

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.02

УДК 621.316.351

У.Н. Абашева, В.Э. Фризен, С.Л. Назаров

Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЯ НА ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ЗАКРЫТОГО ТРЕХФАЗНОГО ШИНОПРОВОДА 10 кВ В РЕЖИМЕ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Чтобы избежать затрат на повторные дорогостоящие квалификационные испытания, снизить материалоемкость шинпровода, целесообразно еще на этапе проектирования провести численное моделирование термических и электродинамических процессов в шинпроводе при аварийных режимах работы [1, 2]. К тому же при численном моделировании точность определения электрических параметров повышается в 2–2,5 раза по сравнению с традиционными (аналитическими) методами расчета [3]. **Цель исследования** заключалась в обзоре опубликованных статей по нагреву шинпроводов до 10 кВ в режиме короткого замыкания (КЗ), разработке модели системы «силовой трансформатор – шинпровод – нагрузка» при трехфазном коротком замыкании (ЗКЗ), проведении сравнительного анализа полученных результатов моделирования с экспериментальными данными. **Методы:** использовался метод численного моделирования в режиме ЗКЗ, реализованный с помощью связанных нестационарных задач магнитного поля и теплопередачи. В нестационарной задаче магнитного поля был смоделирован скачок ударного тока и рассчитаны мощности тепловыделения в шинах в каждый момент времени. Полученные в программе распределения по элементам конструкции шинпровода удельной объемной мощности тепловыделения были переданы в качестве исходных данных в задачу нестационарной теплопередачи. Результаты: смоделирована система «силовой трансформатор 10 кВ – шинпровод – нагрузка», соответствующая участку реальной подстанции, в которой может использоваться шинпровод. Данные моделирования имеют хорошую сходимость с данными эксперимента, погрешность в максимальных температурах нагрева составила 3 %. **Практическая значимость** заключается в том, что, используя разработанную модель, можно определить реальные значения токов на рассматриваемом участке подстанции, реальные температуры нагрева. Соответственно, можно выбрать необходимые и достаточные сечения шин шинпровода, расстояния между опорными изоляторами без излишних запасов. Также с помощью разработанной модели можно обосновать необходимость предложений по модернизации.

Ключевые слова: закрытый трехфазный шинпровод, трехфазное короткое замыкание, моделирование нагрева, термическая стойкость, испытание на термическую стойкость.

U.N. Abasheva, V.E. Frizen, S.L. Nazarov

Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

NUMERICAL SIMULATION OF THE HEAT RESISTANCE TEST OF A CLOSED THREE-PHASE 10 kV BUS DUCT IN THE THREE-PHASE SHORT CIRCUIT SITUATION

In order to avoid the costs of repeated expensive qualification tests, to reduce the material consumption of the bus duct, it is advisable to perform numerical modeling of thermal and electrodynamic processes in the bus duct during emergency state at the design stage [1, 2]. In addition, with numerical modeling, the accuracy of determining electrical parameters increases 2-2.5 times compared to traditional (analytical) calculation methods [3]. **The purpose of the study** was to review published articles on heating bus ducts up to 10 kV in short circuit situation, to develop a model of a power transformer – bus duct – load system with a three-phase short circuit (three phase S/C), to conduct a comparative analysis of the simulation results obtained with experimental data. **Methods:** the authors used the method of numerical simulation in the three phase S/C situation, implemented with the help of related non-stationary problems of the magnetic field and heat transfer. Non-stationary magnetic field problem simulated a short circuit jump and calculated the heat dissipation capacities in the buses at each moment of time. The specific volumetric heat dissipation power obtained in the program for the bus duct was as initial data to the problem of non-stationary heat transfer. **Results:** the result of the work is a simulated 10 kV power transformer system – bus duct – load corresponding to the section of a real substation with bus duct. The simulation data have a good convergence with the experimental data, the error in maximum heating temperatures was 3 %. **The practical significance** is with using the developed model it is possible to determine the real values of currents at the considered section of the substation, real heating temperatures. Accordingly, it is possible to choose the necessary and sufficient cross-sections of the bus duct, the distance between the base insulators, without excessive stocks. Also, with the help of the developed model, it is possible to justify the need for modernization proposals.

Keywords: closed three-phase bus duct, three-phase short circuit situation, heating simulation, thermal resistance, thermal resistance test.

Введение

Аналитические методы расчета ударного тока при трехфазном коротком замыкании (КЗ) [4, 5] имеют ряд недостатков:

– применимы только для стандартных форм сечения шинпровода (прямоугольное, круглое, квадратное сечения);

– невысокий процент сходимости расчетных и экспериментальных данных, что порой приводит к выбору токоведущей шины большего сечения, использованию большего количества опорных изоляторов в шинпроводе [3], чем это требуется по механической прочности при воздействии ударных нагрузок.

Чтобы избежать чрезмерного перезакладывания материалов, визуализировать и автоматизировать расчет по термостойкости шинпровода в режиме трехфазного КЗ (именно этот вид КЗ является рас-

четным при проверке жестких проводников на термостойкость [6]), исследовать шинпроводы с нестандартной формой сечения шин предлагаем использовать моделирование в программном продукте, в основе которого лежит использование численных способов расчета электромагнитных и тепловых задач МКЭ.

Сегодня в открытом доступе можно найти статьи, где в разных программных комплексах (ANSYS, Pro-ENGINEER, COMSOL) моделируются шинпроводы до 10 кВ и в номинальном режиме, и в режиме короткого замыкания (однофазное, двухфазное, трехфазное) [1–3, 7–10, 21–25]. Данный обзор относится не только к распределительным устройствам подстанций, но и к высокомоощным электротехнологическим установкам [21–25]. Результаты моделирования сравниваются как с аналитическими методами расчета, так и с опытными данными. При этом во всех вышеперечисленных статьях анализируется шина прямоугольного сечения. Например, в работах [1, 2] авторы моделируют электродинамические силы между шинами и деформацию шин при разных видах КЗ, перегрев шин в номинальном режиме и при КЗ в шинпроводе до 1 кВ комплектного распределительного устройства (КРУ). В планах авторов использовать предложенную методику моделирования в серийном производстве КРУ и при дальнейшей модернизации. В работе [7] рассмотрено влияние расположения шин прямоугольного сечения (вертикально или «плашмя»), количества шин в пакете на величину электродинамических сил, перегрева; определено оптимальное расположение шин при КЗ в программном пакете COMSOL.

Из вышепредставленного обзора видно, что тема моделирования испытаний (нагрев в номинальном режиме, электродинамика, термостойкость) актуальна.

1. Моделирование трехфазного короткого замыкания

Для моделирования трехфазного КЗ был использован программный пакет Elcut Professional 6.3, где были созданы 2 взаимосвязанные задачи – плоскопараллельная нестационарная задача магнитного поля переменных токов и нестационарная задача теплопередачи. Связь между задачами задавалась вручную: мощности тепловыделения в каждый момент времени, рассчитанные в задаче нестационарного магнитного поля, были пересчитаны в объемные плотности тепловыделения и переданы в качестве исходных данных в задачу нестационарного магнитного

поля. Для учета переменной электропроводности алюминия при нагреве моделирование трехфазного КЗ было проведено в 3 этапа:

1. Взаимосвязанный расчет задач электромагнитного поля и теплопередачи при постоянной электропроводности алюминия, при установившейся температуре нагрева шин в номинальном режиме. На этом этапе были определены конечные температуры нагрева шин при трехфазном КЗ при постоянной электропроводности алюминия.

2. Взаимосвязанный расчет задач электромагнитного поля и теплопередачи с учетом зависимости электропроводности алюминия от температуры нагрева шины. Также для каждой токоведущей шины была задана линейная зависимость температуры нагрева от времени моделирования. Начальная температура каждой шины равнялась установившейся температуре нагрева в номинальном режиме, а значение конечной температуры было взято из результатов расчета задачи теплопередачи предыдущего этапа расчета. На этом этапе уточнены конечные температуры нагрева шин при трехфазном КЗ при переменной электропроводности алюминия.

3. Взаимосвязанный расчет задач электромагнитного поля и теплопередачи с учетом зависимости электропроводности алюминия от температуры нагрева шины; с уточненными конечными температурами нагрева шин из предыдущего этапа расчета. При сравнении разница конечных температур нагрева шин во втором и третьем этапах равнялась менее $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, поэтому третий этап моделирования был последним.

Схема замещения трехфазного короткого замыкания системы «силовой трансформатор – шинопровод 10 кВ – нагрузка» приведена на (рис. 1).

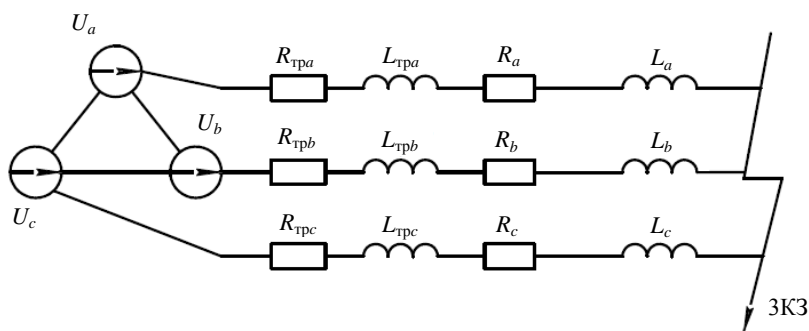


Рис. 1. Схема замещения трехфазного короткого замыкания в системе «силовой трансформатор – шинопровод 10 кВ – нагрузка»

Расшифровка обозначений на рис. 1: U_a, U_b, U_c – напряжения вторичных обмоток силового трансформатора; $R_{тра}, R_{трb}, R_{трc}$ – активные сопротивления вторичных обмоток трансформатора; $L_{тра}, L_{трb}, L_{трc}$ – индуктивности вторичных обмоток трансформатора фаз А, В, С; R_a, R_b, R_c – активные сопротивления шинпровода фаз А, В, С; L_a, L_b, L_c – индуктивности шинпровода фаз А, В, С; $R_{нагр a}, R_{нагр b}, R_{нагр c}$ – сопротивление нагрузки приемника на фазах А, В, С.

В модели участка использован силовой масляный трансформатор ТДН-40000/110 УХЛ1. Основные данные трансформатора перечислены в табл. 1 [11].

Таблица 1

Основные данные трансформатора ТДН-40000/110 УХЛ1

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
Мощность трансформатора	S , кВт	40000
Напряжение вторичной обмотки	U_2 , кВ	6,6
Потери КЗ	P_k , кВт	170
Потери ХХ	P_0 , кВт	34
Напряжение КЗ	U_k , %	10,5
Линейный ток вторичной обмотки	$I_{л2}$, А	3499

Использование в схеме моделирования силового трансформатора приближает моделирование к реальным условиям эксплуатации, поскольку в большинстве подстанций шинпровод будет установлен между силовым трансформатором 110/10 кВ и ячейкой КРУ 10 кВ. При этом в испытании на термостойкость шинпровод подключался с одной стороны к силовому трехфазному трансформатору, с другой стороны шинпровод был закорочен. Несмотря на то, что схема подключения при испытании была отлична от схемы подключения во время моделирования, выполнялось условие соответствия диаграмм тока во время КЗ при испытании и моделировании, пиковые значения тока также совпали. Ниже будут приведены для сравнения осциллограммы тока при моделировании КЗ и при испытании на термостойкость.

Модель с трансформатором ТДН-40000/110 универсальна, она может быть использована и для моделирования испытания на термостойкость, и для моделирования нагрева при трехфазном КЗ шинпровода на каком-то реальном участке подстанции.

Для определения ударного тока была смоделирована задача нестационарного магнитного поля на временном промежутке от 0 до 3 с (соответствует длительности проведения испытания). В соответствии с [6]: «При проверке на термическую стойкость токопровода определяют расчетную продолжительность КЗ путем сложения времен действия основной защиты или резервной защиты и полного времени отключения выключателя». У большинства производителей выключателей 110 кВ (ЗЭТО, Siemens, АBB, УЭТМ) полное время отключения аппарата не более 80 мс. Согласно [12]: «В распределительных сетях 6–10 кВ КЗ можно отключать со временем 1,5–3 с». Выбранная продолжительность испытания соответствует вышеперечисленным нормативам. Исходные данные для задачи нестационарного магнитного поля приведены в табл. 2, для задачи нестационарной теплопередачи – в табл. 3. Момент времени возникновения КЗ – 0,1 с.

Таблица 2

Исходные данные для задач нестационарного магнитного поля

Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
Относительная магнитная проницаемость воздуха [13]	μ_v	1
Относительная магнитная проницаемость алюминия [13]	μ_{Al}	1
Фаза шины <i>A</i>	φ_A , град	0
Фаза шины <i>B</i>	φ_B , град	120
Фаза шины <i>C</i>	φ_C , град	240
Длина шинопровода	<i>L</i> , м	3
Частота	<i>f</i> , Гц	50
Установившаяся температура нагрева токоведущих шин при номинальном режиме	T_0 , °С	64
Удельная электропроводность алюминия [14]	<i>g</i> , см/м	28,57 · 10 ⁶ (при $T=20$ °С) 24,29 · 10 ⁶ (при $T=64$ °С) 18,86 · 10 ⁶ (при $T=150$ °С)

В основе решения задачи нестационарного магнитного поля лежит уравнение, учитывающее поверхностный эффект [15]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - g(T) \frac{\partial A}{\partial t} = -j_{\text{стор}}, \quad (1)$$

где μ – магнитная проницаемость, Гн/м; $j_{\text{стор}}$ – плотность сторонней составляющей тока, А/м²; A – векторный магнитный потенциал, Вб/м; $g(T)$ – удельная электропроводность, См/м.

Таблица 3

Теплофизические параметры алюминия

Температура, °С	Наименование характеристики		
	Теплопроводность, Вт/К·м	Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	Плотность, кг/м ²
20	192	895	2710
100		920	
200		964	

Начальные условия задачи (в соответствии с уравнением (1)) – решение происходит с нулевого момента времени. Начальное поле предполагается нулевым (нулевые начальные условия). Расчетная область задачи магнитного поля – области поперечных сечений токоведущих шин и воздушная область вокруг шин, которая по факту ограничена металлическим кожухом шинпровода. Воздушная область вокруг шин представляет собой трапециевидальную форму, ширина 940 мм (координата x в задаче изменяется от 0 до 940), высота 345 мм (координата y в задаче изменяется от 0 до 345).

В нестационарной задаче магнитного поля переменных токов граничным условием было задание нулевого магнитного потенциала контура кожуха шинпровода.

Поперечное сечение шинпровода представлено на рис. 2.

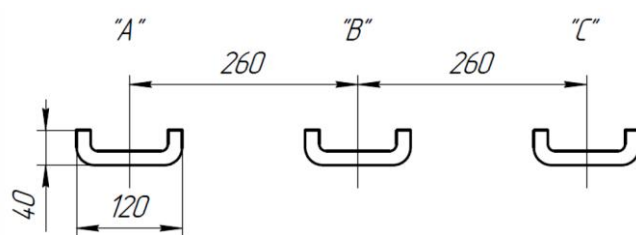


Рис. 2. Сечение шинпровода

При решении нестационарной задачи теплопередачи используется уравнение теплопроводности [15]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q - c(T) \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (2)$$

где T – температура, К; t – время, с; λ – теплопроводность, Вт/К·м; q – объемная плотность мощности тепловыделения, Вт/м³; $C(T)$ – удельная теплоемкость, Дж/кг·К; ρ – плотность, кг/м³.

Параметры, зависящие от времени (электропроводность, теплоемкость), задаются таблично, при помощи окна работы с кривыми. Ниже в табл. 3 приведены теплофизические параметры сплава алюминия АД31.Т [26] (материал, из которого изготовлены токоведущие шины).

Начальные условия задачи (в соответствии с уравнением (2)) – начальные температуры блоков модели в нулевой момент времени (температура соответствует установившейся при номинальном режиме, указанная температура взята из протокола испытаний [19]), объемные плотности мощности тепловыделения для каждой шины. Для задачи теплопередачи задано граничное условие заданного теплового потока на границах токоведущих шин (граничное условие 2-го рода). Тепловой поток на границах шин указан нулевым, т.е. теплообмен между поверхностями шин и окружающей средой отсутствует. При коротком замыкании режим нагрева адиабатный, так как материал за столь короткое время успевает отдать в окружающую среду лишь незначительное количество теплоты, которым в расчетах можно пренебречь [27].

Принятые допущения при записи формул (1) и (2): свойства сред остаются постоянными вдоль трех взаимно перпендикулярных направлений (используются ортотропные материалы). В магнитной задаче предполагается, что нет смещения тока (емкостного).

Нестационарные задачи переменного магнитного поля и теплопередачи связаны между собой через объемную плотность тепловыделения. Программного способа связать эти задачи в используемой версии ПО нет, поэтому эта связь задавалась вручную. Для задания объемной плотности тепловыделения в качестве исходных данных в нестационарной задаче теплопередачи была определена усредненная мощность тепловыделения за весь период моделирования по формуле ниже:

$$P_{\text{ср}} = \frac{\int_0^t P dt}{t}, \quad (4)$$

где P – мгновенная мощность тепловыделения шины в заданный момент времени (значение было рассчитано в задаче переменного магнитного поля), Вт; t – время моделирования, $t = 3$ с.

Формула для определения объемной плотности мощности тепловыделения (исходные данные для нестационарной задачи теплопередачи):

$$Q = \frac{P_{\text{ср}}}{V}, \quad (5)$$

где V – объем рассматриваемой шины при моделировании, м^3 .

Полученные значения объемной плотности мощности тепловыделения за период моделирования приведены в табл. 4. Приведенные в табл. 4 значения являются среднеквадратичными за период моделирования.

Таблица 4

Объемные плотности мощностей тепловыделения, тепловые потоки за период КЗ в токоведущих шинах

Фаза шины	Объемная плотность тепловыделения, МВт/м^3
Шина A	66,13
Шина B	63,90
Шина C	59,94

Результат моделирования (график изменения тока на шинах при трехфазном коротком замыкании) и осциллограммы изменения токов во время эксперимента приведены на рис. 3.

Максимальное значение тока (ударный ток) составляет 102 кА. Пиковые значения, установившееся значение тока, период колебаний совпадают, поэтому можно говорить о равнозначности условий моделирования и проведения опыта.

По [15, п. 1.4.16] для алюминиевых шин максимальная температура нагрева при КЗ 200 °С. Полученное значение температуры нагрева шины A 143,4 °С при условии номинального нагрева шины в 64 °С (рис. 4) удовлетворяет условию проверки на термостойкость. На графике (см. рис. 4) также приведены температуры нагрева шины A во время эксперимента для сравнения (измерение проводилось в середине участка шинпровода).

Если бы при моделировании не учитывалась переменная электропроводность алюминия в зависимости от температуры, то температура нагрева шины A была бы 134 °С, тогда погрешность между значениями максимально смоделированной и экспериментально полученной температуры нагрева шины была бы больше. Детально разница в погрешности при учете или без учета переменной электропроводности показана в подразделе 3 настоящей статьи.

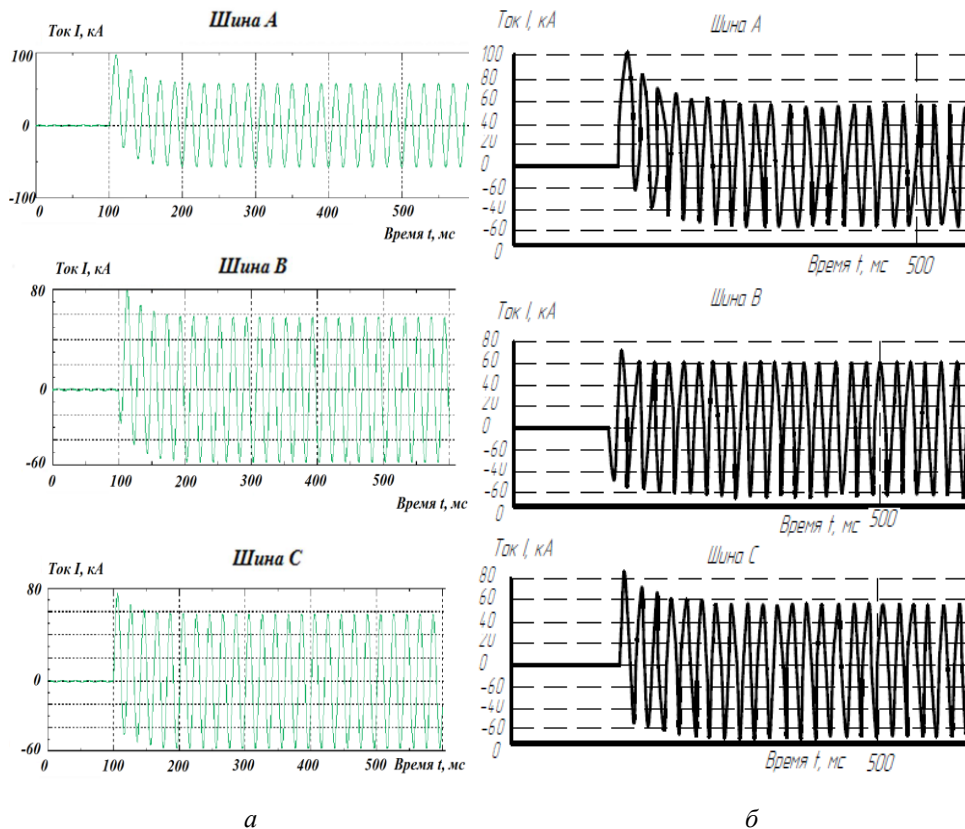


Рис. 3. График изменения тока при трехфазном КЗ при моделировании (а), во время эксперимента (б)

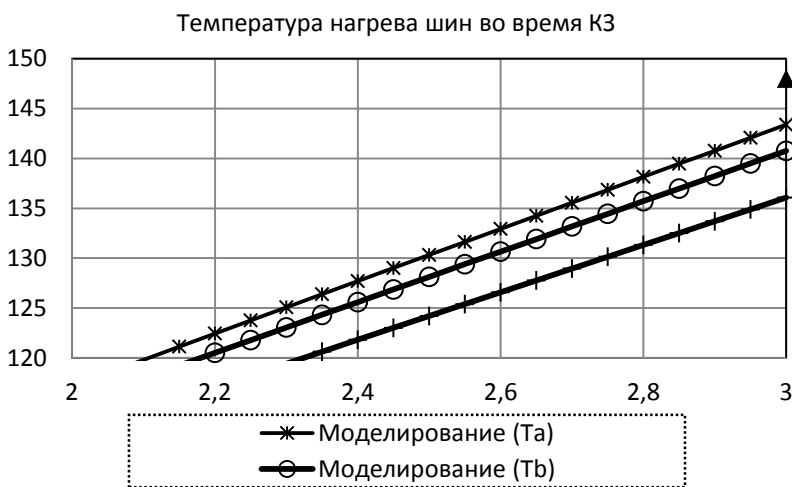


Рис. 4. Результат расчета нестационарной задачи теплопередачи

2. Описание эксперимента на термическую и ударную стойкость шинпровода

Методика проведения испытания на стойкость к термическому воздействию токов короткого замыкания описана в ГОСТ 14694 [17].

Шинпровод считается выдержавшим испытание на стойкость к термическому действию токов КЗ, если температура нагрева шин не превысила 200 °С для алюминиевых шин с учетом максимальной температуры окружающего воздуха 40 °С, принятой согласно ГОСТ 8024 [18].

Основные характеристики испытываемого шинпровода перечислены ниже в табл. 5.

Таблица 5

Основные характеристики объекта испытаний в опыте на электродинамическую и термическую стойкость к КЗ

Наименование характеристики	Значение
Ток термической стойкости, кА	40
Ток электродинамической стойкости, кА	102
Время протекания тока термической стойкости, с	3,0
Токоведущая шина (материал)	Алюминий

Режим испытаний – трехфазный, переменный ток частотой 50 Гц. Токоподвод к шинпроводу осуществлялся медными шинами. С одной стороны шинпровод был подключен к трансформатору установки больших токов УБТ-800, напряжение на вторичных обмотках которого было не более 440 В. С другой стороны шинпровод был закорочен. Закоротки фаз были выполнены также медными шинами. На рис. 5 показана схема расположения термопар ТХК при испытании на термостойкость.

После испытания был произведен внешний осмотр шинпровода. Расстояния между токоведущими шинами и оболочкой практически не изменились, повреждения изоляторов не наблюдалось.

Температура нагрева токоведущих шин шинпровода с учетом температуры нагрева номинальным током в продолжительном режиме (64 °С) равнялась 148 °С, что не превышает допустимого значения при КЗ, равного 200 °С [16].

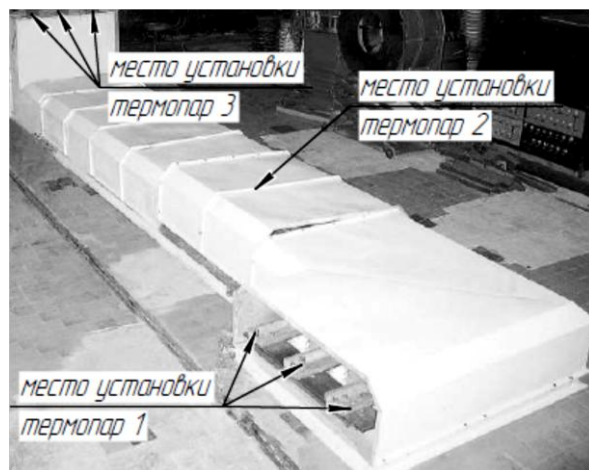


Рис. 5. Схема расположения термопар на испытуемом образце

3. Сравнение опытных и смоделированных данных

И смоделированные, и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что рассматриваемый шинопровод соответствует требованиям в части термостойкости к токам короткого замыкания. Погрешность максимальной температуры нагрева токоведущих шин (смоделированной и полученной экспериментально [19]) менее 5 % (см. табл. 6), что свидетельствует об удовлетворительной сходимости данных.

Таблица 6

Сравнение смоделированной и полученной экспериментально максимальной температуры нагрева токоведущих шин во время трехфазного КЗ

Наименование параметра	Значение
Смоделированная максимальная температура нагрева (с учетом переменной электропроводности алюминия от температуры), °С	143,4
Смоделированная максимальная температура нагрева (без учета переменной электропроводности алюминия от температуры), °С	134
Максимальная температура, измеренная во время опыта на стойкость токам к КЗ, °С	148
Перегрев во время КЗ при моделировании (с учетом/без учета переменной электропроводности), °С	79,4/70
Перегрев во время КЗ в опыте, °С	84
Погрешность (с учетом/без учета переменной электропроводности), %	3/9,5

Заключение

В статье приведены результаты моделирования в ПО Elcut трехфазного короткого замыкания в системе «силовой трансформатор – шинопровод – нагрузка», режим нагрева токоведущих шин в трехсекундный период протекания тока трехфазного симметричного короткого замыкания. Использование моделирования позволяет достаточно точно спрогнозировать результаты испытаний шинпровода на термическую стойкость. Разница между смоделированной температурой нагрева во время КЗ и полученной во время эксперимента составляет 3 %.

Аналогичное моделирование предполагается использовать при модернизации рассматриваемого конструктива шинпровода на более высокие токи (например, в генераторных подстанциях). Разработанную модель можно использовать не только для моделирования испытания на термостойкость, но и для определения температур нагрева шин во время КЗ на реальном участке подстанции.

Библиографический список

1. Szulborski M., Kolimas L., Lapczynski S. Thermal Analysis of Heat Distribution in Busbars during Rated Current Flow in Low-Voltage Industrial Swetchgear // *Energies*. – 2021. – № 14. – URL: <https://doi.org/10.3390/en14092427>
2. Calculations of Electrodinamic Forces in Three-Phase Asymmetric Busbar System with the Use of FEM / M. Szulborski, L. Kolimas, S. Lapczynski, L. Kozarek // *Energies*. – 2020. – № 13. – URL: <https://doi.org/10.3390/en13205477>
3. Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Килимник И.М. Идентификация электрических параметров шихтованных шинных пакетов мощных коротких сетей // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2012. – № 2. – С. 55–61.
4. Беляева Е.Н. Как рассчитать ток короткого замыкания. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
5. ГОСТ Р 52736–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания [Электронный ресурс]. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200052839> (дата обращения: 05.12.2021).

6. РД 153-34.0-20.527–98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4294817/4294817179.pdf> (дата обращения: 05.12.2021).

7. Multiphysics Analysis of Busbars with Various Arrangements Under Short-Circuit Condition / G. Kadkhodaei, M. Hamzeh, K. Sheshyekani, S.D. Tavakoli // IET Electrical Systems in Transportation. – 2016. – № 6. – P. 237–245.

8. Plesca A. Thermal Analysis of Busbars from a High Current Power Supply System [Электронный ресурс] // Energies. – 2019. – № 12. – URL: <https://doi.org/10.3390/en12122288> (дата обращения: 05.12.2021).

9. Термостойкость открытого шинопровода: типовой пример Elcut [Электронный ресурс]. – URL: https://elcut.ru/advanced/busbars_shortage_r.htm (дата обращения: 05.12.2021).

10. Kusiak D., Szczegielniak T., Piątek Z. Magnetic field asymmetry at external phases of shielded single-pole three-phase flat high-current busduct [Электронный ресурс] // ITM Web Conf. – 2019. – Vol. 28. – URL: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192801007> (дата обращения: 05.12.2021).

11. ГОСТ 12965–85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110 и 150 кВ [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012412> (дата обращения: 05.12.2021).

12. Федоров В.А. Библия релейной защиты и автоматики. – Новосибирск: Изд-во Новосибир. ин-та повышения квалификации, 2004. – 278 с.

13. Магнитная проницаемость основных материалов, таблица [Электронный ресурс]. – URL: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnethism/MagneticPermeability/MagneticPermeabilityGeneralTable/> (дата обращения: 05.12.2021).

14. СТО 56947007-29.060.10.006–2008. Методические указания по расчету и испытаниям жесткой ошиновки ОРУ и ЗРУ 110–500 кВ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.060.10.006-2008.pdf> (дата обращения: 05.12.2021).

15. Руководство пользователя Elcut [Электронный ресурс]. – URL: http://elcut.ru/free_doc_r.htm (дата обращения: 05.12.2021).

16. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ «ЭНАС», 1999–2005. – 692 с.

17. ГОСТ 14694–76. Устройства комплектные распределительные в металлической оболочке на напряжение до 10 кВ методы испытаний [Электронный ресурс]. – URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294837/4294837022.htm> (дата обращения: 19.12.2021).

18. ГОСТ 8024–90. Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Нормы нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний [Электронный ресурс]. – URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294821/4294821800.pdf> (дата обращения: 19.12.2021).

19. Протокол испытаний № 017-189-2007 от 31.10.2007 / филиал ОАО «НТЦ электроэнергетики», НИЦ ВВА. – 9 с.

20. Преобразователи числа фаз в электротехнологии: учебное пособие / С.Л. Назаров, В.Н. Удинцев, С.А. Бычков [и др.]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 196 с.

21. Cundeva S., Digalovski M. Calculation of electric arc furnace secondary circuit – Analytical and numerical approach [Электронный ресурс] // *Przeglad Elektrotechniczny*. – 2016. – Vol. 1. – URL: <https://doi.org/10.15199/48.2016.12.06> (дата обращения: 19.12.2021).

22. Cundeva S., Digalovski M. Electric Arc Furnace Transformer Secondary Circuit Calculations [Электронный ресурс] // *Serbian Journal of electrical engineering*. – 2019. – Vol. 16. – URL: <https://doi.org/10.2298/SJEE1902181C> (дата обращения: 19.12.2021).

23. Определение параметров короткой сети дуговых сталеплавильных печей / Н.В. Евсеева, С.Л. Баранов, А.С. Лоскутов, А.Р. Ахметов // *Сталь*. – 2018. – № 10. – С. 22–25.

24. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи графитации // *Вестник СевНТУ*. – 2014. – Вып. 147. – С. 131–136.

25. Ярымбаш Д.С., Килимник И.М., Ярымбаш С.Т. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2014. – № 2. – С. 65–70.

26. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): справочник / сост. В.М. Белецкий, Г.А. Кривов; под общ. ред. акад. РАН И.Н. Фридляндера. – Киев: ЗАО «Коминтех», 2005. – 365 с.

27. Червенчук В.Д., Иванов А.Л. Электрические аппараты. Тепловые процессы в электрических аппаратах [Электронный ресурс]. – URL: <http://bek.sibadi.org/fulltext/esd236.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).

References

1. Szulborski M., Kolimas L., Lapczynski S. Thermal Analysis of Heat Distribution in Busbars during Rated Current Flow in Low-Voltage Industrial Swtchgear. *Energies*, 2021, no. 14, available at: <https://doi.org/10.3390/en14092427>

2. Szulborski M., Kolimas L., Lapczynski S., Kozarek L. Calculations of Electrodynamic Forces in Three-Phase Asymmetric Busbar System with the Use of FEM. *Energies*, 2020, no. 13, available at: <https://doi.org/10.3390/en13205477>

3. Iarymbash D.S., Iarymbash S.T., Kilimnik I.M. Identifikatsiia elektricheskikh parametrov shikhtovannykh shinnykh paketov moshchnykh korotkikh setei [Identification of electrical parameters of powerful short-circuit laminated packs]. *Elektrotehnika i elektroenergetika*, 2012, no. 2, pp. 55-61.

4. Beliaeva E.N. Kak rasschitat' tok korotkogo zamykaniia [How to calculate the short circuit current]. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 136 p.

5. GOST R 52736-2007. Korotkie zamykaniia v elektroustanovkakh. Metody rascheta elektrodinamicheskogo i termicheskogo deistviia toka korotkogo zamykaniia [Short circuits in electrical installations. Methods for calculating the electrodynamic and thermal effects of short-circuit current], available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200052839> (accessed 05 December 2021).

6. RD 153-34.0-20.527-98. Rukovodiashchie ukazaniia po raschetu tokov korotkogo zamykaniia i vyboru elektrooborudovaniia [Guidelines for the calculation of short-circuit currents and the selection of electrical equipment], available at: <http://www.gostrf.com/normadata/1/4294817/4294817179.pdf> (accessed 05 December 2021).

7. Kadkhodaei G., Hamzeh M., Sheshyekani K., Tavakoli S.D. Multiphysics Analysis of Busbars with Various Arrangements Under Short-Circuit Condition. *IET Electrical Systems in Transportation*, 2016, no. 6, pp. 237-245.

8. Plesca A. Thermal Analysis of Busbars from a High Current Power Supply System. *Energies*, 2019, no. 12, available at: <https://doi.org/10.3390/en12122288> (accessed 05 December 2021).

9. Termostoikost' otkrytogo shinprovoda: tipovoi primer Elcut [Heat resistance of an open busbar: a typical example of Elcut], available at: https://elcut.ru/advanced/busbars_shortage_r.htm (accessed 05 December 2021).

10. Kusiak D., Szczegielniak T., Piątek Z. Magnetic field asymmetry at external phases of shielded single-pole three-phase flat high-current busduct. *ITM Web Conf.*, 2019, vol. 28, available at: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20192801007> (accessed 05 December 2021).

11. GOST 12965-85. Transformatory silovye maslianye obshchego naznachenii klassov napriazheniia 110 i 150 kV [GOST 12965-85. General purpose oil power transformers of 110 and 150 kV voltage classes], available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200012412> (accessed 05 December 2021).

12. Fedorov V.A. Bibliia releinoi zashchity i avtomatiki [The Bible of relay protection and automation]. Novosibirsk: Novosibirskii institut povysheniia kvalifikatsii, 2004, 278 p.

13. Magnitnaia pronitsaemost' osnovnykh materialov, tablitsa [Magnetic permeability of basic materials], available at: <https://dpva.ru/Guide/GuidePhysics/ElectricityAndMagnethism/MagneticPermeability/MagneticPermeabilityGenaralTable/> (accessed 05 December 2021).

14. STO 56947007-29.060.10.006-2008. Metodicheskie ukazaniia po raschetu i ispytaniiam zhestkoi oshinovki ORU i ZRU 110-500 kV [STO 56947007-29.060.10.006-2008. Methodological guidelines for the calculation and testing of rigid bushing ORU and ZRU 110-500 kV], available at: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.060.10.006-2008.pdf> (accessed 05 December 2021).

15. Rukovodstvo pol'zovatel'ia Elcut [Elcut User Manual], available at: http://elcut.ru/free_doc_r.htm (accessed 05 December 2021).

16. Pravila ustroistva elektroustanovok [Rules for electrical installations]. 7nd ed. Moscow: Novatsionnyi tsentr "ENAS", 1999-2005, 692 p.

17. GOST 14694-76. Ustroistva komplektnye raspredelitel'nye v metallicheskoibolochke na napriazhenie do 10 kV metody ispytaniia [GOST 14694-76. Complete distribution devices in a metal shell for voltage up to 10 kV test methods], available at: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294837/4294837022.htm> (accessed 19 December 2021).

18. GOST 8024-90. Apparaty i elektrotekhnicheskie ustroistva peremennogo toka na napriazhenie svyshe 1000 V. Normy nagreva pri prodolzhitel'nom rezhime raboty i metody ispytanii [GOST 8024-90. Devices and electrical devices of alternating current with a voltage over 1000 V. Heating standards for continuous operation and test methods], available at: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294821/4294821800.pdf> (accessed 19 December 2021).

19. Protokol ispytaniy № 017-189-2007 ot 31.10.2007 [Test report No. 017-189-2007 dated 31.10.2007]. Filial OAO "NTC jelektrojenergetiki", NIC VVA, 9 p.

20. Nazarov S.L., Udintsev V.N., Bychkov S.A. et al. Preobrazovateli chisla faz v elektrotekhnologii [Phase number converters in electrical engineering]. Ekaterinburg: Ural'skii universitet, 2019, 196 p.

21. Cundeva S., Digalovski M. Calculation of electric arc furnace secondary circuit - Analytical and numerical approach. *Przeglad Eletrotechniczny*, 2016, vol. 1, available at: <https://doi.org/10.15199/48.2016.12.06> (accessed 19 December 2021).

22. Cundeva S., Digalovski M. Electric Arc Furnace Transformer Secondary Circuit Calculations. *Serbian Journal of electrical engineering*, 2019, vol. 16, available at: <https://doi.org/10.2298/SJEE1902181C> (accessed 19 December 2021).

23. Evseeva N.V., Baranov S.L., Loskutov A.S., Akhmetov A.R. Opredelenie parametrov korotkoi seti dugovykh staleplavil'nykh pechei [Determination of parameters of a short network of arc steelmaking furnaces]. *Stal'*, 2018, no. 10, pp. 22-25.

24. Iarymbash D.S. Osobennosti rascheta elektrodinamicheskoi stoikosti shikhtovannykh shinnykh paketov korotkoi seti pechi grafitatsii [Features of the calculation of the electrodynamic resistance of the charged bus packages of the short network of the graphite furnace]. *Vestnik SevNTU*, 2014, iss. 147, pp. 131-136.

25. Iarymbash D.S., Kilimnik I.M., Iarymbash S.T. Dinamicheskaiia adaptatsiia skhemnykh modelei korotkoi seti [Dynamic adaptation of circuit models of a short network]. *Elektrotekhnika i elektroenergetika*, 2014, no. 2, pp. 65-70.

26. Beletskii V.M., Krivov G.A. *Aluminiumyve splavy (Sostav, svoistva, tekhnologiya, primeneniye): spravochnik [Aluminum alloys (Composition, properties, technology, application): Handbook]*. Ed. akademik RAN I.N. Fridliander. Kiev: ZAO "Komintekh", 2005, 365 p.

27. Chervenchuk V.D., Ivanov A.L. *Elektricheskie apparaty. Teplovye protsessy v elektricheskikh apparatakh [Electrical devices. Thermal processes in electrical devices]*, available at: <http://bek.sibadi.org/fulltext/esd236.pdf> (accessed 10 October 2022).

Сведения об авторах

Абашева Ульяна Николаевна (Екатеринбург, Россия) – аспирантка кафедры «Электротехника» Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620010, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: uliana.abasheva@urfu.ru).

Фризен Василий Эдуардович (Екатеринбург, Россия) – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника» Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620010, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: vefrizen@urfu.ru).

Назаров Сергей Леонардович (Екатеринбург, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника» Уральского энергетического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (620010, Екатеринбург, ул. Мира, 19, e-mail: nazarovsl.ekb@yandex.ru).

About the authors

Uliana N. Abasheva (Ekaterinburg, Russian Federation) – Graduate Student EETS Department Ural Power Engineering Institute URFU (620010, Yekaterinburg, 19, Mira str., e-mail: uliana.abasheva@urfu.ru).

Vasiliy E. Frizen (Ekaterinburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the EETS Department Ural Energy Institute URFU (620010, Yekaterinburg, 19 Mira str., e-mail: vefrizen@urfu.ru).

Sergey L. Nazarov (Ekaterinburg, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the EETS Department Ural Energy Institute URFU (620010, Yekaterinburg, 19 Mira str., e-mail: nazarovsl.ekb@yandex.ru).

Поступила: 28.06.2022. Одобрена: 18.10.2022. Принята к публикации: 22.12.2022.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Абашева, У.Н. Численное моделирование испытания на термостойкость закрытого трехфазного шинпровода 10 кВ в режиме трехфазного короткого замыкания / У.Н. Абашева, В.Э. Фризен, С.Л. Назаров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 29–48. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.02

Please cite this article in English as:

Abasheva U.N., Frizen V.E., Nazarov S.L. Numerical simulation of the heat resistance test of a closed three-phase 10 kV bus duct in the three-phase short circuit situation *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2022, no. 43, pp. 29-48. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.3.02