



УДК 001.891.57:621.315.1:621.3.027.2:621.3.064.1 DOI:10.30724/1998-9903-2024-26-5-44-53

## КОРРЕКТИРОВКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТОКА ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 кВ

Лансберг А.А., Виноградов А.В.

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия  
lansbergaa@vk.com

**Резюме:** АКТУАЛЬНОСТЬ исследования заключается в рассмотрении и корректировке результатов расчетов тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ, получаемых с использованием существующих физических, компьютерных и математических методов, которые дают разные результаты. ЦЕЛЬ. Разработка корректировочных коэффициентов для разных методов расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. В ходе расчетов тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ с использованием разных методов были заданы общие исходные условия: питание осуществлялось от трансформатора ТМ-250 и с использованием провода А-35. РЕЗУЛЬТАТЫ. Выявлено, что погрешность между результатами, полученными с использованием разных методов, достигает 35,9%. В работе были предложены корректировочные коэффициенты со значениями от 0,93 до 1,47 относительных единиц с целью повышения достоверности расчетов. Данные коэффициенты позволили повысить достоверность рассмотренных методов определения тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ в 2,9-6,1 раза по сравнению с исходными значениями.

**Ключевые слова:** моделирование; физическая модель; математическая модель; компьютерная модель; однофазное короткое замыкание; трансформатор; линия электропередачи.

**Для цитирования:** Лансберг А.А., Виноградов А.В. Корректировка методов расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т. 26. № 5. С. 44-53. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-44-53.

## CORRECTION OF METHODS FOR CALCULATING THE SINGLE-PHASE SHORT CIRCUIT CURRENT IN A RURAL 0.4 kV ELECTRIC GRID

Lansberg A.A., Vinogradov A.V.

Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia  
lansbergaa@vk.com

**Abstract:** The relevance of the study lies in the consideration and correction of the results of calculations of the single-phase short circuit current in a rural 0.4 kV electric network obtained using existing physical, computer and mathematical methods that give different results. Purpose. Development of correction coefficients for different methods of calculating the single-phase short circuit current in a rural 0.4 kV electrical network. Materials and research methods. During the calculations of the single-phase short circuit current in the 0.4 kV rural electric grid, using different methods, general initial conditions were set: power was supplied from a TM-250 transformer and using A-35 wire. Results. It was revealed that the error between the results obtained using different methods reaches 35.9%. In the work, correction coefficients with values from 0.93 to 1.47 relative units were proposed in order to increase the reliability of calculations. These coefficients made it possible to increase the reliability of the considered methods for determining the current of a single-phase short circuit in a rural 0.4 kV electrical network by 2.9-6.1 times compared with the initial values.

**Keywords:** modeling; physical model; mathematical model; computer model; single-phase short circuit; transformer; power line.

**For citation:** Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Correction of methods for calculating the single-phase short circuit current in a rural 0.4 kV electric grid. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2024; 26 (5): 44-53. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-5-44-53.

### **Введение (Introduction)**

Большое количество работ как зарубежных, так и отечественных ученых направлено на моделирование электрических сетей, которое является одним из наиболее достоверных и относительно недорогих способов изучения процессов, происходящих в них. При этом в большинстве работ используются методы математического и компьютерного моделирования. В работе, на примере определения значений тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ, представлены результаты, полученные с применением компьютерных моделей и математических методов, выполнено их сравнение между собой и с результатами физического моделирования. Показано, что применение разных методов и моделей даёт разные результаты. Выбраны методы, наиболее близкие по результатам к физическому моделированию. Предложены корректировочные коэффициенты.

### **Литературный обзор (Literature Review)**

Одним из наиболее популярных инструментов моделирования электрических сетей является MATLAB Simulink. С его применением производится большое количество моделей, позволяющих анализировать режимы работы сети, рассчитывать необходимые параметры. Например, в работе [1] в MATLAB Simulink рассмотрены режимы параллельной работы распределительной электрической сети напряжением 11 кВ и солнечной электростанции установленной мощностью 1126,5 кВА, подключенной через повышающий трансформатор 0,4/11 кВ, которая выдает в сеть токи до 167 А.

На примере модели синхронного генератора мощностью 37,3 кВт в MATLAB Simulink в работе [2] выявлено, что несимметрия и несинусоидальность в электрической сети приводит к снижению его КПД до 2-4%.

Безусловно, в основе любого инструмента компьютерного моделирования лежат методы математического моделирования. Исследователями используется большой набор методов математического моделирования для решения практических задач. Так, в работе [3] с использованием математического моделирования исследуется распределение потерь в городских сетях 6-10/0,4 кВ Таджикистана. Выявлено, что потери в силовых трансформаторах 6-10/0,4 кВ, вызванные составляющей холостого хода, составляют 80% от общих, а короткого замыкания – 20%. В источнике [4] рассмотрены вопросы моделирования режимов работы электрических сетей 0,4 кВ при интеграции в них технических средств, симметрирующих несимметричные потоки, создаваемые трехфазной несимметричной нагрузкой в различных точках их подключения.

Активно используются методы математического и компьютерного моделирования и в работах, посвящённых сетям 0,4 кВ. В работе [5] разработана компьютерная модель для исследования вопросов электробезопасности в сельских электрических сетях 0,4 кВ. Аналогичная модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ в программном комплексе MATLAB Simulink предложена в работе [6].

В работах [7, 8] рассмотрены проблемы электробезопасности в сельских электрических сетях 0,4 кВ, связанные с обеспечением чувствительности автоматических выключателей к токам однофазного короткого замыкания. На примере автоматических выключателей серии ВА57 предложена методика выбора коммутационного аппарата от рабочего тока и тока короткого замыкания с учетом теплового спада.

Одной из актуальнейших проблем в сетях 0,4 кВ является достоверное получение значений токов однофазных коротких замыканий. Это особенно актуально для сельских электрических сетей 0,4 кВ, максимальные протяжённости до удалённой точки в которых зачастую превышают рекомендованные ПУЭ 500 метров [9]. В свою очередь, это приводит к необеспеченности чувствительности защитных коммутационных аппаратов, устанавливаемых в начале линии, к токам удалённых однофазных коротких замыканий (УОКЗ) [10] и, как следствие – к их неотключению. Поражение электрическим током в электрических сетях 0,4 кВ часто связано именно с указанной причиной.

Ввиду различия методов моделирования проблемой является выбор наиболее достоверного значения тока однофазного короткого замыкания, для которого должны выставляться уставки автоматического выключателя 0,4 кВ. Это связано с тем, что методы расчета дают разные результаты, а единственно закрепленный законодательно метод согласно ГОСТ 28249-93 не актуализировался более 18 лет.

Рассмотрим методы расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ. Их можно структурировать в несколько групп: натурные (физические), математические, компьютерные.

Первым и наиболее достоверным методом определения тока однофазного короткого замыкания является непосредственное исследование аварийного режима, что выполнено челябинскими учеными в работе [11] на полигоне ПАО «Россети Урал»-«Челябэнерго». Выбранная для испытаний опытная сеть имеет небольшую протяженность (481 м) и включает 2 типа провода: СИП-2 3х30+1х50 и АС-35. Данный полигон реализован в стране в единственном экземпляре.

Вторым физическим методом является замер сопротивления петли фаза-ноль в электрической сети прибором серии MZC с последующим косвенным вычислением ожидаемого тока однофазного короткого замыкания, что рассмотрено в работе [12]. При этом исследовать всю протяженность электрической сети 0,4 кВ при данном подходе ввиду высокой трудоемкости не представляется возможным.

Последним натурным методом является экспериментальное исследование на физической модели. Так, ранее упомянутым коллективом челябинским ученых разработана физическая модель [13], которая не является наглядной и не отвечает требованиям электробезопасности при имитации аварийных режимов ввиду её питания от трансформатора ТС-0,5-380/177 В. Указанная физическая модель также не является универсальной, не позволяет моделировать разные типы питающих трансформаторов, проводников линий электропередачи, не обеспечивает возможность подключения разных типов нагрузок, а также не пригодна для моделирования параллельной работы возобновляемых источников энергии с централизованным источником питания, моделирования работы второго источника питания, в том числе, однофазного, которым может быть, например, бензогенератор. Также актуальным является исследование вопросов электробезопасности и возможности использования средств повышения надежности электроснабжения и их влияние на качество электроэнергии, что можно также исследовать на физической модели.

В настоящее время наиболее часто используются 2 математических метода исследования режима однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ. Первый из них изложен в ГОСТ 28249-93 «Межгосударственный стандарт. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ» и позволяет определить численное значение тока однофазного короткого замыкания (КЗ) с использованием метода симметричных составляющих.

Согласно данному методу ток однофазного короткого замыкания  $I_{КЗ}^1$ , А, определяется по формуле:

$$I_{КЗ}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{ср.нн}}{\sqrt{(2r_1 + r_0)^2 + (2x_1 + x_0)^2}}, \quad (1)$$

где  $U_{ср.нн}$  – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло замыкание, В;  $r_1$ ,  $x_1$  – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи короткого замыкания, Ом;  $r_0$ ,  $x_0$  – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи короткого замыкания, Ом.

Второй метод также позволяет определить значение тока однофазного КЗ путем алгебраического сложения полных сопротивлений элементов до точки КЗ и называется упрощенным методом петли «фаза-ноль», при этом его значение не более, чем на 5% меньше получаемого по ГОСТ 28249-93 результата. Согласно данного метода, численное значение тока однофазного короткого замыкания  $I_{КЗ}^1$ , А, определяется по формуле (2) [14]:

$$I_{КЗ}^1 = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_T}{3} + Z_{\phi-0}}, \quad (2)$$

где  $U_{\phi}$  – фазное напряжение сети, В;  $Z_T$  – полное сопротивление трансформатора току однофазного замыкания на корпус, Ом;  $Z_{\phi-0}$  – полное сопротивление петли фаза-ноль от трансформатора до точки КЗ, Ом.

В настоящее время определение тока однофазного короткого замыкания осуществляется на имитационных моделях с использованием компьютерных программ. Например, в источнике [15] представлена компьютерная модель, разработанная коммерческой компанией «Проект РЗА». Она позволяет не только определить значение тока однофазного КЗ, но и исследовать другие электрические параметры: распределение напряжения вдоль линии, напряжения и токи прямой, обратной и нулевой последовательностей в разных точках сети. При этом получаемые по ним результаты на 25% меньше, чем расчеты по математическим расчетным методам.

Наиболее популярными являются компьютерные модели в MATLAB Simulink. Так, челябинскими учеными разработана компьютерная модель [16], но её недостатком является то, что она содержит всего 2 измерительных блока в точке короткого замыкания и на выводах 0,4 кВ понижающего трансформатора, что не дает возможности исследования распределения напряжения вдоль линии при установившихся аварийных несимметричных режимах.

В работе [17] представлена компьютерная модель сельской электрической сети 0,4 кВ, предназначенная для исследования несимметричных режимов, вызванных короткими замыканиями. Её упрощенный вид с 1-им участком линий электропередачи 0,4 кВ представлен на рисунке 1.

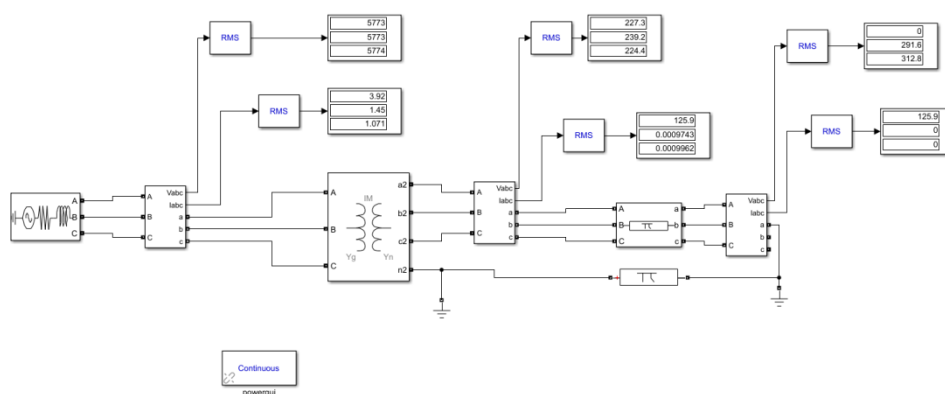


Рис. 1. Компьютерная модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ в MATLAB Simulink

Fig. 1. Computer model of rural 10/0.4 kV electrical network in MATLAB Simulink

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Выше были перечислены разные методы расчета тока однофазного короткого замыкания в сети 0,4 кВ. Наиболее достоверными из них являются методы физического исследования, среди которых наиболее доступным является натурное экспериментальное исследование. В связи с этим, в данной работе произведено сравнение результатов определения значений тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ математическими методами, методами компьютерного моделирования и с помощью физического моделирования, а также предложены корректировочные коэффициенты для повышения достоверности расчетов.

Цель исследования заключается в разработке корректировочных коэффициентов для разных методов расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ.

### Материалы и методы (Materials and methods)

Для исследования режима устойчивого однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ в лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ была разработана физическая модель, внешний вид которой представлен на рисунке 2.

Для нее были обоснованы коэффициенты подобия согласно методике, рассмотренной в работе [18]. Коэффициенты подобия позволяют производить пересчет электрических параметров модели на промышленные, то есть получить характеристики действующей сельской электрической сети 0,4 кВ.

Был произведен расчет значений токов однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ с использованием разных методов при одинаковых исходных условиях. Так, в качестве протяженности воздушной линии электропередачи 0,4 кВ было

принято значение 1 км, ввиду того, что в филиалах электросетевых организаций ПАО «Россети Центр» и ПАО «Россети Центр и Приволжье» наибольшая средняя протяженность (характерна для филиала Орёлэнерго) составляет 985 метров [9]. В качестве питающего трансформатора был принят понижающий силовой трансформатор ТМ-250-10/0,4 кВ  $Y/Y_n$ . Таких в электросетевой организации филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» 13% от общего количества [9]. В качестве провода был принят проводник неизолированного типа и сечения 4А-35 ввиду того, что им выполнено 27% сельских электрических сетей 0,4 кВ Орловского региона.



Рис. 2. Внешний вид физической модели сельской электрической сети 0,4 кВ *Fig. 2. Appearance of the physical model of the rural 0.4 kV power grid*

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Расчет токов разными методами производился для точек, соответствующих расстоянию между участками линии электропередачи на физической модели. При этом расчет на выводе трансформатора без учета линии электропередачи 0,4 кВ не производился, так как данный опыт не был реализован в целях недопущения выхода из строя трансформатора на физической модели.

Результаты расчетов разными методами, а также результаты измерений на физической модели, полученные с помощью коэффициентов пересчета представлены в таблице 1, а также на рисунке 3.

Таблица 1

Table 1

Сравнение результатов расчетов тока однофазного короткого замыкания, полученных разными методами

*Comparison of results of single-phase short-circuit current calculations obtained by different methods*

| № п/п | Расстояние при замыкании на ВЛ 0,4 кВ, L, м | Расчеты токов однофазного короткого замыкания, $I_{кз}$ , А |               |            |                       |                 |
|-------|---------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------|------------|-----------------------|-----------------|
|       |                                             | Физическая модель                                           | ГОСТ 28249-93 | Проект РЗА | Метод петли фаза-ноль | MATLAB Simulink |
| 1     | 186                                         | 570                                                         | 549           | 407        | 501                   | 630             |
| 2     | 258                                         | 443                                                         | 419           | 304        | 387                   | 471             |
| 3     | 331                                         | 362                                                         | 338           | 242        | 314                   | 374             |
| 4     | 402                                         | 307                                                         | 284           | 202        | 265                   | 311             |
| 5     | 476                                         | 266                                                         | 244           | 173        | 229                   | 265             |
| 6     | 548                                         | 234                                                         | 214           | 151        | 201                   | 231             |
| 7     | 621                                         | 208                                                         | 190           | 134        | 180                   | 205             |
| 8     | 693                                         | 185                                                         | 172           | 121        | 163                   | 184             |
| 9     | 765                                         | 169                                                         | 156           | 110        | 148                   | 167             |
| 10    | 838                                         | 156                                                         | 143           | 100        | 136                   | 153             |
| 11    | 1023                                        | 126                                                         | 118           | 83         | 113                   | 126             |

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

При разработке корректировочных коэффициентов в данной работе предполагается снизить погрешность между результатами расчётов разными методами до приемлемых с инженерной точки зрения, а именно до близкой к 5%. Следует отметить, что ни один из рассматриваемых методов математического и компьютерного моделирования не соответствует предложенной 5% погрешности, что отражено на рисунке 3.

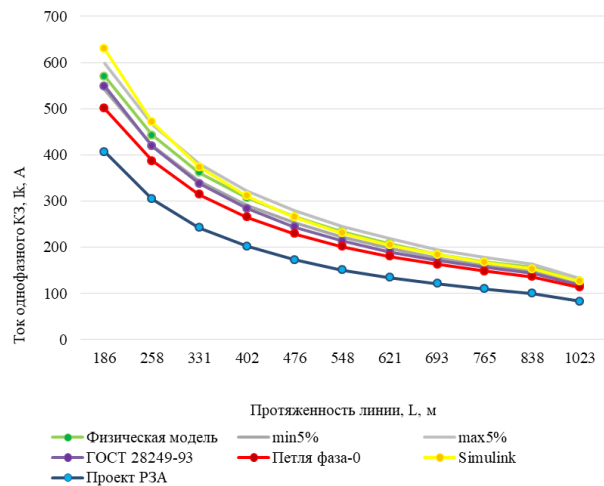


Рис. 3. Сравнение результатов расчетов тока однофазного короткого замыкания при использовании разных методов для трансформатора ТМ-250 и провода 4А-35

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Погрешность между методами расчета тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ определим по методу расчета относительной погрешности  $\delta$ , %, согласно формуле (3):

$$\delta = \frac{\Delta a}{a} \cdot 100\%, \tag{3}$$

где  $\Delta a$  – разница между результатами измерения на физической модели и сравниваемым методом, А; а – результат измерения на физической модели, А.

В свою очередь, новое значение тока однофазного короткого замыкания  $I_{\text{КЗ}}^{1'}$ , А, в сельской электрической сети 0,4 кВ с учетом корректировочных коэффициентов  $k_{\text{кор}}$ , безразм., предлагается определять по формуле (4):

$$I_{\text{КЗ}}^{1'} = k_I \cdot I_{\text{КЗ}}^1, \tag{4}$$

где  $k_I$  – корректировочный коэффициент для расчетного метода, безразм.;  $I_{\text{КЗ}}^1$  – значение тока однофазного короткого замыкания, полученное с использованием исходного метода, А.

Результаты (Results)

Погрешности значений токов однофазного короткого замыкания, полученных по методам математического и компьютерного моделирования, по сравнению с результатами натурных измерений представлены в таблице 2.

Таблица 2  
Table 2

Погрешности методов расчета тока однофазного КЗ по сравнению с экспериментальными данными физической модели  
Errors of methods of single-phase short-circuit current calculation in comparison with experimental data of the physical model

| № п/п | Расстояние при ОКЗ на ВЛ 0,4 кВ, L, м | Погрешности методов расчета, % |            |                       |                 |
|-------|---------------------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------|-----------------|
|       |                                       | ГОСТ 28249-93                  | Проект РЗА | Метод петли фаза-ноль | MATLAB Simulink |
| 1     | 186                                   | 3,7                            | 28,6       | 12,1                  | 9,5             |
| 2     | 258                                   | 5,4                            | 31,4       | 12,6                  | 5,9             |
| 3     | 331                                   | 6,6                            | 33,1       | 13,3                  | 3,2             |
| 4     | 402                                   | 7,5                            | 34,2       | 13,7                  | 1,3             |
| 5     | 476                                   | 8,3                            | 35         | 13,9                  | 0,4             |
| 6     | 548                                   | 8,5                            | 35,5       | 14,1                  | 1,3             |
| 7     | 621                                   | 8,7                            | 35,6       | 13,5                  | 1,4             |
| 8     | 693                                   | 7                              | 34,6       | 11,9                  | 0,5             |
| 9     | 765                                   | 7,7                            | 34,9       | 12,4                  | 1,2             |
| 10    | 838                                   | 8,3                            | 35,9       | 12,8                  | 1,9             |
| 11    | 1023                                  | 6,3                            | 34,1       | 10,3                  | 0               |

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из результатов, представленных в таблице 2 следует, что погрешность результатов, полученных по методу ГОСТ 28249-93 по сравнению с результатами измерений, полученными на физической модели, составляет 3,8-8,7%, а результатов, полученных методом петли фаза-ноль – 10,3-14,1%. При этом погрешность математической модели в MATLAB Simulink высока только в расчетных токах на расстоянии до 275 метров и составляет 5,9-9,5%, а в остальных не более 3,2%. В свою очередь, достаточно высокие результаты погрешности получились в случае применения математической модели компании Проект РЗА, они составляют 28,6-35,9%.

Для корректировки расчетов предлагается ввести следующие корректировочные коэффициенты (безразм.):

–  $k_1$  для ГОСТ 28249-93 – 1,07;

–  $k_1$  для метода петли фаза-0 – 1,13;

–  $k_1$  для первых 275 м модели MATLAB Simulink – 0,93. При этом результаты для последующей протяженности воздушной линии электропередачи характеризуются высокой степенью достоверности и не нуждаются в корректировке;

–  $k_1$  для модели Проект РЗА – 1,47.

#### **Обсуждение (Discussions)**

С учетом предложенных коэффициентов был произведен пересчет значений токов однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ по формуле (4). Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3

Table 3

Скорректированные результаты расчетов тока однофазного короткого замыкания, полученных разными методами, с использованием предложенных коэффициентов

*Adjusted results of single-phase short-circuit current calculations obtained by different methods using the proposed coefficients*

| № п/п | Расстояние при замыкании на ВЛ 0,4 кВ, L, м | Значения токов однофазного короткого замыкания, $I_{кз}$ , А |            |                       |                 |
|-------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------|-----------------------|-----------------|
|       |                                             | ГОСТ 28249-93                                                | Проект РЗА | Метод петли фаза-ноль | MATLAB Simulink |
| 1     | 186                                         | 587                                                          | 598        | 566                   | 580             |
| 2     | 258                                         | 448                                                          | 447        | 437                   | 433             |
| 3     | 331                                         | 362                                                          | 356        | 355                   | 374             |
| 4     | 402                                         | 304                                                          | 297        | 299                   | 311             |
| 5     | 476                                         | 261                                                          | 254        | 259                   | 265             |
| 6     | 548                                         | 229                                                          | 222        | 227                   | 231             |
| 7     | 621                                         | 203                                                          | 197        | 203                   | 205             |
| 8     | 693                                         | 184                                                          | 178        | 184                   | 184             |
| 9     | 765                                         | 167                                                          | 162        | 167                   | 167             |
| 10    | 838                                         | 153                                                          | 147        | 154                   | 153             |
| 11    | 1023                                        | 126                                                          | 122        | 128                   | 126             |

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Так же как и для значений до использования корректировочных коэффициентов, произведем расчет относительной погрешности по сравнению с экспериментальными данными, измеренными на физической модели, по формуле (3). Результаты расчетов представлены в таблице 4.

Таблица 4

Table 4

Погрешности методов расчета тока ОКЗ в сельской электрической сети 0,4 кВ с учетом

корректирующих коэффициентов

*Errors of methods for calculating RCD current in a 0.4 kV rural power grid with correction factors taken into account*

| № п/п | Расстояние при ОКЗ на ВЛ 0,4 кВ, L, м | Погрешности методов расчета, % |            |                       |                 |
|-------|---------------------------------------|--------------------------------|------------|-----------------------|-----------------|
|       |                                       | ГОСТ 28249-93                  | Проект РЗА | Метод петли фаза-ноль | MATLAB Simulink |
| 1     | 186                                   | 3                              | 5          | 0,7                   | 1,7             |
| 2     | 258                                   | 1,2                            | 0,9        | 1,3                   | 2,2             |
| 3     | 331                                   | 0,1                            | 1,7        | 2                     | 3,2             |
| 4     | 402                                   | 1                              | 3,3        | 2,5                   | 1,3             |
| 5     | 476                                   | 1,8                            | 4,4        | 2,7                   | 0,4             |
| 6     | 548                                   | 2,1                            | 5,1        | 2,9                   | 1,3             |
| 7     | 621                                   | 2,3                            | 5,3        | 2,2                   | 1,4             |
| 8     | 693                                   | 0,5                            | 3,9        | 0,4                   | 0,5             |
| 9     | 765                                   | 1,2                            | 4,3        | 1                     | 1,2             |
| 10    | 838                                   | 1,9                            | 5,8        | 1,5                   | 1,9             |
| 11    | 1023                                  | 0                              | 3,2        | 1,3                   | 0               |

\*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Исходя из результатов, представленных в таблице 4, можно сделать вывод, что использование предложенных корректировочных коэффициентов позволяет снизить погрешность расчёта методом ГОСТ 28249-93 до 3%, методом петли фаза-ноль – до 2,9%, а с применением компьютерной модели MATLAB Simulink до 3,2%. В свою очередь, для компьютерной модели Проект РЗА удалось добиться снижения погрешности до 5,8%, что в 6,1 раза меньше, чем исходные значения модели.

#### **Заключение (Conclusions)**

1. В настоящее время для определения численного значения тока однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ можно использовать ряд методов математического, компьютерного и физического моделирования. При этом физическое и натурное моделирование сельских электрических сетей 0,4 кВ позволяют исследовать нормальные и аварийные режимы работы и проверять достоверность различных методов математического и компьютерного моделирования.

3. Выявлено, что по сравнению с экспериментальными результатами физического моделирования режима устойчивого однофазного короткого замыкания в сельской электрической сети 0,4 кВ погрешность методов математического и физического моделирования достигает от 0 до 35,9%.

4. В работе были предложены корректировочные коэффициенты для разных методов определения расчетного значения тока однофазного короткого замыкания. Так, для метода ГОСТ 28249-93 было предложено значение коэффициента 1,07, для метода петли фаза-ноль – 1,13; для первых 275 м модели MATLAB Simulink – 0,93, для модели Проект РЗА – 1,47.

5. Был произведен пересчет значений с учетом поправочных коэффициентов, его результаты показали, что максимальная погрешность расчёта методом ГОСТ 28249-93 снизилась до 3% (в 2,9 раза), методом петли фаза-ноль – до 2,9% (в 4,9 раза), с применением компьютерной модели MATLAB Simulink до 3,2% (в 3 раза), для компьютерной модели «Проект РЗА» – до 5,8% (в 6,1 раза).

#### **Литература**

1. Sudhakar T.D., Raja Rajan M., Srinivasan K.N., Raja Prabu Ramachandran, Narmadha T.V., Mohana Krishnan M. Modeling and Simulation of Distribution Network with the Integration of Distribution Generator using Matlab // Indian Journal of Science and Technology. March 2016. №9(12). DOI:10.17485/ijst/2016/v9i12/89947.
2. Adrián Bolaño Martínez, Isaac Jiménez Navarro, Enrique C. Quispe, Universidad Autónoma de Occidente, Pablo Daniel Donolo. MATLAB/Simulink modeling of electric motors operating with harmonics and unbalance // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). October 2022 12(5):4640-4648. DOI:10.11591/ijece.v12i5.pp4640-4648.
3. Niyoz, S. R. Modeling and calculation of urban electrical networks in Dushanbe-Republic of Tajikistan for the analysis and assessment of power losses / S. R. Niyoz, S. R. Chorshanbiev, A. M. Ashurov // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. №1(53). Р. 18-24. EDN CJZHVG.
4. Наумов И.В., Багаев А.А. Моделирование режимов несимметричного электропотребления в сельских распределительных электрических сетях 0,38 кВ при многоступенчатом отборе мощности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. №6(212). С. 90-104. DOI 10.53083/1996-4277-2022-212-6-90-104. EDN SKBGVV.
5. Комаров В.И., Кит Ю.В., Стэц Р.Е. Использование компьютерного моделирования для анализа электробезопасности в электрических сетях до 1 кВ // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. №2-1(46). С. 37-41.
6. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н. Моделирование низковольтных сельских электрических сетей 10/0,4 кВ // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. 2018. №4(9). С. 37-42.
7. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П. Выбор автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ с учетом допустимого времени отключения // Вестник КрасГАУ. 2007. №5. С. 191-196.
8. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П., Кунгс Я.А. Учет допустимого времени отключения при выборе автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ // Промышленная энергетика. 2009. № 2. С. 25-30.
9. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69, №2(47). С. 31-41.
10. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Анализ типов и технических характеристик защитных коммутационных аппаратов электрических сетей 0,4 кВ в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» // Научный журнал молодых ученых. 2022. №4(29). С. 42-51.

11. Млоток А.В., Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2014. №2(19). С. 96-107.
12. Виноградов А.В., Лансберг А.А. Опыт измерений при однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2022. №3(36). С. 5-15.
13. Ершов А.М., Хлопова А.В. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 13-21.
14. Найфельд М.Р. Заземление, защитные меры электробезопасности // 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергия, 1971. 311 с.
15. Проект РЗА. Лаборатория РЗА. Доступно по: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/>. Ссылка активна на 27 июня 2024.
16. Валеев Р.Г., Млоток А.В., Ершов А.М., Сидоров А.И. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB-Simulink // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №9-10. С. 116-128.
17. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Панфилов А.А. Оценка достоверности математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink на примере исследования установившегося режима однофазного короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25. № 6. С. 14-28.
18. Веников, В.А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики. Москва: Вышш. школа, 1966. 487 с.

### Авторы публикации

**Лансберг Александр Александрович** – младший научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. [lansbergaa@vk.com](mailto:lansbergaa@vk.com)

**Виноградов Александр Владимирович** – д-р техн. наук, доцент, главный научный сотрудник Федерального научного агроинженерного центра ВИМ.

### References

1. Sudhakar T.D., Raja Rajan M., Srinivasan K.N., Raja Prabu Ramachandran, Narmadha T.V., Mohana Krishnan M. Modeling and Simulation of Distribution Network with the Integration of Distribution Generator using Matlab // *Indian Journal of Science and Technology*. 2016;9(12). DOI:10.17485/ijst/2016/v9i12/89947.
2. Adrián Bolaño Martínez, Isaac Jiménez Navarro, Enrique C. Quispe, Universidad Autónoma de Occidente, Pablo Daniel Donolo. MATLAB/Simulink modeling of electric motors operating with harmonics and unbalance // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022;12(5):4640-4648. DOI:10.11591/ijece.v12i5.pp4640-4648.
3. Niyoz, S. R. Modeling and calculation of urban electrical networks in Dushanbe-Republic of Tajikistan for the analysis and assessment of power losses / S. R. Niyoz, S. R. Chorshanbiev, A.M. Ashurov // *Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research*. 2021;1(53):18-24. EDN CJZHGB.
4. Naumov I.V., Bagaev A.A. Modeling of asymmetric power consumption modes in rural distribution electric networks of 0.38 kV with multistage power sampling // *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;6(212):90-104. DOI 10.53083/1996-4277-2022-212-6-90-104.
5. Komarov V.I., Kit Yu.V., Plaintiff R.E. Ispolzovanie kompyuternogo modelirovaniya dlya analiza elektrobezopasnosti v elektricheskikh setyah do 1 kV // *Current scientific research in the modern world*. 2019;2-1(46):37-41.
6. Rakhimov O.S., Mirzoev D.N. Modelirovanie nizkovoltnykh selskikh elektricheskikh setej 10/0,4 kV // *Bulletin of the PITTU named after academician M.S. Osimi*. 2018;4(9):37-42.
7. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P. Vyb,or avtomaticheskikh vyklyuchatelej dlya zashchity selskikh elektricheskikh setej 0,4 kV s uchetom dopustimogo vremeni otklyucheniya // *Bulletin of KrasGAU*. 2007;5:191-196.
8. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P., Kungs Ya.A. Uchet dopustimogo vremeni otklyucheniya pri vyb,ore avtomaticheskikh vyklyuchatelej dlya zashchity selskikh elektricheskikh setej 0,4 kV // *Industrial energy*. 2009;2:25-30.
9. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. Characteristics of electric companies by the number and length of transmission lines and substation capacity // *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2022;2(47):31-41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41.
10. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Analiz tipov i tekhnicheskikh harakteristik zashchitnykh kommutatsionnykh apparatov elektricheskikh setej 0,4 kV v filiale PAO «Rosseti Centr»-«Orelenergo» // *Scientific Journal of Young Scientists*. 2022;4(29):42-51.

11. Molotok A.V., Ershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I. Opytnaya elektricheskaya set napryazheniem 380 V // *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2014;2(19):96-107.
12. Vinogradov A.V., Lansberg A.A. Opyt izmerenij pri odnofaznom korotkom замыкании v elektricheskoy seti 0,4 kV // *Agrotechnics and energy supply*. 2022;3(36):5-15.
13. Ershov A.M., Khlopova A.V. Fizicheskaya model elektricheskoy seti napryazheniem 10/0,38 kV // *Electrical safety*. 2016;2:13-21.
14. Nyfeld M.R. Grounding, protective measures of electrical safety // 4th ed., reprint. and add. Moscow: Energiya, 1971. 311 p.
15. The RPA project. RZA Laboratory. Available at: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/>. Accessed: 27 June 2024.
16. Valeev R.G., Molotok A.V., Ershov A.M., Sidorov A.I. Modelirovanie elektricheskoy seti napryazheniem 380 V s vozdushnymi liniyami v programmnoj srede MATLAB-Simulink // *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2013;9-10:116-128.
17. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Panfilov A.A. Assessment of the reliability of the mathematical model of the 0.4 kV rural electric network in matlab simulink on the example of a study of the steady-state mode of a single-phase short circuit // *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2023;25(6):14-28. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28.
18. Venikov, V.A. Theory of similarity and modeling in relation to problems of electric power industry. Moscow: The highest. school, 1966. 487 p.

#### **Authors of the publication**

**Alexander A. Lansberg** – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia. [lansbergaa@vk.com](mailto:lansbergaa@vk.com)

**Alexander V. Vinogradov** – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.

*Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика*

**Получено** 27.06.2024 г.

**Отредактировано** 30.08.2024 г.

**Принято** 11.09.2024 г.