

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ ДВУХОБМОТОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА БАЗЕ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

**Т.Г. Климова**

ORCID: 0000-0002-0219-7770 e-mail: [tgklim@mail.ru](mailto:tgklim@mail.ru)  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Москва, Россия

**В.С. Смирнов**

ORCID: 0000-0002-8655-405X e-mail: [smirnovvs.21@gmail.com](mailto:smirnovvs.21@gmail.com)  
НТЦ Механотроника  
Санкт-Петербург, Россия

В статье рассмотрена модель двухобмоточного трансформатора, разработанная в графической среде имитационного моделирования *Simulink*. Актуальность работы определяется тем, что неожиданный отказ силового трансформатора может привести к значительным затратам на ремонт и финансовым потерям из-за внепланового отключения. Внедрение устройств синхронизированных векторных измерений (СВИ) позволяет при эксплуатации силовых трансформаторов накапливать большое количество данных о различных режимах их работы и определять в этих режимах параметры схемы замещения. Использование *Simulink* позволяет создать модель для имитации широкого спектра повреждений трансформатора с учетом влияния его режимов работы, в том числе, обусловленных бросками тока намагничивания и внешними короткими замыканиями. Данная модель содержит электрическую часть трансформатора, источники синусоидального напряжения, которые имплементируют энергосистемы стороны высокого и низкого напряжений, и блок нагрузки на стороне низкого напряжения. Разработан подход по оценке параметров T-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора в реальном времени на основе данных СВИ.

**Ключевые слова:** двухобмоточный трансформатор, моделирование, схема замещения, синхронизированные векторные измерения, сопротивление, цифровой двойник.

**Для цитирования:** Климова Т.Г., Смирнов В.С. Оценка параметров схемы замещения двухобмоточного трансформатора на базе синхронизированных векторных измерений // Интеллектуальная Электротехника. 2023. № 1. С. 102-119.  
DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_1\_102

## ESTIMATION OF PARAMETERS OF TWO-WINDING TRANSFORMER EQUIVALENT CIRCUIT BASED ON PMU

**T.G. Klimova**

ORCID: 0000-0002-0219-7770 e-mail: [tgklim@mail.ru](mailto:tgklim@mail.ru)  
National Research University «Moscow Power Engineering Institute»  
*Moscow, Russia*

**V.S. Smirnov**

ORCID: 0000-0002-8655-405X e-mail: [smirnovvs.21@gmail.com](mailto:smirnovvs.21@gmail.com)  
NTC Mekhanotronika  
*Saint-Petersburg, Russia*

**Abstract.** Power transformers of various designs are one of the most important and expensive elements of the power system. An unexpected failure of a power transformer can result in significant repair costs and financial losses due to an unplanned outage. The introduction of phasor measurement units (PMU) allows the operation of power transformers to accumulate a large amount of data on various modes of their operation and to determine the parameters of the equivalent circuit in these modes. The paper considers a model of a two-winding transformer, developed in the Simulink graphical simulation environment. The use of Simulink allows to create a model to simulate a wide range of transformer faults, considering the influence of its operating modes, including those caused by magnetizing current inrush and external short circuits. This model contains the electrical part of the transformer, sinusoidal voltage sources that implement the high and low electric power system sides respectively, and a load unit on the low voltage side. The main outcome of the research outlined in the article is the development of an approach to estimate the parameters of the T-shaped equivalent circuit of a two-winding transformer in real time based on PMU data.

**Keywords:** two-winding transformer, modeling, equivalent circuit, phasor measurement unit, resistance, digital twin.

**For citation:** T.G. Klimova and V.S. Smirnov, “Estimation of parameters of two-winding transformer equivalent circuit based on PMU”, *Smart Electrical Engineering*, no. 1, pp. 102-119, 2023. DOI: 10.46960/2658-6754\_2023\_1\_102

### I. Введение

В настоящее время в электроэнергетике активно разрабатываются и применяются цифровые двойники, способные предоставлять особенности любых объектов или субъектов [1-3]. Цифровизацию (цифровое моделирование и управление) электроэнергетических систем (ЭЭС) и электротехнических комплексов целесообразно начинать с цифровизации отдельных энергетических объектов, т.е. с создания их цифровых двойников, функционирующих в реальном времени на основе данных телеизмерений базовых

параметров [4]. В крупных ЭЭС по всему миру массово внедряются устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ) напряжений и токов [5, 6]. Это создает предпосылки использования измерений УСВИ для оценки параметров схемы замещения силового оборудования [7], в том числе, параметров схемы замещения силового двухобмоточного трансформатора.

Дефекты элементов силовых трансформаторов вызывают отклонения их параметров (табл. 1), которые проявляются в значениях режимных параметров. Следовательно, по данным отклонениям можно обнаружить дефекты трансформаторов, а также связанные с ними изменения параметров схем замещения [8, 9], вплоть до предельно допустимых.

**Таблица 1.**  
**Базовая таблица допустимых отклонений**

**Table 1.**  
**Common table of allowable deviations**

№ п/п	Наименование параметра	Предельное отклонение, %	Примечание
1	Коэффициент трансформации	$\pm 1,0$	Для трансформаторов с коэффициентом трансформации фазных напряжений три и менее, а также на неосновном ответвлении
		$\pm 0,5$	Для всех остальных трансформаторов на основном ответвлении
2	Напряжение короткого замыкания ( $U_K$ ) основного ответвления	$\pm 7,5$	Для двухобмоточного трансформатора или для пары обмоток трехобмоточного трансформатора, указанной в нормативной документации как основная пара, при $U_K > 10\%$
		$\pm 10$	Для остальных трансформаторов
3	Потери короткого замыкания на основном ответвлении	10	Для всех двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и для основной пары обмоток трехобмоточных автотрансформаторов
		20	Для неосновных пар обмоток трехобмоточных автотрансформаторов
4	Потери холостого хода	15	Для всех трансформаторов
5	Суммарные потери	10	Для всех трансформаторов
6	Ток холостого хода	30	Для всех трансформаторов

Предельные отклонения измеряемых параметров трансформаторов от нормированных согласно ГОСТ Р 52719–2007 [10] не должны превышать значений, указанных в табл. 2.

**Таблица 2.**  
**Предельные допустимые отклонения параметров схем замещения трансформатора (по данным табл. 1)**

**Table 2.**  
**Maximum allowable deviations of parameters of transformer equivalent circuit (according to Table 1)**

№ п/п	Наименование параметра	Вычисляются по формулам	Предельное отклонение, %
1	Активное и индуктивное сопротивление продольной ветви	$x_T = \frac{U_{K\%} \cdot c}{100 \cdot S_{\text{ном}}}$	±7,5
		$r_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$	±10
			10
2	Активная и индуктивная проводимость ветви намагничивания	$g_T = \frac{\Delta P_X}{U_{\text{ном}}^2}$	20
		$b_T = \frac{I_{X\%} \cdot S_{\text{ном}}}{100 \cdot U_{\text{ном}}^2}$	15
			30

## II. Математическая модель для оценки параметров схемы замещения

Исследование режима работы сложной электрической цепи часто сводится к установлению связи между токами, напряжениями и мощностями различных ее участков или ветвей. При этом режим остальной части цепи может оставаться неизвестным, хотя все ее параметры учитываются при решении задачи. В таких условиях рассматриваемая цепь может определяться обобщенными параметрами на соответствующих зажимах, относительно которых параметры заданы или должны быть найдены [11, 12].

T-образная схема замещения двухобмоточного трансформатора позволяет отдельно рассчитывать цепи первичной и вторичной обмоток. В схему замещения трансформатора входят поля рассеивания магнитного потока, а вторичные цепи пересчитываются в первичную через коэффициенты трансформации.

Рассмотрим одну фазу силового трансформатора через аппарат пассивного четырехполюсника (рис. 1) с известными параметрами по току и напряжению его выводов.

Систему уравнений для однофазного трансформатора, рассматриваемого как пассивный четырехполюсник, можно представить в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1^{(1)} & \underline{U}_1^{(2)} & \dots & \underline{U}_1^{(n)} \\ \underline{I}_1^{(1)} & \underline{I}_1^{(2)} & \dots & \underline{I}_1^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{a} & \underline{b} \\ \underline{c} & \underline{d} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \underline{U}_2^{(1)} & \underline{U}_2^{(2)} & \dots & \underline{U}_2^{(2)} \\ \underline{I}_2^{(1)} & \underline{I}_2^{(2)} & \dots & \underline{I}_2^{(2)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $\underline{U}_1, \underline{I}_1$  – синхронизированные векторные измерения (СВИ) (вектор основной гармоники в комплексной форме) со стороны высшего напряжения (ВН) трансформатора;  $\underline{U}_2, \underline{I}_2$  – измерения СВИ (вектор основной гармоники в комплексной форме) со стороны низшего напряжения (НН) трансформатора;  $n$  – количество измерений СВИ, участвующих в расчете;  $\underline{a}, \underline{b}, \underline{c}, \underline{d}$  – обобщенные параметры четырехполюсника в комплексной форме

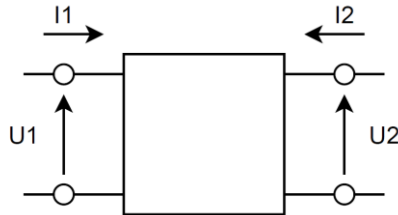


Рис. 1. Схема пассивного четырехполюсника

Fig. 1. Four-terminal passive network

Связь обобщенных параметров четырехполюсника с параметрами Т-образной схемы замещения трансформатора следующая:

$$\underline{Z}_{\text{вн}} = \frac{a-1}{c}; \quad (2)$$

$$\underline{Z}_{\text{нн}} = \frac{d-1}{c}; \quad (3)$$

$$\underline{Z}_m = \frac{1}{c}, \quad (4)$$

где  $\underline{Z}_{\text{вн}}$  – полное сопротивление обмотки ВН в комплексной форме;  $\underline{Z}_{\text{нн}}$  – полное сопротивление обмотки НН в комплексной форме;  $\underline{Z}_m$  – полное сопротивление магнитной цепи в комплексной форме.

Для решения рассматриваемой переопределенной задачи используется линейный метод наименьших квадратов (МНК) [13, 14]. Обозначим матрицу измерений СВИ со стороны ВН трансформатора через [И1], со стороны НН через [И2], а обобщенные параметры через [А]. Тогда решение системы по МНК примет вид:

$$[A] = [I1] * [I2]^T * ([I2] * [I2]^T)^{-1}. \quad (5)$$

Диаграмма последовательности действий разработанного подхода по оценке параметров схемы замещения силового трансформатора представлена на рис. 2.

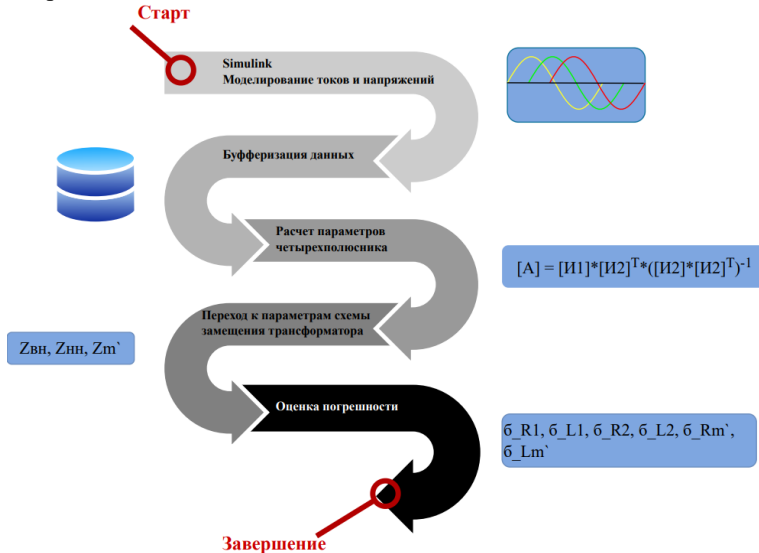


Рис. 2. Диаграмма подхода по оценке параметров схемы замещения

Fig. 2. Diagram of the approach for estimating the parameters of the equivalent circuit

Далее представлена идентификация параметров Т-образной схемы замещения трансформаторов, по предложенному алгоритму, и оценка погрешности идентификации.

### III. Однофазный приведенный трансформатор

На начальном этапе апробации предложенного выше метода рассматривается Т-образная схема приведенного линейного трансформатора, смоделированная простейшими элементами электротехнической библиотеки *Simulink* [15]. Модель представлена на рис. 3. Параметры модели представлены в табл. 3.

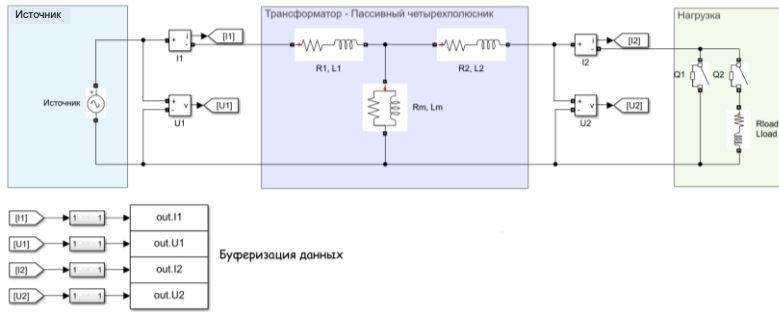


Рис. 3. Моделируемая схема в *Simulink* для Т-образной схемы замещения приведенного трансформатора

Fig. 3. Simulated circuit in *Simulink* for the T-shaped equivalent circuit of the reduced transformer

Таблица 3.  
Исходные параметры схемы и трансформатора

Table 3.  
Initial circuit and transformer parameters

Параметры сети	Значение
Амплитуда источника, В	100
Начальная фаза, °	0
$R_{нагр}$ , Ом	изменяемая величина
$L_{нагр}$ , Гн	изменяемая величина
Параметры схемы замещения трансформатора	Значение
$R_1$ , Ом	1
$L_1$ , Гн	0,001
$R_2$ , Ом	1
$L_2$ , Гн	0,001
$R_m$ , Ом	9080,003316
$L_m$ , Гн	2890,254822

Моделирование различных режимов работы осуществляется изменением значений активного сопротивления нагрузки, индуктивности нагрузки и включением/отключением выключателей  $Q1$  и  $Q2$ . Рассматриваются режимы холостого хода, короткого замыкания и режимы нагрузки. Смоделированные данные буферизируются и обрабатываются алгоритмом, предложенным выше (5).

Смоделированные данные токов и напряжений стороны ВН и НН группируются в пяти различных наборах данных. В каждом наборе данных содержатся значения токов и напряжений различных режимов:

- 1) данные режимов холостого хода (XX), короткого замыкания (КЗ) и трех нагрузочных режимов;
- 2) данные режимов XX и КЗ;
- 3) данные режимов XX и трех нагрузочных режимов;
- 4) данные режимов КЗ и трех нагрузочных режимов;
- 5) данные трех нагрузочных режимов.

Каждый набор данных используется для идентификации параметров схемы замещения по (5). Рассмотрение пяти наборов данных необходимо для сравнения оцениваемых параметров схемы замещения и выбора, для дальнейшей работы, моделируемых режимов работы трансформатора.

В табл. 4 представлены результаты идентификации параметров Т-образной схемы замещения приведенного трансформатора для предложенных наборов данных. В табл. 5 представлены погрешности оценки параметров Т-образной схемы замещения приведенного трансформатора.

**Таблица 4.**  
**Оцененные параметры Т-образной схемы замещения для пяти наборов данных**

**Table 4.**  
**Estimated parameters of the equivalent circuit for five data sets**

Оцениваемый параметр	Набор данных 1	Набор данных 2	Набор данных 3	Набор данных 4	Набор данных 5
$R_1$ , Ом	0,9999975	1,0000000	1,0000000	1,0000078	0,9999898
$L_1$ , Гн	0,0010005	0,0010005	0,0010005	0,0010005	0,0010005
$R_2$ , Ом	1,0000083	1,0000078	1,0000105	1,0000050	1,0000073
$L_2$ , Гн	0,0010005	0,0010005	0,0010005	0,0010005	0,0010005
$R_m$ , Ом	9080,85574 33	9080,86201 01	9080,86201 02	9080,83712 09	9080,84717 87
$L_m$ , Гн	9,1960770	9,1961067	9,1961067	9,1960406	9,1960501

Результаты повторной идентификации параметров схемы замещения с измененными значениями  $R_1$  и  $L_2$ , представлены в табл. 6 и 7, а также на рис. 4. Значение активного сопротивления  $R_1$  увеличено на 100 %, значение индуктивности  $L_2$  увеличено на 200 %.

Представленные результаты относительной погрешности показывают высокую точность оценки параметров схемы замещения для всех пяти наборов данных. Максимальная погрешность оценки не превышает 0,06 %.



**Таблица 5.**  
Относительная погрешность оценки параметров  
Т-образной схемы замещения

**Table 5.**  
Fractional error in estimating the parameters of the T-shaped equivalent circuit

Относительная погрешность	Набор данных 1	Набор данных 2	Набор данных 3	Набор данных 4	Набор данных 5
$\delta R_1, \%$	0,000250	0,000001	0,000001	0,000783	0,001017
$\delta L_1, \%$	0,050862	0,051436	0,051436	0,051568	0,050631
$\delta R_2, \%$	0,000832	0,000778	0,001053	0,000500	0,000727
$\delta L_2, \%$	0,053433	0,053478	0,054202	0,052751	0,053022
$\delta R_m, \%$	0,009388	0,009457	0,009457	0,009183	0,009294
$\delta L_m, \%$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

**Таблица 6.**  
Оцененные параметры Т-образной схемы замещения  
для пяти наборов данных с новыми  $R_1$  и  $L_2$

**Table 6.**  
Estimated parameters of the equivalent  
circuit for five data sets with new  $R_1$  and  $L_2$

Оцениваемый параметр	Набор данных 1	Набор данных 2	Набор данных 3	Набор данных 4	Набор данных 5
$R_1, \text{ Ом}$	2,000003	2,000000	2,000000	2,000008	2,000007
$L_1, \text{ Гн}$	0,001001	0,001001	0,001001	0,001001	0,001001
$R_2, \text{ Ом}$	1,000025	1,000020	1,000031	1,000012	1,000020
$L_2, \text{ Гн}$	0,003002	0,003002	0,003002	0,003002	0,003002
$R_m, \text{ Ом}$	9080,842831	9080,861938	9080,861938	9080,764278	9080,803517
$L_m, \text{ Гн}$	9,196029	9,196106	9,196106	9,195834	9,195937

Далее рассматривается наиболее приближенный к реальному трехфазный двухобмоточный трансформатор с учетом насыщения стали сердечника. При оценке параметров схемы замещения данного трансформатора анализируются только нагрузочные режимы работы. Это позволяет предположить, что в данных режимах работы параметры схемы замещения трансформатора не претерпевают резких скачкообразных изменений, что дает основания считать трансформатор линейным в рассматриваемых режимах и использовать предложенный ранее линейный МНК для оценки параметров схемы замещения трансформатора.

Таблица 7.

Относительная погрешность оценки параметров  
Т-образной схемы замещения с новыми  $R_1$  и  $L_2$

Table 7.

Fractional error in estimating the parameters  
of the T-shaped equivalent circuit with new  $R_1$  and  $L_2$

Относительная погрешность	Набор данных 1	Набор данных 2	Набор данных 3	Набор данных 4	Набор данных 5
$\bar{\delta} R_1, \%$	0,000128	0,000001	0,000001	0,000400	0,000366
$\bar{\delta} L_1, \%$	0,051590	0,051435	0,051435	0,051727	0,051293
$\bar{\delta} R_2, \%$	0,002530	0,001976	0,003053	0,001229	0,002007
$\bar{\delta} L_2, \%$	0,053644	0,053518	0,054515	0,051682	0,052808
$\bar{\delta} R_m', \%$	0,009246	0,009456	0,009456	0,008381	0,008813
$\bar{\delta} L_m', \%$	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000

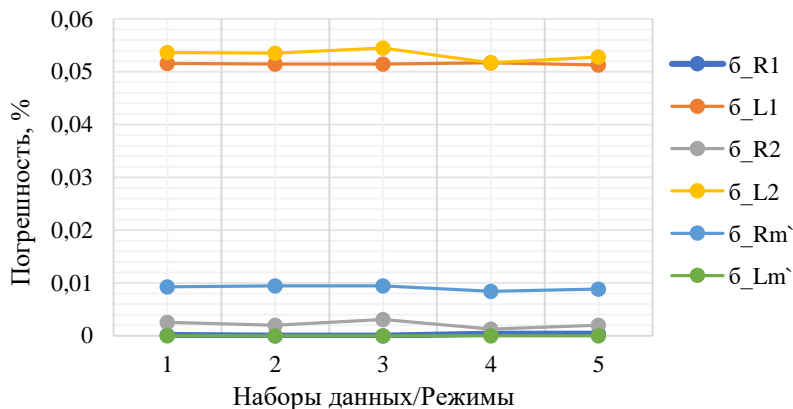


Рис. 4. Зависимость погрешности идентификации от наборов данных

Fig. 4. Dependence of identification error on the data sets

#### IV. Трехфазный двухобмоточный трансформатор

Электрическая схема для моделирования набора данных токов и напряжений трехфазного двухобмоточного трансформатора представлена на рис. 5. Схема содержит блок эквивалентной энергосистемы, блок трансформатора и блок нагрузки из электротехнической библиотеки *Simulink*. Паспортные данные трехфазного двухобмоточного трансформатора представлены в табл. 8. Рассчитанные параметры Т-образной схемы замещения по паспортным данным, представлены в табл. 9.

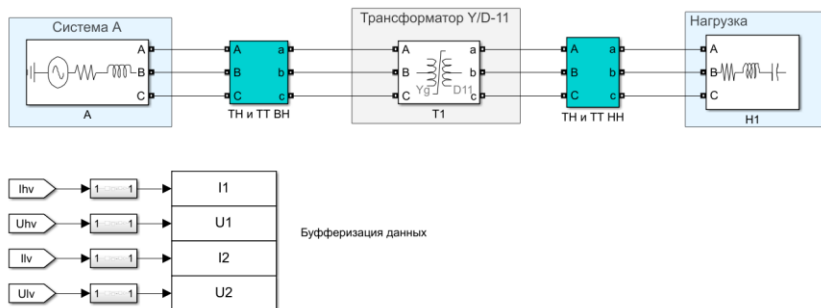


Рис. 5. Моделируемая схема в *Simulink* для трехфазного двухобмоточного трансформатора

Fig. 5. Simulated circuit in *Simulink* for three-phase two-winding transformer

Таблица 8.  
Паспортные данные трехфазного двухобмоточного трансформатора

Table 8.  
Datasheet for three-phase two-winding transformer

Параметр	Значение
Мощность, МВА	63
Высшее напряжение, кВ	121
Низшее напряжение, кВ	10,5
$U_k$ , %	10,5
$P_k$ , кВт	245
$P_{хх}$ , кВт	59
$I_{хх}$ , %	0,65

Моделирование различных режимов работы осуществляется изменением значения потребляемой мощности блока нагрузки. Для идентификации параметров Т-образной схемы замещения, рассматриваемого трансформатора, было накоплено более 100 000 выборок токов и напряжений нагрузочного режима, что соответствует примерно 33-м мин наблюдения.

В табл. 10 представлены результаты идентификации параметров Т-образной схемы замещения трехфазного двухобмоточного трансформатора. В табл. 11 представлены погрешности оценки параметров Т-образной схемы замещения, рассматриваемого трансформатора. Рис. 6 иллюстрирует полученные погрешности идентификации параметров схемы замещения для каждой из фаз.

**Таблица 9.**  
**Рассчитанные параметры Т-образной схемы замещения по паспортным данным трансформатора**

**Table 9.**  
**Calculated parameters of the T-shaped equivalent circuit according to the transformer datasheet**

Оцениваемый параметр	фаза А	фаза В	фаза С
$R_1$ , Ом	0,150628	0,150628	0,150628
$L_1$ , Гн	0,012937	0,012937	0,012937
$R_2$ , Ом	0,003403	0,003403	0,003403
$L_2$ , Гн	0,000292	0,000292	0,000292
$R_m$ , Ом	1717,092477	1717,092477	1717,092477
$L_m$ , Гн	37,539684	37,539684	37,539684

**Таблица 10**  
**Оцененные параметры Т-образной схемы замещения**

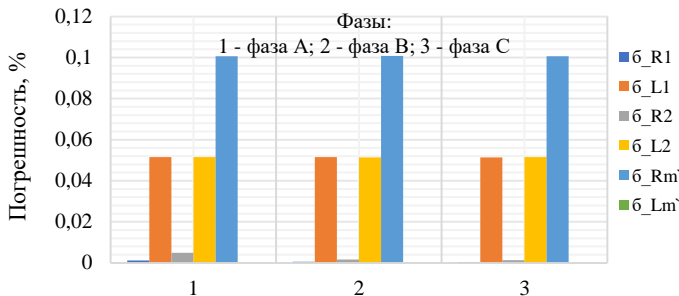
**Table 10.**  
**Estimated parameters of the T-shaped equivalent circuit**

Оцениваемый параметр	фаза А	фаза В	фаза С
$R_1$ , Ом	0,150626	0,150628	0,150627
$L_1$ , Гн	0,012943	0,012943	0,012943
$R_2$ , Ом	0,150635	0,150630	0,150629
$L_2$ , Гн	0,012943	0,012943	0,012943
$R_m$ , Ом	1718,819287	1718,822098	1718,821476
$L_m$ , Гн	37,558193	37,558196	37,558186

**Таблица 11.**  
**Относительная погрешность оценки параметров Т-образной схемы замещения**

**Table 11.**  
**Fractional error in estimating the parameters of the T-shaped equivalent circuit**

Относительная погрешность	фаза А	фаза В	фаза С
$\delta R_1$ , %	0,001190	0,000474	0,000465
$\delta L_1$ , %	0,051456	0,051448	0,051406
$\delta R_2$ , %	0,004948	0,001695	0,001255
$\delta L_2$ , %	0,051450	0,051362	0,051510
$\delta R_m$ , %	0,100566	0,100730	0,100693
$\delta L_m$ , %	0,000000	0,000000	0,000000



**Рис. 6. Погрешности идентификации параметров схемы замещения для каждой из фаз трансформатора**

**Fig. 6. Errors of identification of parameters of the equivalent circuit for each of the transformer phases**

Представленные результаты относительной погрешности показывают высокую точность оценки параметров схемы замещения. Максимальная погрешность оценки не превышает 0,11 %. При необходимости перехода к параметрам Стандарта [10] целесообразно воспользоваться табл. 12.

**Таблица 12.  
Нахождение паспортных данных по параметрам схем замещения трансформатора**

**Table 12.  
Finding nameplate data on the parameters of transformer equivalent circuit**

№ п/п	Наименование рассчитываемого параметра	Измеренный параметр	Паспортный параметр
1	Напряжение короткого замыкания % $U_{\text{ном}}$ $U_{\text{к\%}}$	Индуктивное сопротивление продольной ветви $x_{\text{T}}$	$U_{\text{к\%}} = x_{\text{T}} \cdot 100 \cdot \frac{S_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}^2}$
	Потери короткого замыкания, $\Delta P_{\text{к}}$	Активное сопротивление продольной ветви $r_{\text{T}}$	$\Delta P_{\text{к}} = r_{\text{T}} \cdot \frac{S_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ном}}^2}$
2	Потери холостого хода $\Delta P_{\text{x}}$	Активная проводимость ветви намагничивания $g_{\text{T}}$	$\Delta P_{\text{x}} = g_{\text{T}} \cdot U_{\text{ном}}^2$
	Ток холостого хода % $I_{\text{ном}}$ $I_{\text{x\%}}$	Индуктивная проводимость ветви намагничивания $b_{\text{T}}$	$I_{\text{x\%}} = \frac{b_{\text{T}} \cdot 100 \cdot U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$

## В. Выводы

Основной результат работы – аналитический подход по оценке параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора на основе данных СВИ, с использованием линейного метода наименьших квадратов [13]. Даже без учета погрешности, вносимой самими УСВИ (суммарный квадрат погрешности не превысит суммы квадратов погрешностей устройств, данные с которых задействованы в расчете), точность оценки и простота реализации являются основными преимуществами данного подхода. Метод позволяет также оценивать параметры трансформатора отдельно для стороны ВН, стороны НН и магнитной цепи соответственно.

Использование УСВИ обеспечивает получение оценок параметров схемы замещения в реальном времени без отключения силового трансформатора. Синхронизация измерений режимных параметров в разных точках объекта и их высокая точность позволяет определить любые изменения параметров схемы замещения трансформатора, характеризующие его состояние. Это является исходными данными для создания цифровых двойников силовых трансформаторов по описанной математической модели.

© Климова Т.Г., 2023

© Смирнов В.С., 2023

*Поступила в редакцию 27.10.2022*

*Received 27.10.2022*

## Библиографический список

- [1] Yang Y., Chen Z., Yan J., Xiong Z., Zhang J., Yuan H., Tu Y., Zhang T. State evaluation of power transformer based on digital twin // *proc. 2019 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*, Nov. 6-8, 2019, Zhengzhou, China: IEEE, 2019. DOI: 10.1109/SOLI48380.2019.8955043
- [2] Moutis P., Alizadeh-Mousavi O. Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurement // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020. Vol. 36. No. 4. P. 1952-1963. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3017355
- [3] Воропай Н.И., Массель Л.В., Колосок И.Н., Массель А.Г. ИТ-инфраструктура для построения интеллектуальных систем управления развитием и функционированием систем энергетики на основе цифровых двойников и цифровых образов // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2021. № 1. С. 3-13. DOI: 10.31857/S0002331021010180
- [4] Бутырин П.А., Алпатов М.Е. Цифровизация и аналитика в электротехнике. Цифровые двойники трансформаторов // *Электричество*. 2021. № 10. С. 4-10. DOI: 10.24160/0013-5380-2021-10-4-10
- [5] Chakrabarti S., Kyriakides E., Bi T., Cai D., Terzija V. Measurements get together // *IEEE Power and Energy Magazine*. 2009. Vol. 7. No. 1. P. 41-49. DOI: 10.1109/MPE.2008.930657

- [6] Жуков А.В., Сацук Е.И., Дубинин Д.М., Опалев О.Л., Уткин Д.Н. Опыт разработки, внедрения и эксплуатации системы мониторинга переходных режимов в ЕЭС России // 5-я Международ. науч.-тех. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем», Июнь 1-5, 2015. № 4 (31). С. 124-127.
- [7] Иванов И.Е., Жуков А.В., Дубинин Д.М. Идентификация параметров линий электропередачи различной конфигурации на базе данных СВИ // Релейщик. 2021. № 2 (40). С. 20-25.
- [8] Лизунов С.Д., Лоханин А.К. Силовые трансформаторы. Справочная книга. М.: Энергоиздат, 2004. – 614 с.
- [9] Неклепаев Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
- [10] ГОСТ Р 52719-2007. Трансформаторы силовые. Общие технические условия. Введ. 2008-01-01. М.: Стандартинформ, 2007. – 46 с.
- [11] Бутырин П.А., Толчеев О.В., Шакирзянов Ф.Н. Основы электротехники. М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 360 с.
- [12] Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Юрайт, 2014. – 701 с.
- [13] Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. М.: Физмалит, 2005. – 280 с.
- [14] Кривилев А.В. Основы компьютерной математики с использованием MATLAB. М.: Лекс-Книга, 2005. – 483 с.
- [15] Mathworks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/> (дата обращения 10.02.2022).

### References

- [1] Y. Yang, Z. Chen, J. Yan, Z. Xiong, J. Zhang, H. Yuan, Y. Tu and T. Zhang, “State evaluation of power transformer based on digital twin”, in proc. *2019 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), and Informatics (SOLI)*, Nov. 6-8, 2019, Zhengzhou, China. DOI: 10.1109/SOLI48380.2019.8955043
- [2] P. Moutis and O. Alizadeh-Mousavi, “Digital twin of distribution power transformer for real-time monitoring of medium voltage from low voltage measurement”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 36, no. 4, pp. 1952-1963, 2020. DOI: 10.1109/TPWRD.2020.3017355
- [3] N.I. Voropai, L.V. Massel, I.N. Kolosok and A.G. Massel, “IT-infrastructure for construction of intelligent management systems of development and functioning of energy systems based on digital twins and digital images”, *Izvestiya Rossijskoi Akademii Nauk. Energy*, no. 1, pp. 3-13, 2021. DOI: 10.31857/S0002331021010180
- [4] P.A. Butyrin and M.E. Alpatov, “Digitalization and analytics in electrical engineering. digital twins of transformers”, *Electricity*, no. 10, pp. 4-10, 2021.
- [5] S. Chakrabarti, E. Kyriakides, T. Bi, D. Cai and V. Terzija, “Measurements get together”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 7, no. 1, pp. 41-49, 2009. DOI: 10.1109/MPE.2008.930657
- [6] A.V. Zhukov, E.I. Sacuk, D.M. Dubinin, O.L. Opalev, D.N. Utkin, “Opyt razrabotki, vnedreniya i ekspluatatsii sistemy monitoringa perekhodnyh rezhimov v EES Rossii

- [Experience in the development, implementation and operation of a system for monitoring transient regimes in the UES of Russia]”, in proc. 5-ya *Mezhdunarod. nauch.-tekh. konf. “Sovremennye napravleniya razvitiya sistem relejnoj zashchity i avtomatiki energosistem” [5th International. sci.-tech. conf. “Modern trends in the development of relay protection systems and automation of power systems”]*, Jun. 1-5, 2015, vol. 4, no. 31, pp. 124-127 (in Russian).
- [7] I.E. Ivanov, A.V. Zhukov and D.M. Dubinin, “Identifikaciya parametrov linij elektropredachi razlichnoj konfiguracii na baze dannyh SVI [Identification of the parameters of power lines of various configurations based on the data of SMI], *Relejshchik [Relayshchik]*, vol. 2, no. 40, pp. 20-25, 2021 (in Russian).
- [8] S.D. Lizunov and A.K. Lohanin, *Silovye transformatory. Spravochnaya kniga [Power transformers. Reference book]*. Moscow: Energoizdat, 2004 (in Russian).
- [9] B.N. Neklepaev, *Elektricheskaya chast' elektrostancij i podstancij: Spravochnye materialy dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya [Electrical part of power plants and substations: Reference materials for course and diploma design]*. Moscow: Energoatomizdat, 1989 (in Russian).
- [10] Power transformers. General specifications, GOST R 52719-2007, Jan. 2008.
- [11] P.A. Butyrin, O.V. Tolcheev and F.N. Shakirzyanov, *Osnovy elektrotehniki [Fundamentals of electrical engineering]*. Moscow: MPEI Publishing House, 2014 (in Russian).
- [12] L.A. Bessonov, *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie cepi [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits]*. Moscow: Yurayt, 2014 (in Russian).
- [13] V.A. Ilin and E.G. Poznyak, *Linejnaya algebra [Linear algebra]*. Moscow: Fismalit, 2005 (in Russian).
- [14] A.V. Krivilev, *Osnovy komp'yuternoj matematiki s ispol'zovaniem MATLAB [Fundamentals of computer Mathematics using MATLAB]*. Moscow: Lex-Book, 2005 (in Russian).
- [15] Mathworks [Online]. Available at: <https://www.mathworks.com/> [Accessed: Feb. 10, 2022].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Климова Татьяна Георгиевна**, кандидат технических наук, доцент Национального исследовательского университета «МЭИ», Москва, Российская Федерация.

**Смирнов Владимир Сергеевич**, ведущий инженер НТЦ Механотроника, Санкт-Петербург, Российская Федерация.

**Tatyana G. Klimova**, Cand. Sci. (Eng.), associate professor of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation.

**Vladimir S. Smirnov**, leading engineer of the NTC Mekhanotronika, Saint-Petersburg, Russian Federation.