

## УДК 621.311

**Саєнко Юрій Леонідович**, д-р техн. наук, проф., декан енергетичного факультету, професор кафедри "Електрифікація промислових підприємств". Тел.: (0629) 44-65-88. E-mail: [yls@mail.ru](mailto:yls@mail.ru) (orcid.org/0000-0001-9729-4700)

**Бараненко Тетяна Костянтинівна**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри "Електрифікація промислових підприємств". Тел.: (0629) 44-65-51. E-mail: [tatianabaranenko@mail.ru](mailto:tatianabaranenko@mail.ru) (orcid.org/0000-0002-9436-8484)

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна. Вул. Університетська 7, м. Маріуполь, Україна, 87500

**Попов Артем Сергійович**, канд. техн. наук, електричний цех, інженер електролабораторії, Публічне акціонерне товариство «ДОНБАСЕНЕРГО», Старобешівська теплова електрична станція, смт. Новий Світ, Україна. Вул. Станційна 1, смт. Новий Світ, Старобешівський район, Донецька обл., Україна, 87230. Тел.: (06253) 7-22-78. E-mail: [artempopov9@gmail.com](mailto:artempopov9@gmail.com) (orcid.org/0000-0003-1131-0568)

### ІМОВІРНІСНІ ПІДХОДИ ПРИ АНАЛІЗІ ДУГОВИХ ПЕРЕНАПРУГ У МЕРЕЖАХ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

*У статті розглянуто проблему дугових перенапруг у мережах з ізолюваною нейтраллю. Розроблено математичну модель мережі з ізолюваною нейтраллю, в якій напруга пробоя дугового проміжку змінюється випадковим чином. Задаючись параметрами закону розподілення напруги пробоя, отримано статистичні характеристики та закон розподілу кратності перенапруг. Було виявлено, що зі збільшенням напруги пробоя кратність перенапруги зростає.*

**Ключові слова:** однофазне замикання на землю, випадкова величина, нормальний закон розподілу, щільність розподілення вірогідності, функція розподілення вірогідності, критерій Пірсона, критерій Колмогорова, кореляція.

**Саєнко Юрій Леонідович**, д-р техн. наук, проф., декан енергетичного факультета, професор кафедри "Електрифікація промислових підприємств". Тел.: (0629) 44-65-51. E-mail: [yls@mail.ru](mailto:yls@mail.ru) (orcid.org/0000-0001-9729-4700)

**Бараненко Тетяна Константиновна**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедри "Електрифікація промислових підприємств". Тел.: (0629) 44-65-51. E-mail: [tatianabaranenko@mail.ru](mailto:tatianabaranenko@mail.ru) (orcid.org/0000-0002-9436-8484)

Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, Украина. Ул. Университетская 7, г. Мариуполь, Украина, 87500

**Попов Артем Сергеевич**, канд. техн. наук, электрический цех, инженер электролаборатории, Публичное акционерное общество «ДОНБАССЭНЕРГО», Старобешевская тепловая электрическая станция, пгт. Новый Свет, Украина. Ул. Станционная 1, пгт. Новый Свет, Старобешевский район, Донецкая обл., Украина, 87230. Тел.: (06253) 7-22-78, E-mail: [artempopov9@gmail.com](mailto:artempopov9@gmail.com) (orcid.org/0000-0003-1131-0568)

### ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ПОДХОДЫ ПРИ АНАЛИЗЕ ДУГОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

*В статье рассмотрена проблема дуговых перенапряжений в сетях с изолированной нейтралью. Разработана математическая модель сети с изолированной нейтралью, в которой напряжение пробоя дугового промежутка изменяется случайным образом. Задаваясь параметрами закона распределения напряжения пробоя, получены статистические характеристики и закон распределения кратности перенапряжений. Было выявлено, что с ростом напряжения пробоя кратность перенапряжений увеличивается.*

**Ключевые слова:** однофазное дуговое замыкание на землю, случайная величина, нормальный закон распределения, плотность распределения вероятности, функция распределения вероятности, критерий Пірсона, критерий Колмогорова, корреляция.

**Sayenko Yuriy Leonidovich**, Dr. Eng. Sc., Prof., Dean Faculty of Energy, Full Professor of Department "Electrification of Industrial Enterprises". Ph: (0629) 44-65-51. E-mail: [yls@mail.ru](mailto:yls@mail.ru) (orcid.org/0000-0001-9729-4700)

**Baranenko Tetiana Kostjantynivna**, Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Associate Professor of Department "Electrification of Industrial Enterprises". Ph: (0629) 44-65-51. E-mail: [tatianabaranenko@mail.ru](mailto:tatianabaranenko@mail.ru) (orcid.org/0000-0002-9436-8484)

State Higher Educational Institution "Pryazovskyi State Technical University", Mariupol city, Ukraine. *Universytetska Str. 7, Mariupol city, Ukraine, 87500*

**Popov Artem Sergiiovych**, Cand. Sci. (Tech.), Electrical Department, Engineer of Electrolaboratory, Public joint-stock company «DONBASENERGO», Starobeshivska thermal power plant, urban-type settlement Novyi Svit, Ukraine. *Stantsiina Str. 1, urban-type settlement Novyi Svit, Starobeshivskyi raion, Donetsk oblast, Ukraine, 87230. Ph: (06253) 7-22-78, E-mail: [artempopov9@gmail.com](mailto:artempopov9@gmail.com) (orcid.org/0000-0003-1131-0568)*

## PROBABILISTIC APPROACHES IN THE ANALYSIS OF ARC OVERVOLTAGE IN NETWORKS WITH ISOLATED NEUTRAL

*The problem of arc surges in networks with isolated neutral is considered in the article. A mathematical model of the network with isolated neutral and the random value of the breakdown voltage of the arc gap are developed. The statistical characteristics and the distribution law of the overvoltage are obtained by using the parameters the distribution law of breakdown voltage. It was found that the increase of breakdown voltage due to increase of the overvoltage.*

**Keywords:** single-phase ground fault arc, random variable, normal distribution, probability density function, probability distribution function, Pearson criterion, Kolmogorov criterion, correlation.

### Постановка проблемы

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) являются преобладающим видом повреждений в электрических сетях всех уровней напряжений. В сетях с изолированной нейтралью их доля составляет порядка 70–80 % из всех видов повреждений изоляции. В большинстве случаев существование режима ОЗЗ в сети становится первопричиной возникновения аварийных ситуаций, что в первую очередь обусловлено появлением дуговых перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю (ОДЗ). Во многом именно характер горения заземляющей дуги определяет особенности протекания процесса ОДЗ.

Кратности дуговых перенапряжений во многом определяются напряжением пробоя дугового промежутка в режиме ОДЗ. Исследования показывают, что кратность перенапряжений растет пропорционально увеличению напряжения пробоя. Это объясняется тем, что избыточный заряд, который получает нейтраль в момент пробоя изоляции, определяется именно напряжением пробоя. В свою очередь, напряжение смещения нейтрали накладывается на ЭДС источника питания и формирует дуговые перенапряжения. Важно отметить, что опасность с точки зрения перенапряжений представляет прерывистая дуга, в то время как стабильно горящая дуга не является источником опасных перенапряжений.

Процесс горения заземляющей дуги имеет все признаки случайных процессов, поскольку напряжение пробоя в процессе ОДЗ изменяется случайным образом [1]. В результате кратность перенапряжений, определяемая напряжением пробоя, также изменяется случайным образом. Определенный научно-практический интерес в проблеме исследования дуговых перенапряжений представляет количественная оценка кратности перенапряжений и вероятности их появления в условиях конкретной сети. Данная задача может быть решена с использованием вероятностных методов.

### Анализ предыдущих исследований и публикаций

На сегодняшний день исследование проблемы ОЗЗ в сетях с изолированной нейтралью разделено на несколько классов подзадач. Это – совершенствование защит от ОЗЗ [2, 3], развитие методов ограничения дуговых перенапряжений [4], совершенствование методов распознавания режима ОДЗ на фоне прочих переходных процессов [5, 6], мониторинг переходных процессов ОДЗ и их статистический анализ [7], математическое и физическое моделирование процессов ОДЗ [8].

В настоящее время при математическом моделировании процесса горения заземляющей дуги чаще всего используют теории Петерсена, Петерса-Слепяна, Белякова, Дударева. При таком подходе напряжение пробоя на всем промежутке горения дуги является неизменной величиной, в итоге кратности перенапряжений во времени также оказываются постоянными и, что весьма важно – существенно завышенными. Так, например, при моделировании дуги по теории Петерсена кратность перенапряжений может достигать  $3,2-3,5 U_{\phi}$ , а напряжение пробоя составлять  $1,2-1,5 U_{\phi}$ , в то время как мониторинг переходных процессов в действующих сетях показывает, что напряжение пробоя в процессе ОДЗ принимает значение  $0,6-1 U_{\phi}$  [9]. Во многом именно неучет реального значения напряжения пробоя приводит к некорректным результатам при моделировании процессов ОДЗ, поэтому создание стохастической модели для исследования дуговых перенапряжений позволит приблизить результаты математического моделирования к результатам в действующих сетях.

### Постановка задачи

Целью работы является систематизация статистических данных, приводимых в технической литературе о параметрах режима ОДЗ, разработка математической модели сети с изолированной нейтралью с учетом стохастической природы заземляющей дуги, анализ дуговых перенапряжений с использованием вероятностных подходов.

### Изложение основного материала

Для численного анализа переходных процессов ОДЗ разработана математическая модель электрической сети 6 кВ с изолированной нейтралью в пакете MATLAB/Simulink. Схема замещения сети приведена на рис. 1 и включает в себя источник питания, отраженный системой трех симметричных ЭДС за сопротивлением; трансформатор напряжения контроля изоляции (ТНКИ) типа НТМИ-6, который введен в схему замещения активным сопротивлением обмотки высокого напряжения  $R_{вн}$  и результирующей нелинейной индуктивностью намагничивания  $L_{\mu}(i)$ ; линию электропередач (ЛЭП), которая для приближенного учета распределенности параметров введена в схему замещения последовательными П-образными звеньями; ключ  $K$  и линейное сопротивление  $R_d$ , моделирующие перемежающуюся дугу.

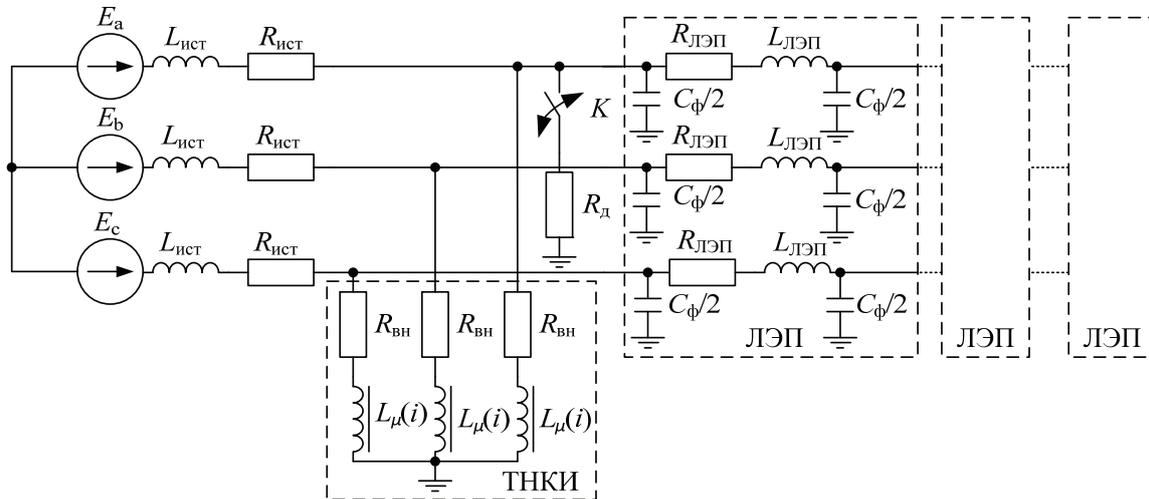


Рис. 1. Схема замещения сети с изолированной нейтралью для численного анализа переходных процессов

Зажигание заземляющей дуги (замыкание ключа  $K$ ) происходит в случае, если напряжение поврежденной фазы по отношению к земле превысит напряжение пробоя. Гашение дуги (размыкание ключа  $K$ ) возможно при первом или последующих переходах высокочастотной составляющей тока ОЗЗ через ноль или при переходе составляющей промышленной частоты через ноль. Для учета случайной природы электрической дуги напряжение пробоя в процессе моделирования изменяется случайным образом с заданным законом распределения и его параметрами. Это позволяет учесть случайную природу заземляющей дуги и приблизить процесс ее горения к реальному.

При моделировании ОДЗ момент первого пробоя изоляции был принят равным фазному напряжению сети, что достаточно хорошо согласуется с опытными данными. На рис. 2, а приведена эмпирическая плотность распределения напряжения первого пробоя, заимствованная из [7], которая подтверждает высокую вероятность пробоя вблизи максимума фазного напряжения. Как показали исследования [7], пробой изоляции чаще всего происходит после достижения  $U_{\phi, max}$ , что проиллюстрировано эмпирической плотностью распределения угла первого пробоя изоляции, приведенной на рис. 2, б.

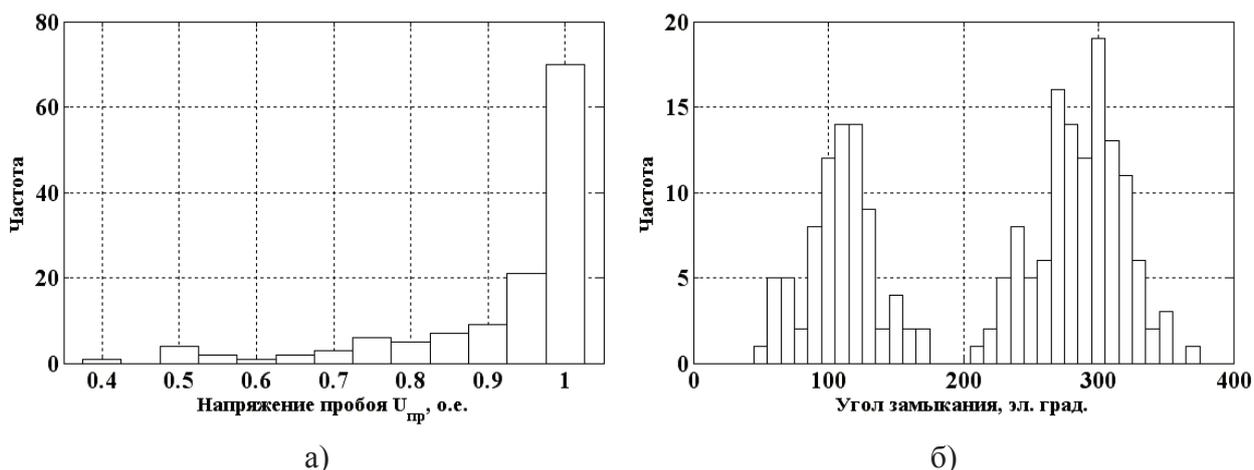


Рис. 2. Эмпирическая плотность распределения напряжения первого пробоя (а) и угла, при котором происходит первый пробой изоляции (б) по данным [7]

Основной задачей при моделировании является выявления закона распределения кратности перенапряжений и его параметров в зависимости от параметров закона распределения напряжения пробоя. На рис. 3 схематически показана блок-схема для анализа дуговых перенапряжений с учетом случайного характера заземляющей дуги.

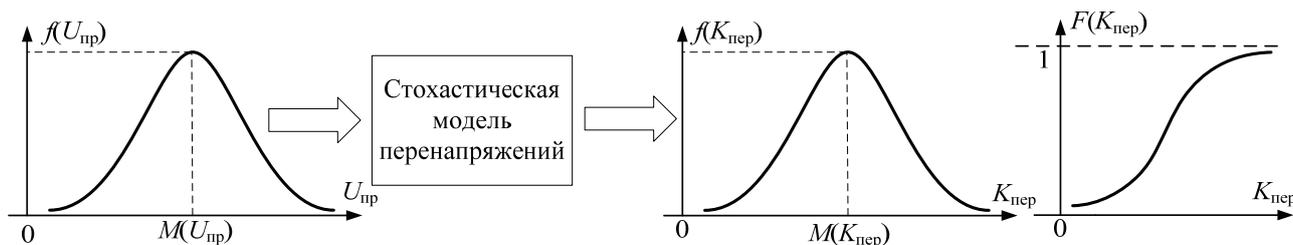


Рис. 3. Блок-схема для анализа дуговых перенапряжений с учетом случайного характера заземляющей дуги

Математическая обработка результатов моделирования процесса ОДЗ выглядит следующим образом. Определяются моменты времени, при которых происходил пробой изоляции. Далее для каждой фазы определяются максимальные перенапряжения на каждом интервале между пробоями. Затем полученные значения для каждой фазы сравниваются между собой, определяются максимумы среди них и формируется массив кратности перенапряжений  $K_{пер}$ .

По полученной выборке строится эмпирическая плотность распределения кратности перенапряжений, определяются параметры закона распределения, выполняется проверка на нормальность закона распределения критериями Пирсона и Колмогорова. Следует отметить, что при статистическом анализе полученных результатов для корректного определения закона распределения кратности перенапряжений и его параметров во внимание берутся перенапряжения вплоть до  $U_{ф}$ .

Важно отметить следующую особенность реализации случайной дуги в математической модели. По умолчанию генератор случайных чисел (величина напряжения пробоя) формирует значение каждые 0,01 с (sample time = 0,01 с), т.е. напряжение пробоя изменяется два раза за период промышленной частоты. Массив значений напряжения пробоя  $U_{пр}$  формируется по результатам расчета математической модели. В него входят не все элементы, полученные на выходе генератора случайных чисел, а лишь те значения, при которых произошел пробой изоляции. В результате этого закон распределения напряжения

пробоя, как будет показано далее, может отличаться от нормального, и его нормальность определяется величиной sample time.

Расчеты показали, что при  $M(U_{пр}) = (0,6 - 0,9)U_{\phi}$  и sample time = 0,01 с количество пробоев на периоде промышленной частоты чаще всего оказывается равным 2, реже – 3, 4. В такой ситуации на одно изменение напряжения пробоя приходится один пробой. Это позволяет, во-первых, сформировать массив значений напряжения пробоя с заданным законом распределения, во-вторых, добиться того, чтобы следующие друг за другом пробои происходили при разном значении  $U_{пр}$ , что позволит корректно сравнить закон распределения кратности перенапряжений с законом распределения напряжения пробоя.

В ходе расчетов было выявлено, что при  $M(U_{пр}) < 0,6U_{\phi}$  и sample time = 0,01 с количество пробоев при одном и том же  $U_{пр}$  может составлять 3 и более, при этом число пробоев за период промышленной частоты достигает 6 и более. Это приводит к тому, что закон распределения напряжения пробоя становится отличным от нормального. Несомненно, многократные пробои изоляции за один период промышленной частоты являются вероятными, однако для соблюдения условия нормальности закона распределения напряжения пробоя последующие друг за другом пробои должны происходить при различных  $U_{пр}$ . Нормальность напряжения пробоя достигается корректировкой величины sample time генератора случайных чисел до тех пор, пока напряжение пробоя не начнет изменяться по нормальному закону распределения.

Вышеуказанные доводы проиллюстрированы на рис. 4, где приведено напряжение поврежденной фазы в режиме ОДЗ, напряжение пробоя, изменяющееся случайным образом, логический сигнал управления ключом  $K$  для случая нормального закона распределения напряжения пробоя (рис. 4, а) и нарушения нормальности (рис. 4, б) ввиду завышенного значения sample time. Следует еще раз подчеркнуть, что именно многократные следующие друг за другом пробои при одинаковом  $U_{пр}$  приводят к отклонению закона распределения напряжения пробоя от нормального.

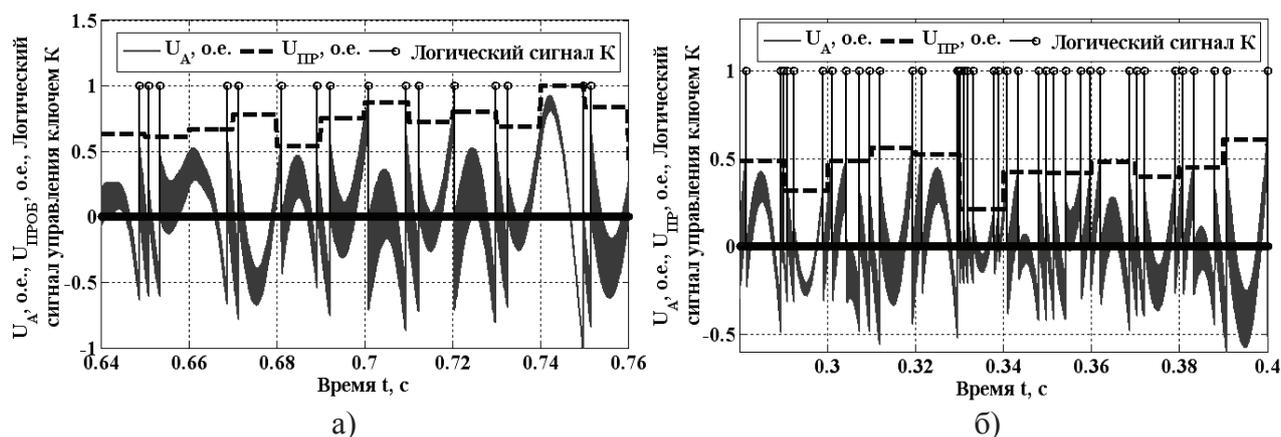


Рис. 4. Напряжение поврежденной фазы в режиме ОДЗ, напряжение пробоя, изменяющееся случайным образом, логический сигнал управления ключом  $K$  для случая нормального закона распределения напряжения пробоя (а) и нарушения нормальности (б)

На рис. 5 приведен фрагмент расчетной кривой фазных напряжений неповрежденных фаз (В и С) при возникновении ОДЗ в фазе А и нормальном законе распределения напряжения пробоя с параметрами  $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$ ,  $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$ . Эмпирическая и теоретическая функции распределения кратности перенапряжений приведены на рис. 6, а, эмпирическая и теоретическая плотности распределения кратности перенапряжений приведены на рис. 6, б.

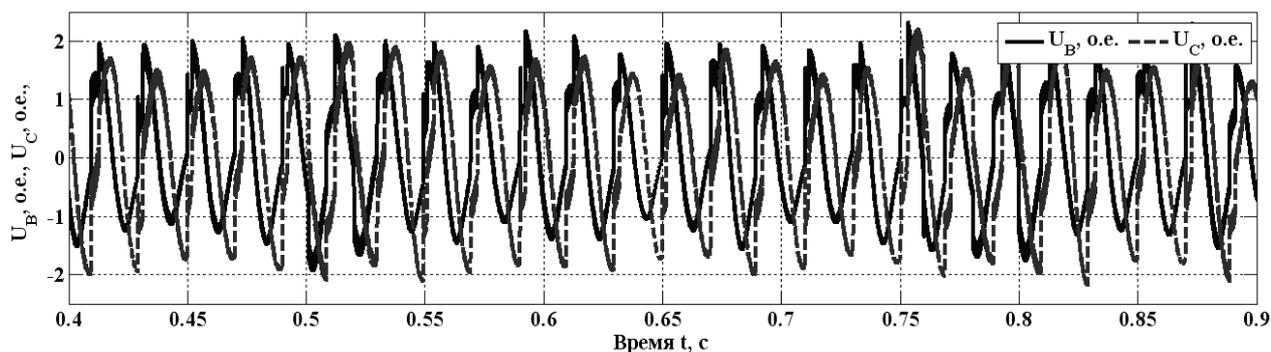


Рис. 5. Расчетная кривая фазных напряжений неповрежденных фаз (В и С) при возникновении ОДЗ в фазе А и нормальном законе распределения напряжения пробоя с параметрами  $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$ ,  $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$

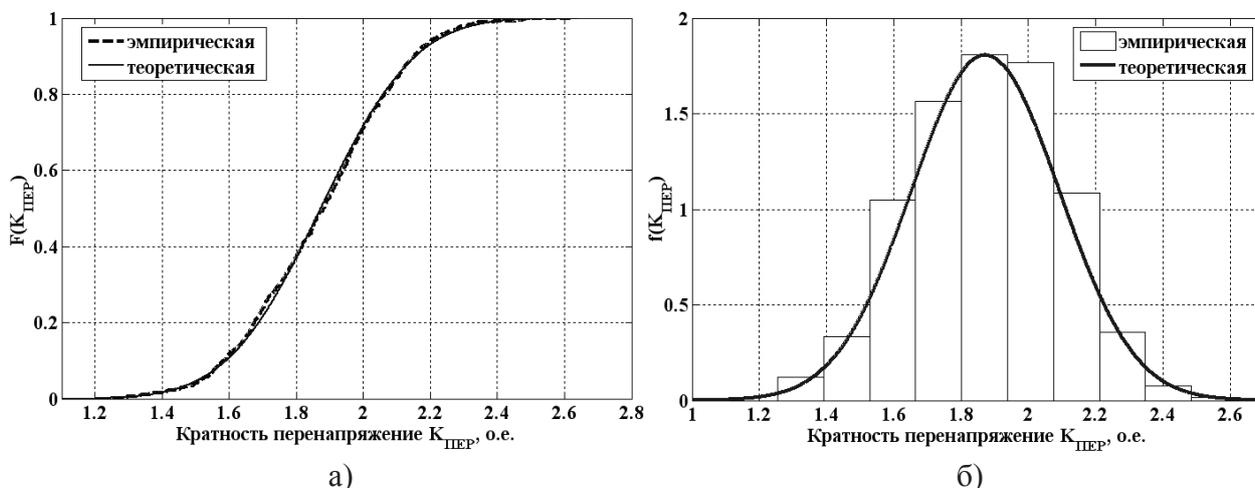


Рис. 6. Эмпирическая и теоретическая функции распределения кратности перенапряжений (а), эмпирическая и теоретическая плотности распределения кратности перенапряжений (б) при нормальном законе распределения напряжения пробоя с параметрами  $M(U_{пр}) = 0,8U_{\phi}$ ,  $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$

Согласно критерию согласия Пирсона гипотеза о нормальности закона распределения кратности перенапряжений не отвергается при доверительной вероятности 0,99. Полученный закон распределения имел следующие параметры:  $M(K_{пер}) = 1,87U_{\phi}$ ,  $\sigma(K_{пер}) = 0,22U_{\phi}$ ,  $K_{max} = 2,62U_{\phi}$ . Проанализировав полученную функцию распределения (рис. 6, а), можно сделать вывод, что при заданных вероятностных характеристиках заземляющей дуги с вероятностью 0,99 кратность перенапряжений не превысит  $2,4U_{\phi}$ .

Важным свойством стационарных случайных процессов является эргодичность, на основе которого свойства случайного процесса можно определить по одной наблюдаемой реализации [10]. Согласно теореме Слуцкого необходимым и достаточным условием эргодичности является затухание автокорреляционной функции (АКФ) случайной величины. Внешний вид нормированной АКФ напряжения пробоя приведен на рис. 7, а. Очевидно, что в данном случае процесс изменения напряжения пробоя можно считать эргодическим. На рис. 7, б приведена нормированная АКФ для кратности перенапряжений. Как следует из результатов, процесс изменения кратности перенапряжений также эргодический, что позволяет по единственной реализации судить обо всем ансамбле реализаций. Отметим, что результаты расчета АКФ соответствуют процессу ОДЗ, рассмотренному на рис. 5.

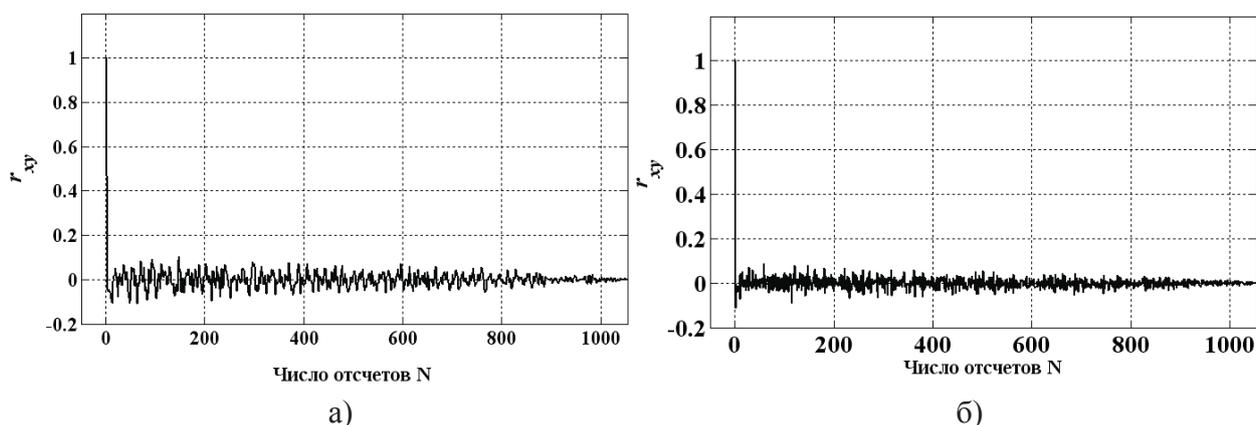


Рис. 7. Нормированная АКФ для напряжения пробоя (а) и кратности перенапряжений (б) в режиме ОДЗ

Приведенные выше результаты подчеркивают важность мониторинга переходных процессов в действующих сетях. Накопление статистической информации о параметрах переходных процессов в электрической сети позволит создать прогностическую модель для оценки риска появления перенапряжений той или иной кратности с заданной вероятностью.

Исследования показали, что при значениях математического ожидания напряжения пробоя  $M(U_{пр}) = (0,3 - 0,5)U_{\phi}$  и нормальном законе распределения напряжения пробоя, закон распределения кратности перенапряжений оказывается отличным от нормального. На рис. 8 приведена эмпирическая и теоретическая функции распределения (рис. 8, а) и плотности распределения (рис. 8, б) кратности перенапряжений для случая нормального закона распределения напряжения пробоя с параметрами  $M(U_{пр}) = 0,5U_{\phi}$ ,  $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$ . Теоретические характеристики соответствуют нормальному закону распределения.

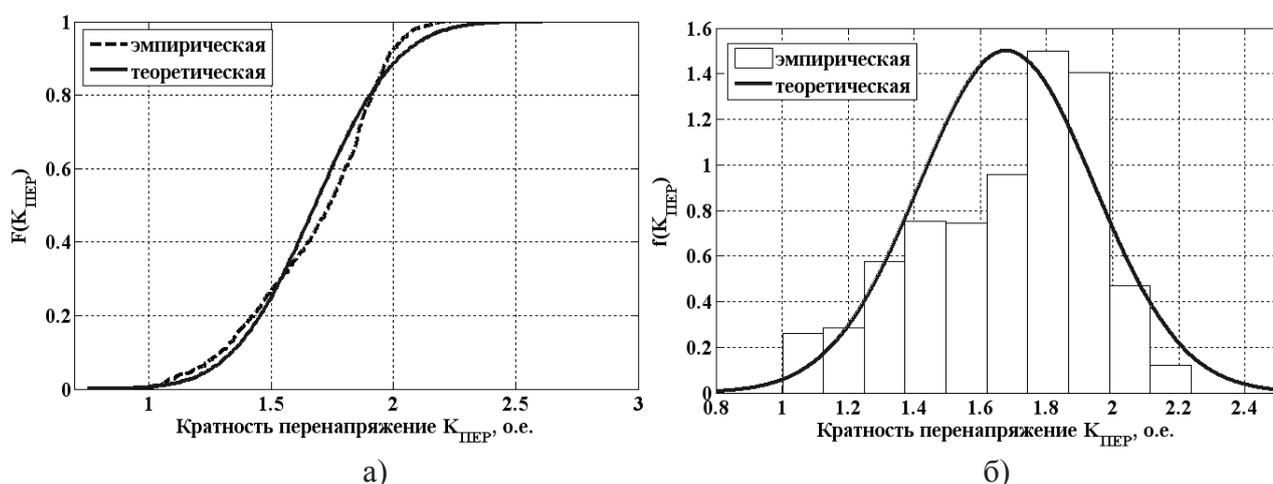


Рис. 8. Эмпирическая и теоретическая функции распределения кратности перенапряжений (а), эмпирическая и теоретическая плотности распределения кратности перенапряжений (б) при нормальном законе распределения напряжения пробоя с параметрами  $M(U_{пр}) = 0,5U_{\phi}$ ,  $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$

Гипотеза о нормальности закона распределения кратности перенапряжений была отвергнута. Статистический анализ показал, что коэффициент эксцесса составляет  $-0,52$ , коэффициент асимметрии составляет  $-0,54$ . Как следует из визуального анализа кривой  $f(K_{пер})$ , значительная часть перенапряжений приходится на диапазон  $(1 - 1,6)U_{\phi}$ . Их доля составляет 37 %, что и приводит к отклонению закона распределения от нормального.

Физически это обусловлено тем, что при низких напряжениях пробоя порядка  $(0,3 - 0,5)U_{\phi}$  кратности перенапряжений слабо зависят от напряжения пробоя и оказываются практически неизменными.

Для определения вероятности появления кратности перенапряжений той или иной величины в случае неизвестного (нестандартного) закона распределения случайной величины следует использовать эмпирическую функцию распределения. Для определения вероятностных утверждений в форме  $M(K_{\text{пер}}) - k \cdot \sigma(K_{\text{пер}}) \leq K_{\text{пер}} \leq M(K_{\text{пер}}) + k \cdot \sigma(K_{\text{пер}})$  возможно применение неравенства Чебышева [10].

Еще одной причиной, приводящей к отклонению закона распределения кратности перенапряжений от нормального, является нестабильность горения заземляющей дуги. В предложенной математической модели длительность бестоковых пауз в процессе ОДЗ не превышала 10 мс. За такой короткий промежуток времени свободные заряды с емкости нулевой последовательности не успевают стекать на землю, поэтому последующие пробои происходят при ненулевых начальных условиях. В случае если за время бестоковой паузы фазные емкости потеряют избыточный заряд, то последующие пробои будут возникать при нулевых начальных условиях, а именно, при нулевом напряжении смещения нейтрали сети. Исследования на математической модели показывают, что кратность перенапряжений в момент пробоя при нулевых начальных условиях оказываются существенно выше, чем при ненулевых условиях. Поэтому при значительной длительности бестоковых пауз вероятность появления более высоких кратностей перенапряжений повышается, а закон распределения случайной величины отклоняется от нормального. Длительность бестоковых пауз в режиме ОДЗ подвержена значительному разбросу и зависит от таких факторов как величина тока замыкания на землю, состояние и тип изоляции в месте повреждения, скорость роста диэлектрической прочности в месте дефекта и др. Так, например, согласно экспериментальным данным, приведенным в [1], для кабелей с бумажно-масляной изоляцией типа ААШв-10 3х70 длительность бестоковых пауз в режиме ОДЗ составила  $M(\Delta t) = 73,2$  с,  $\sigma(\Delta t) = 23,5$  с.

В отечественной технической литературе для классификации заземляющих дуг по длительности бестоковых пауз часто используют термины «перемежающаяся дуга» и «прерывистая дуга». Для перемежающейся дуги характерно, что процесс последующих дуг за другом пробоев происходит непрерывно при ненулевых начальных условиях. Прерывистая дуга характеризуется длительными бестоковыми паузами, за которые напряжение смещения нейтрали практически полностью затухает к моменту следующего пробоя. В рамках данной статьи при моделировании рассматривался только режим горения перемежающейся дуги.

Для оценки взаимосвязи между напряжением пробоя и кратностью перенапряжений было выполнено моделирование процесса ОДЗ с учетом случайного характера заземляющей дуги при различных параметрах закона распределения напряжения пробоя. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Проанализировав результаты, приведенные в табл. 1, можно сделать вывод, что с ростом напряжения пробоя увеличивается кратность перенапряжений. Для количественной оценки связи между этими величинами был определен коэффициент корреляции  $r_{xy}$  при различных значениях  $\sigma(U_{\text{пр}})$ . Независимо от величины  $\sigma(U_{\text{пр}})$  коэффициент корреляции оказался равен порядка 0,99, что подтверждает значительную взаимосвязь между напряжением пробоя и кратностью перенапряжений.

#### Выводы

1. Заземляющая дуга имеет все признаки случайных процессов, поэтому для получения корректных результатов при математическом моделировании процессов ОДЗ необходим учет ее случайной природы. Моделирование процесса горения заземляющей дуги по

классическим теориям перенапряжений приводит к завышенным кратностям перенапряжений.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров кратности перенапряжения в режиме ОДЗ с учетом случайного характера заземляющей дуги при различных параметрах закона распределения напряжения пробоя

Параметр	Результаты расчета при $\sigma(U_{пр}) = 0,05U_{\phi}$							
$M(U_{пр}),$ о.е.	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
$M(K_{пер}),$ о.е.	1,66	1,73	1,77	1,83	1,88	1,96	1,99	2,05
$\sigma(K_{пер}),$ о.е.	0,26	0,25	0,22	0,21	0,22	0,19	0,2	0,19
Параметр	Результаты расчета при $\sigma(U_{пр}) = 0,1U_{\phi}$							
$M(U_{пр}),$ о.е.	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
$M(K_{пер}),$ о.е.	1,66	1,73	1,76	1,83	1,87	1,92	2	2,09
$\sigma(K_{пер}),$ о.е.	0,25	0,24	0,24	0,23	0,24	0,24	0,24	0,26
Параметр	Результаты расчета при $\sigma(U_{пр}) = 0,15U_{\phi}$							
$M(U_{пр}),$ о.е.	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
$M(K_{пер}),$ о.е.	1,65	1,72	1,75	1,79	1,87	1,9	2	2,06
$\sigma(K_{пер}),$ о.е.	0,25	0,24	0,25	0,26	0,25	0,26	0,27	0,29

2. Между кратностью перенапряжений и напряжением пробоя была выявлена положительная корреляционная связь, коэффициент корреляции оказался равен 0,99. При моделировании важным аспектом является корректный учет величины напряжения пробоя. При  $M(U_{пр}) \geq 0,6U_{\phi}$  закон распределения кратности перенапряжений совпадает с законом распределения напряжения пробоя и оказывается нормальным. При  $M(U_{пр}) < 0,6U_{\phi}$  закон распределения кратности перенапряжений отклоняется от нормального, что поясняется слабой зависимостью кратности перенапряжений от напряжения пробоя при низком значении  $U_{пр}$ .

3. Использование вероятностных подходов при решении проблемы дуговых перенапряжений в действующих сетях позволяет прогнозировать вероятность появления перенапряжения той или иной кратности, т.е. выполнять прогностическую функцию. При этом важным аспектом является мониторинг переходных процессов в действующих сетях и выявление всех закономерностей, необходимых для создания прогностической модели.

**Список использованной литературы:**

1. Ширковец А. И. Исследование и моделирование электромагнитных процессов при замыканиях на землю в кабельных сетях с неэффективным заземлением нейтрали: автореф. дис: ... канд. техн. наук: спец. 05.14.12 / А. И. Ширковец; [Новосибирский гос. техн. ун-т]. – Новосибирск, 2013. – 24 с.
2. Сивокобыленко В. Ф. Повышение надежности работы карьерных сетей при однофазных замыканиях

на землю / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, А. В. Ковязин и др. // Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия: «Электротехника и энергетика» – Донецьк, 2009. – Вып. 9(158). – С. 211–220.

3. Шалин А. И. Замыкания на землю в сетях 6-35 кВ. Направленные защиты. Влияние электрической дуги на направленные защиты / А. И. Шалин // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 1 (37). – Режим доступа : URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/37/06.php>

4. Сивокобыленко В. Ф. Повышение надежности работы сетей 6-10 кВ при замыкании фазы на землю / В. Ф. Сивокобыленко, В. К. Лебедев, Р. П. Сердюков // Научные работы Донецкого национального технического университета. Серия «Электротехника и энергетика» – Донецьк, 2011. – Вып. № 11(186). – С. 348–352.

5. Whei-Min Lin, Chin-Der Yang, Jia-Hong, Ming-Tong Tsaj // IEEE Transactions on Power Delivery. – Vol. 16, Oct. – 2001. – No.4. – P. 473–477.

6. Mokryani G. A Novel Technique for Ferroresonance Identification in Distribution Networks / G. Mokryani, M. Haghifam, J. Esmailpoor // International Journal of Electrical, Computer and System Engineering. – Vol. 1. – 2007. – P. 103–108.

7. Ширковец А. И. Исследование переходных процессов при однофазных замыканиях на землю в сети 6 кВ ТЭЦ металлургического комбината с комбинированным заземлением нейтрали / А. И. Ширковец, Л. И. Сарин, М. В. Ильиных, Э. В. Буянов // Энергетика и электрификация. – 2008. – №8. – С. 39–47.

8. Nagy I. E. Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks: Doctoral Dissertation. Helsinki University of Technology Department of Electrical and Communications Engineering Power Systems and High Voltage Engineering. – 2007. – P. 153.

9. Кадомская К. П. Диагностика и мониторинг кабельных сетей среднего напряжения / К. П. Кадомская, В. Е. Качесов, Ю. А. Лавров, А. Г. Овсянников, В. В. Сахно // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48–51.

10. Бендат Д. Прикладной анализ случайных процессов / Д. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир. – 1989. – 540 с.

#### References:

1. Shirkovets, A. I. (2013), Research and simulation of electromagnetic processes in the earth faults in cable networks with earthed ineffective: abstract of a thesis ... cand. techn. Sciences: specialty 05.14.12, Novosibirsk State Technical University [Issledovanie i modelirovanie jelektromagnitnyh processov pri zamykanijah na zemlju v kabel'nyh setjah s nejeffektivnym zazemleniem nejtrali: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk: spec. 05.14.12, Novosibirskij gos. tehn. un-t], Novosibirsk, 24 p.

2. Sivokobylenko, V. F., Lebedev, V. K., Kovyazin, A. V. & others. (2009), Improving the reliability of the career network in the single-phase earth faults, *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: "Electrical and Energy"* [Povyshenie nadezhnosti raboty kar'ernyh setej pri odnofaznyh zamykanijah na zemlju, *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universytetu. Serija: "Elektrotehnika i energetyka"*], Donetsk, vol. 9 (158), P. 211–220.

3. Shalin, A. I. (2006), Earth faults in networks of 6-35 kV. Directed protections. Effect of the electric arc on the directed protection [Zamykanija na zemlju v setjah 6-35 kV. Napravlennye zashhity. Vlijanie jelektricheskoy dugi na napravlennye zashhity], *Electrical Engineering News*, no 1 (37). Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/37/06.php>

4. Sivokobylenko, V. F., Lebedev, V. K., Serdyukov, R. P. (2011), Improving the reliability of the networks 6-10 kV at the earth fault of phase, *Scientific papers of Donetsk National Technical University. Series: "Electrical and Energy"* [Povyshenie nadezhnosti raboty setej 6-10 kV pri zamykanii fazy na zemlju, *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo tehnicnogo universytetu. Serija: "Elektrotehnika i energetyka"*], Donetsk, vol. 11 (186), P. 348–352.

5. Whei-Min Lin, Chin-Der Yang, Jia-Hong, Ming-Tong Tsaj. (2001), A Fault Classification Method by RBF Neural Network With OLS Learning Procedure, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, P. 473–477.

6. Mokryani, G., Haghifam, M., Esmailpoor, J. (2007), A Novel Technique for Ferroresonance Identification in Distribution Networks, *International Journal of Electrical, Computer and System Engineering*, vol. 1, P. 103–108.

7. Shirkovec, A. I., Sarin, L. I., Il'inyh, M. V., Bujanov, Je. V. (2008), Research of transients at single-phase earth faults in the network of 6 kV HES metallurgical plant with combined neutral grounding [Issledovanie perehodnyh processov pri odnofaznyh zamykanijah na zemlju v seti 6 kV TJeC metallurgicheskogo kombinata s kombinirovannym zazemleniem nejtrali], *Energy and Electrification*, no 8, P. 39–47.

8. Nagy, I. E. (2007), Modeling and Detection of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks: Doctoral Dissertation. Helsinki University of Technology Department of Electrical and Communications Engineering Power Systems and High Voltage Engineering, Helsinki, 153 p.

9. Kadomskaja, K. P., Kachesov, V. E., Lavrov, Ju. A., Ovsjannikov, A. G., Sahno, V. V. (2000), Diagnostics and monitoring of medium-voltage cable networks [Diagnosticska i monitoring kabel'nyh setej srednego naprjazhenija], *Electrical Engineering*, no 11, pp. 48-51.

10. Bendat, D., Pirsol, A. (1989), Applied analysis of stochastic processes [Prikladnoj analiz sluchajnyh processov], M.: Mir, 540 p.

Поступила в редакцию 06.08 2015 г.