

For citation: Ipatov A. G., Kharanzhevsky E. V. Numerical model of melting of the powder composition B_4C -BN under the conditions of short-pulse laser processing. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 3 (83): 151-156. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_3_151-156.

Authors:

A. G. Ipatov¹✉, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-2637-4214>;

E. V. Kharanzhevsky², Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1525-2169>

¹Udmurt State Agricultural University, 9 Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069

²Udmurt State University, 1 Universitetskaya St., Izhevsk, Russia, 426034

¹ipatow.al@yandex.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the authors declare that they have no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 19.08.2025; одобрена после рецензирования 26.08.2025;

принята к публикации 04.09.2025.

The article was submitted 19.08.2025; approved after reviewing 26.08.2025; accepted for publication 04.09.2025.

Научная статья

УДК 621.314.222.6:004.94

DOI 10.48012/1817-5457_2025_3_156-165

ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10/0,4 КВ В MATLAB SIMULINK

Лансберг Александр Александрович

ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», Москва, Россия

lansbergaa@vk.com

Аннотация. Компьютерное моделирование является одним из наиболее достоверных способов исследования нагрузочных и аварийных режимов работы трансформаторов. Наиболее функциональным инструментом моделирования является программный комплекс MATLAB Simulink. В большинстве работ не приводятся сведения по обоснованию электрических параметров компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ и оценке их достоверности. Цель исследования – обосновать параметры компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink и оценить их достоверность. С использованием литературных источников были определены электрические параметры для наиболее часто используемых силовых трансформаторов 10/0,4 кВ сельских электрических сетей. Это трансформаторы конструкции ТМ с номинальными напряжениями 10/0,4 кВ и мощностью от 63 кВА до 630 кВА, со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0 . Достоверность рассчитанных параметров была оценена путем сравнения потерь холостого хода и короткого замыкания, полученным по результатам моделирования, с табличными, а также путем моделирования режимов устойчивых коротких замыканий на выводе 0,4 кВ трансформатора и сравнения значений токов аварийных режимов с расчетными по методу симметричных составляющих. Выявлено, что при компьютерном моделировании аварийных режимов на выводе 0,4 кВ трансформатора значения тока однофазного короткого замыкания, рассчитанные с использованием метода симметричных составляющих, по сравнению с результатами моделирования отличаются не более чем на 1 %, а для двухфазного и трехфазного коротких замыканий – не более чем на 4 %. При этом потери холостого хода и короткого замыкания, полученные в ходе моделирования, отличаются от паспортных значений не более чем на 1 %. Результаты исследования показали, что рассчитанные параметры силовых трансформаторов 10/0,4 кВ могут использоваться для моделирования режимов их работы в программном комплексе MATLAB Simulink.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, компьютерная модель, силовой трансформатор, короткое замыкание, потери холостого хода, потери короткого замыкания.

Для цитирования: Лансберг А. А. Параметры силовых трансформаторов для компьютерной модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. № 3 (83). С. 156-165. https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_3_156-165.

Актуальность. В настоящее время множество работ направлено на моделирование режимов работы силовых трансформаторов и процессов, происходящих в них. Это связано с тем, что силовой трансформатор является важным элементом электрических сетей. Одним из наиболее достоверных способов исследования режимов их работы является компьютерное моделирование. В частности, для этого используется программный комплекс MATLAB Simulink, который является одним из наиболее функциональных инструментов для исследования.

В работе [12] представлена компьютерная модель однофазного двухобмоточного трансформатора в программном комплексе MATLAB Simulink, достоверность которой была оценена путем сопоставления электрических параметров модели с расчетными значениями по уравнениям равновесия напряжений и токов. Схожее исследование на примере трехфазного трансформатора реализовано турецкими учеными в источнике [24]. При этом в работе [19] описана компьютерная модель однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали в программном комплексе MATLAB Simulink, исследование которой позволило выявить, что бросок тока при включении трансформатора под напряжение значительно превышает сопоставимый параметр для трансформаторов с сердечником из электротехнических сталей. Моделирование однофазных трансформаторов производится не только в программном комплексе MATLAB Simulink. Например, в источнике [20] в среде Multisim разработана компьютерная модель однофазного трансформатора, прототипом которой является ОСМ-0,63-220/42.

Значительное количество работ направлено на моделирование высоковольтных трансформаторов. Так, в работе [2] исследуется компьютерная модель трехобмоточного силового трансформатора мощностью 6300 кВА с номинальными напряжениями обмоток 115 кВ, 38,5 кВ и 11 кВ и схемой и группой соединения обмоток $Y_n/Y_n/D-0-11$. На компьютерной модели были исследованы режимы несимметричных коротких замыканий и неполнофазных режимов, что позволило выявить электрические параметры, характерные для данных аварийных режимов. Схожее исследование на примере автотрансформатора мощностью 250 МВА и номинальными напряжениями обмоток 330 кВ, 115 кВ и 11 кВ реализовано в работе [3]. В работе [22] рассмотрены вопросы повышения достоверности компьютерных моделей силовых трансформаторов за счет учета ветвей намагничивания, которые моделируют-

ся составными кривыми с гистерезисной частью и частью глубокого насыщения. Для расчета параметров высоковольтных трансформаторов в программном комплексе MATLAB Simulink в работе [16] разработана методика, рассмотренная на примере обоснования параметров трансформатора типа ТДН-16000/110. Достоверность модели оценена путем сравнения потерь холостого хода и короткого замыкания, полученным в результате моделирования, с табличными значениями. Схожее исследование на примере трансформатора типа ТДТН-25000/110 реализовано в работе [6]. А для трансформатора типа ТДН-10000/35 параметры обоснованы в работе [17], при этом также на компьютерной модели данного трансформатора реализовано моделирование бросков тока намагничивания при подаче на него напряжения и определены гармонические составляющие тока [14]. В источнике [7] разработана компьютерная модель трансформатора типа ТДН-63000/110, на которой реализовано исследование режимов витковых замыканий в обмотках и выявлено, что полученные электрические параметры могут использоваться в качестве установок средств релейной защиты.

Одним из актуальных направлений является моделирование силовых трансформаторов, использующихся в системах тягового электропитания. Например, в работе [5] в программном комплексе MATLAB Simulink разработана компьютерная модель тягового трансформатора типа ОНДЦЭ5700/25У2, достоверность которой была оценена путем моделирования токов короткого замыкания на его выводах и сравнения результатов с расчетными данными.

Множество работ направлено на моделирование трансформаторов распределительных электрических сетей. Так, в работе [1] с использованием программного комплекса MATLAB Simulink разработаны компьютерные модели трансформаторов типов ТС-400/10/0,4 и ТСЗН-400/10/0,4. Их достоверность оценена по опытам холостого хода и короткого замыкания, значения которых сопоставлялись с табличными данными. Для разработанных компьютерных моделей силовых трансформаторов были исследованы режимы параллельной работы [8, 9] и несимметричные аварийные режимы работы, вызванные обрывами проводов и короткими замыканиями [13]. При этом в программном комплексе MATLAB Simulink отсутствует возможность моделирования силового трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда-зигзаг» с нулевым проводом и 11-й группой (Y/Z_n-11). В связи

с этим, в работе [18] автором представлена собственная компьютерная модель трансформатора с указанной схемой и группой соединения обмоток. В работе [23] произведено обоснование параметров компьютерной модели трансформатора ТМГ-100/10/0,4 Y/Y_n-0 и оценена ее достоверность путем сопоставления нагрузочных потерь, полученных в ходе моделирования, с расчетными для разных коэффициентов загрузки трансформатора. Выявлена высокая достоверность разработанной модели при моделировании нагрузочных режимов. Однако достоверность результатов моделирования аварийных режимов может быть не высока, так как в работе не произведено обоснование параметров нулевой последовательности для трансформатора, а также не приведены сведения для моделирования других типов трансформаторов. В работе [4] автором определены индуктивные сопротивления обмоток трансформаторов конструкции ТМ номинальных мощностей от 100 кВА до 630 кВА, необходимых для моделирования нагрузочных режимов в MATLAB Simulink. При этом параметры нулевой последовательности не представлены, что ограничивает возможность моделирования аварийных режимов.

Цель исследования – обосновать параметры силовых трансформаторов для компьютерной модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink и оценить их достоверность.

Материал и методы исследования. Произведем определение параметров для ряда трансформаторов, которые наиболее часто применяются в электросетевых компаниях Российской Федерации. Рассмотрим устаревшие трансформаторы конструкции ТМ класса напряжения 10/0,4 кВ со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0 номинальных мощностей от 63 кВА

до 630 кВА [21]. Доля данных трансформаторов в электросетевом комплексе достигает порядка 70 % [10], так как схему и группу соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом» в СССР использовали в связи с тем, что она характеризовалась меньшими потерями мощности по сравнению с другими схемами и группами соединения обмоток.

Технические характеристики указанных силовых трансформаторов, необходимые для расчета параметров компьютерных моделей в MATLAB Simulink, представлены в таблице 1.

В программном комплексе MATLAB Simulink двухобмоточный трансформатор моделируется с помощью блока «Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings)» библиотеки Three-Phase Electrical [25]. В указанном блоке задаются следующие параметры. В качестве конструкции магнитопровода был выбран бронестержневой тип с 5 стержнями. Согласно источнику [15], за исключением номинальной частоты и мощности, а также соотношений номинальных напряжений обмоток, параметрами компьютерной модели силового трансформатора являются:

- ток холостого хода, I_{xx} , %;
- потери холостого хода, P_{xx} , Вт;
- активные сопротивления обмоток трансформатора R_1, R_2 , о.е.;
- индуктивное сопротивление трансформатора в относительных единицах, $X_T^{o.e.}$, о.е.;
- ток холостого хода нулевой последовательности в процентах от номинального, I_{0xx} , %;
- потери холостого хода нулевой последовательности, P_{0xx} , Вт;
- индуктивное сопротивление трансформатора нулевой последовательности в относительных единицах $X_{T0}^{o.e.}$, о.е.

Таблица 1 – Параметры силовых трансформаторов 10/0,4 кВ

№ п/п	Тип трансформатора	Потери холостого хода, ΔP_{xx} , кВт	Потери короткого замыкания, $\Delta P_{kз}$, кВт	Напряжение короткого замыкания, U_k , %	Ток холостого хода, I_{xx} , %	Активное сопротивление прямой последовательности, R_1 , Ом	Индуктивное сопротивление прямой последовательности, X_1 , Ом	Активное сопротивление нулевой последовательности, R_0 , Ом	Индуктивное сопротивление нулевой последовательности, X_0 , Ом
1	ТМ-63/10/0,4 Y/Y_n-0	0,21	1,28	4,5	1,8	0,052	0,102	0,504	0,873
2	ТМ-100/10/0,4 Y/Y_n-0	0,27	1,9	4,5	1,6	0,032	0,0645	0,254	0,582
3	ТМ-160/10/0,4 Y/Y_n-0	0,41	2,6	4,5	1,4	0,0163	0,0419	0,151	0,367
4	ТМ-250/10/0,4 Y/Y_n-0	0,47	3,7	4,5	1,2	0,0095	0,0272	0,0965	0,235
5	ТМ-400/10/0,4 Y/Y_n-0	0,72	5,5	4,5	1	0,006	0,017	0,056	0,149
6	ТМ-630/10/0,4 Y/Y_n-0	1	7,6	5,5	0,6	0,003	0,014	0,031	0,096

Приведем расчетные формулы для определения параметров компьютерных моделей. Активное сопротивление первичной и вторичной обмоток трансформатора в относительных единицах определяется по формуле (1) [15]:

$$R_1^{o.e.} = R_2^{o.e.} = \frac{R_T^{o.e.}}{2} = \frac{R_T}{2 \cdot Z_{T.нн}} \text{ (о.е.)}, \quad (1)$$

где R_T – активное сопротивление трансформатора, Ом; $Z_{T.нн}$ – сопротивление трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке, Ом.

Активное сопротивление трансформатора R_T , Ом, определяется по формуле (2) [15]:

$$R_T = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{нн.ном}^2}{S_{T.ном}^2}, \quad (2)$$

где $\Delta P_{кз}$ – потери короткого замыкания (табл. 1), Вт; $U_{нн.ном}$ – номинальное напряжение низшей обмотки трансформатора, 400 В; $S_{T.ном}$ – номинальная мощность силового трансформатора, ВА.

Сопротивление трансформатора, приведенное ко вторичной обмотке $Z_{T.нн}$, Ом, определяется по формуле (3) [15]:

$$Z_{T.нн} = \frac{U_{нн.ном}^2}{S_{T.ном}}. \quad (3)$$

Значения, полученные с использованием формул (2) и (3), позволяют определить необходимый параметр компьютерной модели в соответствии с формулой (1).

Следующим параметром, который задается в компьютерной модели, является индуктивное сопротивление трансформатора в относительных единицах, $X_T^{o.e.}$, о.е., которое определяется по формуле (4) [15]:

$$X_T^{o.e.} = \frac{\sqrt{Z_T^2 - R_T^2}}{Z_{T.нн}} = 0,0425 \text{ (о.е.)}, \quad (4)$$

где Z_T – полное сопротивление трансформатора, Ом, которое рассчитывается по формуле (5) [15]:

$$Z_T = \frac{U_{кз\%}}{100} \cdot \frac{U_{нн.ном}^2}{S_{T.ном}}, \quad (5)$$

где $U_{кз\%}$ – напряжение короткого замыкания, % (табл. 1).

Особенностью компьютерной модели силового трансформатора в программном комплексе MATLAB Simulink является необходимость задания параметров нулевой последовательно-

сти. Рассмотрим методику их определения. Так, ток холостого хода нулевой последовательности I_{0xx} , %, определяется по формуле (6) [15]:

$$I_{0xx\%} = \frac{I_{0xx}}{I_{нн.ном}} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где I_{0xx} – ток холостого хода нулевой последовательности в именованных единицах, А; $I_{нн.ном}$ – номинальный ток обмотки низшего напряжения 0,4 кВ силового трансформатора, А.

Значение тока холостого хода нулевой последовательности I_{0xx} , А, определяется по формуле (7) [15]:

$$I_{0xx} = \frac{U_{нн.ном(\phi)}}{\sqrt{R_0^2 + X_0^2}}, \quad (7)$$

где X_0 – индуктивное сопротивление трансформатора нулевой последовательности (табл. 1), Ом; R_0 – активное сопротивление трансформатора нулевой последовательности (табл. 1), Ом; $U_{нн.ном(\phi)}$ – номинальное фазное напряжение низшей обмотки трансформатора, 230 В.

Номинальный ток обмотки низшего напряжения силового трансформатора определяется по формуле (8) [15]:

$$I_{нн.ном} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_{нн.ном}}. \quad (8)$$

Следующим параметром компьютерной модели являются потери холостого хода нулевой последовательности, P_{0xx} , Вт, обусловленные протеканием тока намагничивания нулевой последовательности, которые определяются по формуле (9) [15]:

$$P_{0xx} = I_{0xx}^2 \cdot R_0. \quad (9)$$

Последним параметром компьютерной модели трансформатора в MATLAB Simulink является индуктивное сопротивление нулевой последовательности в относительных единицах, $X_T^{o.e.}$, о.е., которое рассчитывается по формуле (10) [15]:

$$X_0^{o.e.} = \frac{X_0}{Z_{T.нн}}. \quad (10)$$

Достоверность рассчитанных параметров определим двумя методами. Во-первых, сравним результаты компьютерного моделирования режимов устойчивых коротких замыканий на выводе 0,4 кВ трансформатора (однофазного, двухфазного и трехфазного) с расчетными значениями токов аварийного режима, определен-

ных с использованием ГОСТ 28249-93 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ». Формулы для расчета токов однофазного, двухфазного и трехфазного короткого замыкания для экономии места работы не приводятся. Погрешность между результатом моделирования и расчетным значением $\Delta I_{\text{кз}}^n$, %, определим по формуле:

$$\Delta I_{\text{кз}}^n = \frac{I_{\text{по}}^n - I_{\text{м}}^n}{I_{\text{по}}^n} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $I_{\text{по}}^n$ – ток короткого замыкания, полученный по результатам расчета, А; $I_{\text{м}}^n$ – ток короткого замыкания, полученный по результатам моделирования, А.

Во-вторых, для оценки достоверности определенных параметров компьютерных моделей трансформаторов произведем сравнение потерь холостого хода и короткого замыкания, полученных по результатам моделирования, со значениями, указанными в паспорте заводов-изготовителей.

Разработанная компьютерная модель для обоснования параметров силовых трансформаторов 10/0,4 кВ сельских электрических сетей представлена на рисунке 1. Она содержит: энергосистему 10 кВ (1), трансформатор 10/0,4 кВ (2), контур заземления трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ (3), измерительные блоки (4-8), блок powergui (9).

В качестве значения сопротивления, через которое заземлена нейтраль силового трансформатора 10/0,4 кВ, принято 4 Ом, что регламентируется Правилами устройства электроустановок [11].

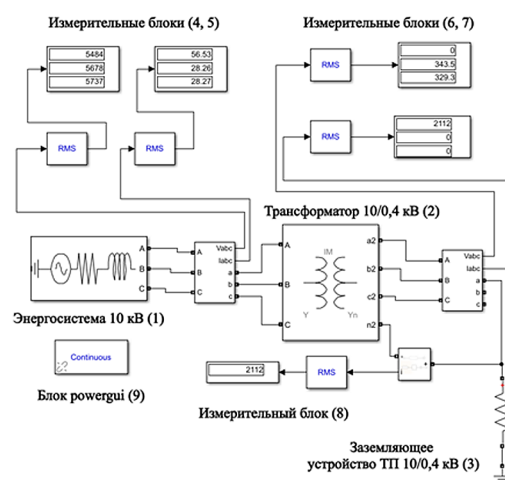


Рисунок 1 – Компьютерная модель трансформатора 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink

Рассмотрим результаты обоснования параметров компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink и результаты оценки их достоверности.

Результаты и обсуждение. С использованием формул (1), (4), (7), (9), (10) были определены параметры компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Исходя из результатов расчета параметров компьютерных моделей силовых трансформаторов, представленных в таблице 2, можно сделать следующие выводы. Так, для рассмотренных типов силовых трансформаторов активное сопротивление обмоток ($R_1 = R_2$, Ом) увеличивается при увеличении номинальной мощности силового трансформатора. Аналогичную зависимость имеют параметры индуктивного сопротивления трансформатора в относитель-

Таблица 2 – Параметры компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink

№ п/п	Тип трансформатора	Активное сопротивление обмоток, $R_1 = R_2$, Ом	Индуктивное сопротивление трансформатора в относительных единицах, $X_{\text{л}}^{\text{о.е.}}$	Ток холостого хода нулевой последовательности в процентах от номинального, $I_{\text{хх}}^{\text{о.е.}}$, %	Потери холостого хода нулевой последовательности, $P_{0\text{хх}}$, Вт	Индуктивное сопротивление нулевой последовательности в относительных единицах, $X_{0\text{о.е.}}$, о.е.
1	ТМ-63/10/0,4 Y/Y _н -0	0,0102	0,0402	251	26238	0,34
2	ТМ-100/10/0,4 Y/Y _н -0	0,0095	0,0408	251	33322	0,36
3	ТМ-160/10/0,4 Y/Y _н -0	0,0081	0,0420	251	50720	0,37
4	ТМ-250/10/0,4 Y/Y _н -0	0,0074	0,0425	251	79099	0,37
5	ТМ-400/10/0,4 Y/Y _н -0	0,0069	0,0428	251	116920	0,37
6	ТМ-630/10/0,4 Y/Y _н -0	0,0061	0,0537	251	161138	0,38

ных единицах ($X_T^{o.e.}$, о.е.) и потерь холостого хода нулевой последовательности (P_{0xx} , Вт). В свою очередь, ток холостого хода нулевой последовательности в процентах от номинального ($I_{xx0\%}$, %) для рассмотренных типов трансформаторов не отличается. А индуктивное сопротивление нулевой последовательности в относительных единицах ($X_0^{o.e.}$, о.е.) увеличивается с увеличением номинальной мощности трансформаторов незначительно.

Был произведен расчет токов на выводах 0,4 кВ исследуемых силовых трансформаторов 10/0,4 кВ с использованием метода симметричных составляющих, согласно ГОСТ 28249-93, а также осуществлено компьютерное моделирование аварийных режимов для схожих изначальных условий. Результаты представлены в таблице 3.

С использованием результатов, представленных в таблице 3, а также формулы (11), было выявлено, что значения тока однофазного короткого замыкания, полученные с использованием двух методов, отличаются не более, чем на 1 %. При этом для токов двухфазного и трехфазного короткого замыкания расхождение не превышает 4 %.

На рисунках 2 и 3 представлены значения потерь холостого хода и короткого замыкания, полученных по результатам моделирования и взятых из технической документации на рассматриваемые трансформаторы. Ввиду того, что в качестве параметров компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в программном комплексе MATLAB Simulink использовались ток холостого хода (I_{xx} , %) и потери холостого хода (P_{xx} , Вт), а другие параметры были вычислены корректно, расхождение полученных значений не превышает 1 %.

В рамках данной работы авторами была предпринята попытка обоснования параметров

компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ со схемой и группой соединения обмоток D/Y_н-11.

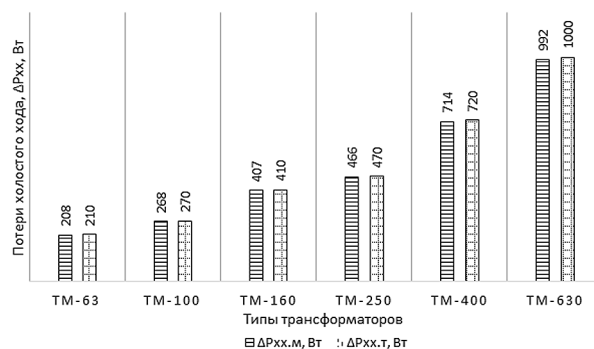


Рисунок 2 – Сравнение потерь холостого хода исследуемых трансформаторов, полученных по результатам моделирования, с табличными

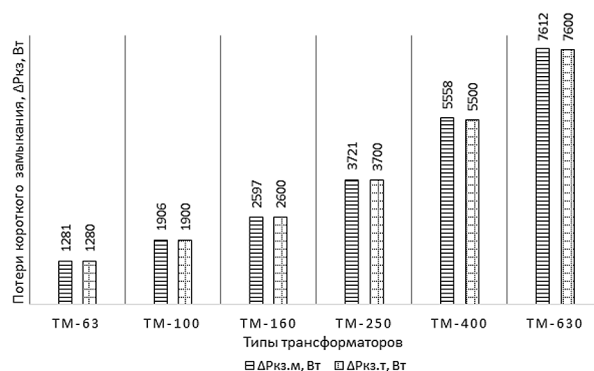


Рисунок 3 – Сравнение потерь короткого замыкания исследуемых трансформаторов, полученных по результатам моделирования, с табличными

Это было обусловлено тем, что в настоящее время, согласно СТО 34.01-3.2-011-2021 ПАО «Россети», рекомендуется при реконструкции и техническом перевооружении использовать трансформаторы со схемами и группами соеди-

Таблица 3 – Результаты расчетов токов короткого замыкания с использованием ГОСТ 28249-93 и полученных по результатам моделирования

№ п/п	Тип трансформатора	Токи короткого замыкания в MATLAB Simulink			Токи короткого замыкания по ГОСТ 28249-93		
		однофазное, $I_{п0}^{(1)}$, А	двухфазное, $I_{п0}^{(2)}$, А	трехфазное, $I_{п0}^{(3)}$, А	однофазное, $I_{п0}^{(1)}$, А	двухфазное, $I_{п0}^{(2)}$, А	трехфазное $I_{п0}^{(3)}$, А
1	ТМ-63/10/0,4 Y/Y _н -0	555	1635	1887	553	1631	1884
2	ТМ-100/10/0,4 Y/Y _н -0	875	2504	2898	871	2488	2873
3	ТМ-160/10/0,4 Y/Y _н -0	1375	3723	4299	1379	3779	4360
4	ТМ-250/10/0,4 Y/Y _н -0	2112	5435	6257	2107	5312	6134
5	ТМ-400/10/0,4 Y/Y _н -0	3252	7692	8838	3261	7423	8571
6	ТМ-630/10/0,4 Y/Y _н -0	4762	8997	10390	4741	8669	10010

нения обмоток D/Y_n-11 и Y/Z_n-11 . Сердечники данных трансформаторов изготавливают из современных электротехнических сталей, характеризующихся низкими потерями холостого хода и короткого замыкания. При этом они также характеризуются большим значением тока однофазного короткого замыкания на стороне 0,4 кВ по сравнению со схемой и группой соединения обмоток «звезда-звезда с нулевым проводом», что позволяет повысить защищенность электрической сети 0,4 кВ. Однако получить достоверные компьютерные модели не удалось. Это связано с тем, что выражение (7) не подходит для определения тока холостого хода нулевой последовательности для трансформаторов со схемой и группой соединения обмоток D/Y_n-11 , а приемлемо к использованию только для трансформаторов со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0 . Это связано с особенностями циркуляции токов нулевой последовательности на стороне 10 кВ. Попыток разработки собственных компьютерных моделей с данной схемой и группой соединения не предпринималось.

Выводы. По результатам обоснования параметров силовых трансформаторов 10/0,4 кВ для компьютерной модели сельской электрической в MATLAB Simulink можно сделать следующие выводы:

1) для трансформаторов конструкции ТМ с номинальными напряжениями 10/0,4 кВ и мощностями от 63 кВА до 630 кВА со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0 были определены параметры активных сопротивлений обмоток, индуктивных сопротивлений в относительных единицах, токов холостого хода нулевой последовательности в процентах от номинального, потерь холостого хода нулевой последовательности и индуктивных сопротивлений нулевой последовательности в относительных единицах, которые необходимы для моделирования режимов их работы в MATLAB Simulink;

2) была произведена оценка достоверности разработанных компьютерных моделей силовых трансформаторов 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink путем сравнения значений токов короткого замыкания на выводе 0,4 кВ, полученных по результатам моделирования аварийных режимов и рассчитанных по методу симметричных составляющих с использованием ГОСТ 28249-93. Разница результатов для токов однофазного короткого замыкания не превышает 1 %, а для двухфазного и трехфазного – 4 %. Дополнительно было произведено сравнение потерь холостого хода и короткого замыкания, полученных при компьютерном

моделировании, с паспортными значениями. Выявлено, что расхождение результатов не превышает 1 %. Данные положения свидетельствуют о высокой достоверности разработанных компьютерных моделей;

3) недостатком программного комплекса MATLAB Simulink является отсутствие возможности моделирования силовых трансформаторов со схемой и группой соединения обмоток «звезда-зигзаг с нулевым проводом и 11 группой» (Y/Z_n-11). Также особенностью MATLAB Simulink является использование параметров нулевой последовательности для моделирования трансформатора, вычисление которых является сложным ввиду отсутствия достаточного количества справочной литературы. Данный фактор не позволил обосновать параметры трансформаторов со схемой и группой соединения обмоток «треугольник-звезда с нулевым проводом и 11 группой» (D/Y_n-11).

Список источников

1. Алтунин Б. Ю., Кралин А. А., Гуляев В. В. Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2012. №32. С. 195-198. EDN: RBQPZF.
2. Бошняга В. А., Суслов В. М. Расчет и исследование установившихся несимметричных режимов трехобмоточного трехфазного силового трансформатора по схеме $Y_n/y_n/d-11$ // Проблемы региональной энергетики. 2018. №3(38). С. 17-27. EDN: YRXYJV.
3. Бошняга В. А., Суслов В. М. Исследование особых режимов трехфазных трехстержневых автотрансформаторов // Проблемы региональной энергетики. 2014. №1(24). С. 41-50. EDN: SGYNYJ.
4. Дед А. В. Расчет параметров Simulink-модели силового трехфазного трансформатора для исследования длительных несимметричных режимов // Омский научный вестник. 2017. №3(153). С. 68-74. EDN: YRXSMF.
5. Евстафьев А. М., Якушев А. Я., Середа А. Г. Имитационная математическая модель тягового трансформатора с секционированными вторичными обмотками // Электротехника. 2016. №5. С. 42-48. EDN: VWHSQZ.
6. Затонский А. В., Долгополов И. С. Моделирование трехобмоточного силового трансформатора в Matlab Simulink // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2022. №4. С. 64-72. DOI 10.17588/2072-2672.2022.4.064-072. EDN: MQHYIG.
7. Климова Т. Г., Смирнов В. С. Моделирование витковых замыканий в обмотках силового трансформатора в программном комплексе Matlab/Simulink // Электроэнергия. Передача и распределение. 2019. №4(55). С. 98-105. EDN: YULXJJ.

8. Кралин А. А., Воротынцев И. В., Гуляев В. В. Исследование параллельной работы трехфазных трансформаторов со схемой соединения обмоток Y/Y 0 при пофазном регулировании // Труды ИГТУ им. П. Е. Алексеева. 2014. №5(107). С. 70-74. EDN: TOEYJJ.

9. Кралин А. А., Охотников М. Н. Моделирование режимов параллельной работы трехфазных распределительных трансформаторов // Инженерный вестник Дона. 2014. №4-1(31). С. 16. EDN: TPMSJV.

10. Лансберг А. А., Виноградов А. В., Виноградова А. В. Структура парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ на примере электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», обслуживающей сельские электрические сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, №5. С. 34-45. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45. EDN: TEJQYQ.

11. Лансберг А. А., Виноградова А. В. Оценка возможности повышения защищенности сельских электрических сетей 0,4 кВ путем установки дополнительных повторных заземлений // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2025. Т. 72. №1(58). С. 24-32. DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-1-24-32. EDN: AXTSXS.

12. Математическая модель однофазного трансформатора И. Н. Автайкин [и др.] // Булатовские чтения. 2023. Т. 2. С. 175-177. EDN: DJFTII.

13. Моделирование несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора в пакете Simulink / А. А. Кралин [и др.] // Труды ИГТУ им. П. Е. Алексеева. 2014. №2(104). С. 166-172. EDN: SIWCDB.

14. Моделирование силового трансформатора с учетом насыщения магнитной системы / В. М. Мишхожев [и др.] // Булатовские чтения. 2024. Т. 2. С. 215-217. EDN: NMMHVF.

15. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB-SIMULINK / Р. Г. Валеев [и др.] // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №9-10. С. 116-128. EDN: RUHUEV.

16. 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. EDN: TQSVSH.

17. Определение параметров силового трансформатора с учетом насыщения магнитной системы для объектно-ориентированных сред моделирования / В. М. Мишхожев [и др.] // Булатовские чтения. 2024. Т. 2. С. 211-214. EDN: CJMYLY.

18. Пустоветов М. Ю. Расширение компьютерной модели трехфазного двухобмоточного трансформатора до возможности моделирования схемы «зигзаг» // Вестник науки Сибири. 2014. №4(14). С. 1-8. EDN: TINHGR.

19. Разработка и исследование динамической модели однофазного трансформатора с сердечником из аморфной стали / А. И. Тихонов [и др.] // Вестник

Ивановского государственного энергетического университета. 2019. №2. С. 43-51. DOI 10.17588/2072-2672.2019.2.043-051. EDN: ORCEAE.

20. Соловьев В. А., Степанов А. В. Компьютерная модель однофазного трансформатора в среде Multisim для лабораторного практикума // Альманах современной науки и образования. 2016. №5(107). С. 73-78. EDN: VZJILP.

21. Трансформаторы ТМ. TRANSFORMATOR-ENERGUM. URL: <https://clck.ru/3PDCEg> (дата обращения 21.05.2025 г.).

22. Улучшенная модель трансформатора с учетом динамического гистерезиса / К. Р. Биткулов [и др.] // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2023. №12. С. 34-38. EDN: OYPBGD.

23. Belov S. I., Tsedyakov A. A. and Galkin M. M. Simulation modeling of a two-winding three-phase voltage transformer in the MATLAB program. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 1045(2022)012072. doi:10.1088/1755-1315/1045/1/012072.

24. Özgönenel O. [et al.]. A novel three phase transformer hysteresis model in MATLABM Simulink. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences: 2012; 20(4): Article 3. <https://doi.org/10.3906/elk-1011-928>.

25. Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings). Docs.Exponenta.ru. URL: <https://docs.exponenta.ru/phymod/sps/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings.html> (дата обращения 19.09.2023 г.).

References

1. Altunin B. Yu., Kralin A. A., Gulyaev V. V. Issledovanie rezhimov raboty nelineynogo trexfaznogo transformatora v pakete Simulink // Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta. 2012. №32. S. 195-198. EDN: RBQPZF.

2. Boshnyaga V. A., Suslov V. M. Raschet i issledovanie ustanovivshixsya nesimmetrichnyx rezhimov trexobmotochnogo trexfaznogo silovogo transformatora po sxeme Yn/yn/d-11 // Problemy regional'noj e'nergetiki. 2018. №3(38). S. 17-27. EDN: YRXYJV.

3. Boshnyaga V. A., Suslov V. M. Issledovanie osobyx rezhimov trexfaznyx trexsterzhnevnyx avtotransformatorov // Problemy regional'noj e'nergetiki. 2014. №1(24). S. 41-50. EDN: SGYNYJ.

4. Ded A. V. Raschet parametrov Simulink-modeli silovogo trexfaznogo transformatora dlya issledovaniya dlitel'nyx nesimmetrichnyx rezhimov // Omskij nauchnyj vestnik. 2017. №3(153). S. 68-74. EDN: YRXSMF.

5. Evstaf'ev A. M., Yakushev A. Ya., Sereda A. G. Imitacionnaya matematicheskaya model' tyagovogo transformatora s sekcionirovanny'mi vtorichny'mi obmotkami // E'lektrotexnika. 2016. №5. S. 42-48. EDN: VWHSQZ.

6. Zatonskij A. V., Dolgoplov I. S. Modelirovanie trexobmotochnogo silovogo transformatora v Matlab Simulink // Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo e'nergeticheskogo universiteta. 2022. №4. S. 64-72. DOI 10.17588/2072-2672.2022.4.064-072. EDN: MQHYIG.

7. Klimova T. G., Smirnov V. S. Modelirovanie vitkovykh zamykanij v obmotkax silovogo transformatora v programmnom komplekse Matlab/Simulink // *E'lektroenergiya. Peredacha i raspredelenie*. 2019. №4(55). S. 98-105. EDN: YULXJJ.
8. Kralin A. A., Vorotyntsev I. V., Gulyaev V. V. Issledovanie parallel'noj raboty trexfaznykh transformatorov so sxemoy soedineniya obmotok Y/Y 0 pri pofaznom regulirovanii // *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*. 2014. №5(107). S. 70-74. EDN: TOEYJJ.
9. Kralin A. A., Oxotnikov M. N. Modelirovanie rezhimov parallel'noj raboty trexfaznykh raspredelitel'nykh transformatorov // *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2014. №4-1(31). S. 16. EDN: TPMSJV.
10. Lansberg A. A., Vinogradov A. V., Vinogradova A. V. Struktura parka silovykh transformatorov s vysshim napryazheniem 6-10 kV na primere elektrosetевой organizatsii filiala PAO «Rosseti Centr»-«Orele'nergo», obsluzhivayushhej sel'skie elektricheskie seti // *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki*. 2021. T. 23, №5. S. 34-45. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45. EDN: TEJQYG.
11. Lansberg A. A., Vinogradova A. V. Ocenka vozmozhnosti povysheniya zashchishchennosti sel'skikh elektricheskikh setej 0,4 kV putem ustanovki dopolnitel'nykh povtornykh zazemlenij // *E'lektrotexnologii i elektrooborudovanie v APK*. 2025. T. 72. №1(58). S. 24-32. DOI 10.22314/2658-4859-2025-72-1-24-32. EDN: AXTSXS.
12. Matematicheskaya model' odnofaznogo transformatora I. N. Avtajkin [i dr.] // *Bulatovskie chteniya*. 2023. T. 2. S. 175-177. EDN: DJFTII.
13. Modelirovanie nesimmetrichnykh rezhimov raboty trexfaznogo transformatora v pakete Simulink / A. A. Kralin [i dr.] // *Trudy NGTU im. R. E. Alekseeva*. 2014. №2(104). S. 166-172. EDN: SIWCDB.
14. Modelirovanie silovogo transformatora s uchetoм nasyshheniya magnitnoj sistemy / V. M. Mishxozhev [i dr.] // *Bulatovskie chteniya*. 2024. T. 2. S. 215-217. EDN: NMMHVF.
15. Modelirovanie elektricheskoy seti napryazheniem 380 V s vozduzhnyimi liniyami v programmnoj srede MATLAB-SIMULINK / R. G. Valeev [i dr.] // *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Problemy energetiki*. 2013. №9-10. S. 116-128. EDN: RUHUEV.
16. Novash I. V., Rumyanec Yu. V. Raschet parametrov modeli trexfaznogo transformatora iz biblioteki MatLab-Simulink s uchetoм nasyshheniya magnitoproveda // *E'nergetika. Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij i energeticheskix ob'edinenij SNG*. 2015. №1. S. 12-24. EDN: TQSVSH.
17. Opredelenie parametrov silovogo transformatora s uchetoм nasyshheniya magnitnoj sistemy dlya ob'ektno-orientirovannykh sred modelirovaniya / V. M. Mishxozhev [i dr.] // *Bulatovskie chteniya*. 2024. T. 2. S. 211-214. EDN: CJMYLY.
18. Pustovetov M. Yu. Rasshirenie komp'yuternoj modeli trexfaznogo dvuxobmotochnogo transformatora do vozmozhnosti modelirovaniya sxemy «zigzag» // *Vestnik nauki Sibiri*. 2014. №4(14). S. 1-8. EDN: TIHHGR.
19. Razrabotka i issledovanie dinamicheskoy modeli odnofaznogo transformatora s serdechnikom iz amorfnoj stali / A. I. Tixonov [i dr.] // *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019. №2. S. 43-51. DOI 10.17588/2072-2672.2019.2.043-051. EDN: ORCEAE.
20. Solov'ev V. A., Stepanov A. V. Komp'yuternaya model' odnofaznogo transformatora v srede Multisim dlya laboratornogo praktikuma // *Al'manax sovremennoj nauki i obrazovaniya*. 2016. №5(107). S. 73-78. EDN: VZJILP.
21. Transformatory TM. TRANSFORMATOR-ENERGUM. URL: <https://clck.ru/3PDCEg> (data obrashheniya 21.05.2025 g.).
22. Uluchshennaya model' transformatora s uchetoм dinamicheskogo gisterezisa / K. R. Bitkulov [i dr.] // *E'lektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*. 2023. №12. S. 34-38. EDN: OYPBGD.
23. Belov S. I., Tsedyakov A. A. and Galkin M. M. Simulation modeling of a two-winding three-phase voltage transformer in the MATLAB program. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 1045(2022)012072. doi:10.1088/1755-1315/1045/1/012072.
24. Özgönenel O. [et al.]. A novel three phase transformer hysteresis model in MATLABM Simulink. Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences: 2012; 20(4): Article 3. <https://doi.org/10.3906/elk-1011-928>.
25. Three-Phase Transformer Inductance Matrix Type (Two Windings). Docs.Exponenta.ru. URL: <https://docs.exponenta.ru/phymod/sps/powersys/ref/threephasetransformerinductancematrixtypetwowindings.html>. (data obrashheniya 19.09.2023 g.).

Сведения об авторах:

А. А. Лансберг, аспирант, младший научный сотрудник,
<https://orcid.org/0000-0002-2834-6092>
ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»,
109428, Россия, Москва, 1-й Институтский проезд, 5
lansbergaa@vk.com

Original article

PARAMETERS OF 10/0.4 KV POWER TRANSFORMERS FOR A COMPUTER MODEL OF RURAL ELECTRICAL NETWORK IN MATLAB SIMULINK

Alexander A. Lansberg

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

lansbergaa@vk.com

Abstract. Computer simulation is one of the most reliable ways to study the load and emergency modes of operation of transformers. The most functional modeling tool is the MATLAB Simulink software package. Most works do not provide information on the justification of the electrical parameters of computer models of 10/0.4 kV power transformers and the assessment of their reliability. The purpose of the study is to substantiate the parameters of computer models of 10/0.4 kV power transformers in MATLAB Simulink and evaluate their reliability. The electrical parameters for the most commonly used 10/0.4 kV power transformers of rural electric networks were determined using literary sources. These are transformers of the ONAN design with rated voltages of 10/0.4 kV and power from 63 kVA to 630 kVA with a circuit and a winding connection group Y/Yn-0. The reliability of the calculated parameters was assessed by comparing the no-load and short-circuit losses obtained from the simulation results with the tabular ones, as well as by modeling the modes of stable short circuits at the output of the 0.4 kV transformer and comparing the values of the emergency mode currents with those calculated using the symmetric component method. It has been found that in computer simulation of emergency modes at the output of a 0.4 kV transformer, the values of the single-phase short circuit current calculated by the method of symmetrical components differ by no more than 1 % compared with the simulation results, and for two-phase and three-phase short circuits – by no more than 4 %. At the same time, the no-load and short-circuit losses obtained during the simulation differ from the reference values by no more than 1 %. The results of the study indicate that the calculated parameters of 10/0.4 kV power transformers can be used to simulate their operating modes in the MATLAB Simulink software package.

Key words: computer simulation, computer model of a power transformer, short circuit, no-load losses, short-circuit losses.

For citation: Lansberg A. A. Parameters of 10/0.4 kV power transformers for a computer model of rural electrical network in MATLAB Simulink. *The Bulletin of Izhevsk State Agricultural Academy*. 2025; 3 (83): 156-165. (In Russ.). https://doi.org/10.48012/1817-5457_2025_3_156-165.

Author:

A. A. Lansberg, Postgraduate student, Junior Researcher,<https://orcid.org/0000-0002-2834-6092>

Federal Scientific Agroengineering Center VIM,

5 Perviy Institutskiy proezd St., Moscow, Russia, 109428

lansbergaa@vk.com

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests: the author declares that there is no conflict of interests.

Статья поступила в редакцию 30.05.2025; одобрена после рецензирования 06.06.2025;

принята к публикации 04.09.2025.

The article was submitted 30.05.2025; approved after reviewing 06.06.2025; accepted for publication 04.09.2025.