental simulation analysis for single phase transformer tests. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, June 2020, vol. 9, no. 3, pp. 862–869.

20. Tokić, A., Milardić, V., Kasumović, M., Demirović, D. Conversion of RMS into Instantaneous Transformer Saturation Characteristics – Implementation in MATLAB/SPS-ST. *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, September–October 2019, vol. 14, no. 5.

21. Linnik, K.S., Neyman, L.A. Numerical simulation of electromagnetic processes in power transformers taking into account the nonlinearities of magnetic bonds. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. J. Phys.: Conf. Ser. 2032 012091.

22. Chernykh, I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink* [Modeling electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow: DMC Press; Saint-Petersburg: Piter, 2008. 288 p.

## ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

### Выпуск 4

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 29.07.2022. Выход в свет 31.08.2022. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 9,21. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции и издательства: Ивановский государственный энергетический университет, 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Типография ООО «ПресСто», 153025, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Дзержинского