

Д.Г.КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Г.М.КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
А.А.ПЕТКОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ НА ОБОРУДОВАНИИ ПОДСТАНЦИЙ С УЧЕТОМ СТАТИСТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА РАСЧЕТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА

У роботі запропонований ймовірнісний підхід до визначення напруги дотику з урахуванням статистичного характеру розрахунків опору ґрунту. Представлено методику оцінки можливості появи значення напруги дотику вище припустимої величини із заданою ймовірністю.

In work the probabilistic approach to definition of touch voltage taking into account a statistical character of ground resistance calculations is offered. The method of an occurrence possibility estimation of touch voltage value above allowable value with the specified probability is presented.

В работе предложен вероятностный подход к определению контактного напряжения с учетом статистического характера расчетов сопротивления почвы. Представлена методика оценки возможности появления значения контактного напряжения выше допустимой величины с заданной вероятностью.

Постановка проблемы и анализ нормативной базы. Во всех электротехнических устройствах (открытые и закрытые распределительные устройства, автоматические телефонные станции, насосно-перекачивающие станции, машинные и компьютерные залы и т.д.) одним из основных элементов является заземляющее устройство (ЗУ), которое обеспечивает нормальное функционирование оборудования и безопасность обслуживающего персонала [1]. Наиболее сложным по конструктивному выполнению является ЗУ открытых распределительных устройств (ОРУ) станций и подстанций напряжением 110 кВ и выше. В настоящий момент исправность таких ЗУ контролируется по следующим параметрам [2]:

- 1) конструктивному выполнению;
- 2) сопротивлению ЗУ;
- 3) напряжению прикосновения;
- 4) потенциалу на ЗУ.

В соответствии с [2] ЗУ электроустановок выше 1 кВ с глухозаземленной нейтралью могут выполняться по требованиям к допустимому сопротивлению или напряжению прикосновения. Однако, если при проектировании ЗУ по требованиям к напряжению прикосновения сопротивление ЗУ не нормируется, то при проектировании ЗУ по требованию к допустимому сопротивлению напряжение прикосновения также должно удовлетворять требованиям ПУЭ. Поэтому измерение или расчет значения напряжения прикосно-

вения необходимо производить для ЗУ всех подстанций выше 1 кВ с глухозаземленной нейтралью.

На величину напряжения прикосновения влияет ряд факторов: амплитуда аварийного тока, сопротивление грунта, на котором расположена подстанция, сопротивление подстилающего слоя вблизи оборудования, а также конструктивное исполнение ЗУ. Грунт в районе расположения подстанций обычно имеет многослойную структуру, параметры которой определяются по результатам вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). При использовании существующей методики расчетов напряжения прикосновения [3] многослойную модель грунта приводят к двухслойной модели [4]. При этом в силу особенностей используемого математического аппарата, определяемые параметры двухслойной модели имеют статистический характер.

Целью настоящей работы является учет статистического характера параметров расчетной двухслойной модели грунта при определении значения напряжения прикосновения на оборудовании подстанции.

Материалы и результаты исследования. Как отмечалось выше, в настоящее время расчет напряжения прикосновения при возникновении на объекте аварийных режимов производится по математической модели ЗУ, использующей двухслойную модель грунта, разработанной в НИПКИ «Молния» [3]. В электроустановках выше 1000 В с глухозаземленной нейтралью наиболее частым аварийным режимом является однофазное короткое замыкание на землю (до 92 % от общего числа [5]). Для указанных объектов, которые не имеют в своем составе генерирующие мощности, от 70 до 100 % тока КЗ возвращается в систему через грунт, поэтому правильная интерпретация результатов ВЭЗ существенно влияет на полученные значения потенциалов. Напряжение прикосновения определяется как разность потенциала заданного оборудования и потенциала на поверхности земли на расстоянии 0,8 м от места обслуживания. Модель грунта, полученная по результатам ВЭЗ, характеризуется удельным сопротивлением первого слоя ρ_1 , глубиной первого слоя h_1 , удельным сопротивлением второго слоя ρ_2 и максимальным относительным отклонением аппроксимирующей кривой от данных ВЭЗ Δ (погрешность аппроксимации). Погрешность аппроксимации связана с двумя основными факторами:

1) грунт может иметь три и более слоев, что вызывает необходимость производить аппроксимацию многослойной структуры двухслойной. При этом вносится погрешность в процессе эквивалентирования сопротивлений слоев, а также глубины первого слоя. (зачастую она не совпадает с реальной глубиной первого слоя).

2) при аппроксимации многослойного грунта двухслойной моделью используются численные методы, для которых характерна ограниченная точность вычислений [4].

Программа аппроксимации данных ВЭЗ двухслойной моделью [4] включает метод генерирования случайной исходной точки процесса минимизации максимального отклонения Δ . В силу сложного рельефа минимизируемой целевой функции это приводит к тому, что одно и тоже максимальное отклонение Δ достигается при различных сочетаниях параметров двухслойной модели грунта ρ_1 , h_1 и ρ_2 . Так как именно эти параметры являются исходными данными для математической модели, то при одной и той же погрешности аппроксимации Δ можно получить различные значения напряжения прикосновения. При этом наборы численных значений ρ_1 , h_1 , ρ_2 являются случайными, а, следовательно, и напряжение прикосновения является случайной величиной.

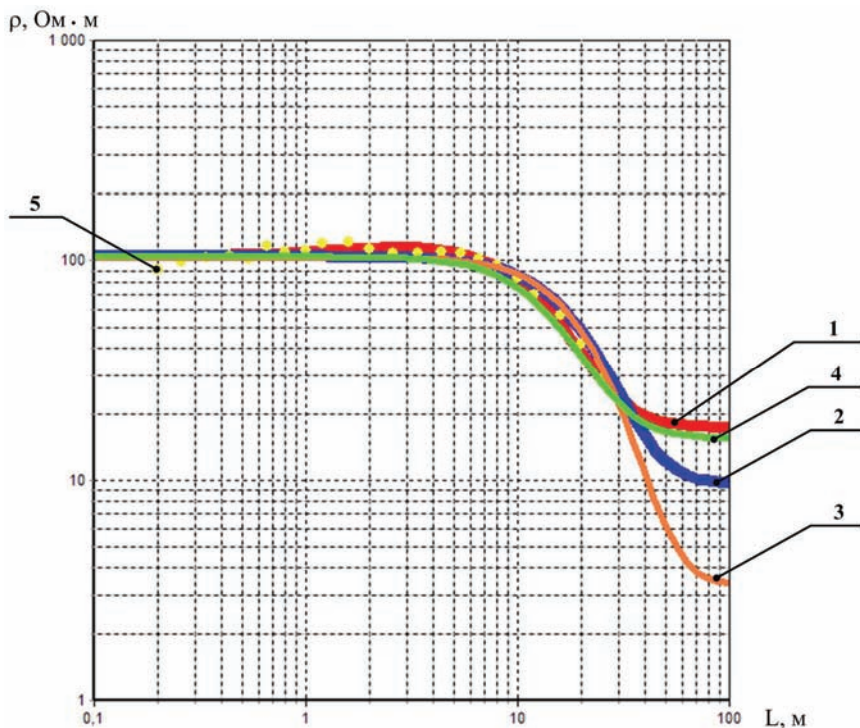


Рисунок 1 – Аппроксимация результатов ВЭЗ для подстанции первого типа:
 1 – трехслойной моделью ($\rho_1 = 105 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 0,8 \text{ м}$; $\rho_2 = 120 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_2 = 7 \text{ м}$; $\rho_3 = 17 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
 2 – двухслойной моделью ($\rho_1 = 104,24 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 12,51 \text{ м}$; $\rho_2 = 9,35 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
 3 – двухслойной моделью ($\rho_1 = 103,43 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 13,58 \text{ м}$; $\rho_2 = 3,26 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
 4 – двухслойной моделью ($\rho_1 = 104,35 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 9,3 \text{ м}$; $\rho_2 = 15,23 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
 5 – экспериментальные данные

Для оценки степени влияния статистического характера параметров двухслойной модели грунта на напряжение прикосновения были проведены расчеты с использованием данных диагностики двух типов подстанций:

- тип 1: экспериментальные данные ВЭЗ хорошо согласуются с двухслойной моделью грунта (рис. 1, зависимость 5 набор экспериментальных точек);
- тип 2: экспериментальные данные ВЭЗ хорошо согласуются с трехслойной моделью грунта (рис. 2, зависимость 5 набор экспериментальных точек).

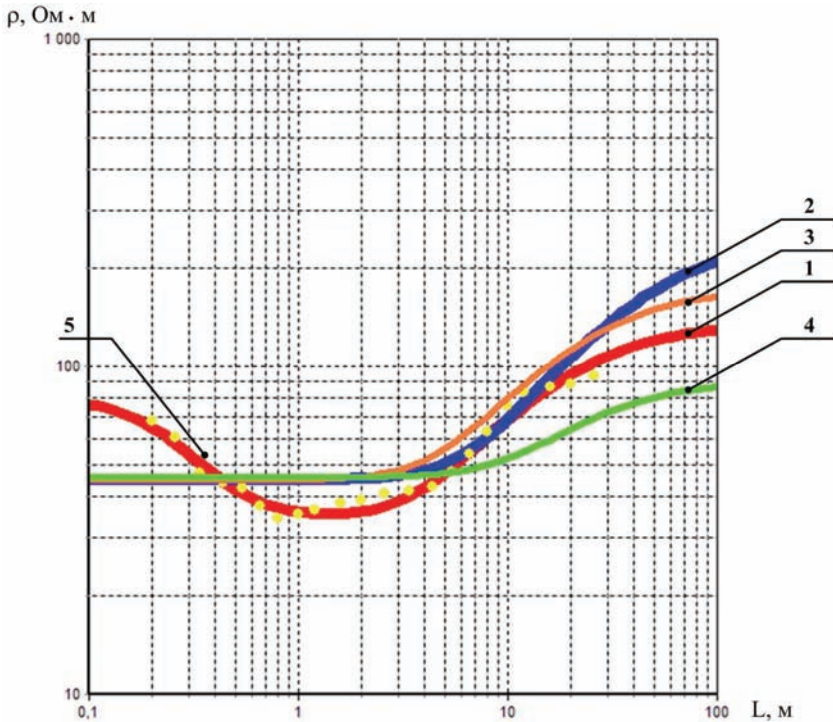


Рисунок 2 – Аппроксимация результатов ВЭЗ второго типа:

- 1 – трехслойной моделью ($\rho_1 = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 0,17 \text{ м}$; $\rho_2 = 34 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_2 = 3,8 \text{ м}$; $\rho_3 = 134 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
- 2 – двухслойной моделью ($\rho_1 = 44,88 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 7,47 \text{ м}$; $\rho_2 = 246,88 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
- 3 – двухслойной моделью ($\rho_1 = 44,79 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 5,02 \text{ м}$; $\rho_2 = 172,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
- 4 – двухслойной моделью ($\rho_1 = 45,78 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $h_1 = 9,64 \text{ м}$; $\rho_2 = 90,28 \text{ Ом} \cdot \text{м}$);
- 5 – экспериментальные данные

На рис. 1 и рис. 2 кривые 1 представляют аппроксимацию данных ВЭЗ трехслойной моделью, кривые 2 – 4 представляют варианты аппроксимации

данных ВЭЗ двухслойной моделью с различными сочетаниями значений ρ_1 , h_1 , ρ_2 при одной и той же погрешности аппроксимации (L – расстояние между токовыми электродами в опыте ВЭЗ).

На рис. 3 и рис. 4 приведена характерная плотность распределения значений напряжения прикосновения до и после выполнения рекомендаций по ремонту ЗУ (применительно к расчетной модели ЗУ).

Данные получены для 50 случайных комбинаций параметров ρ_1 , h_1 , ρ_2 , которые соответствуют одной и той же погрешности аппроксимации (для подстанции 1-го типа $\Delta = 15\%$, для подстанции 2-го типа $\Delta = 34\%$). На рисунках обозначено: q – плотность распределения значений напряжения прикосновения, $U_{пр}$ – значение напряжения прикосновения, $U_{пр\ ср}$ – среднее значение напряжения прикосновения, σ – среднее квадратическое отклонение напряжения прикосновения.

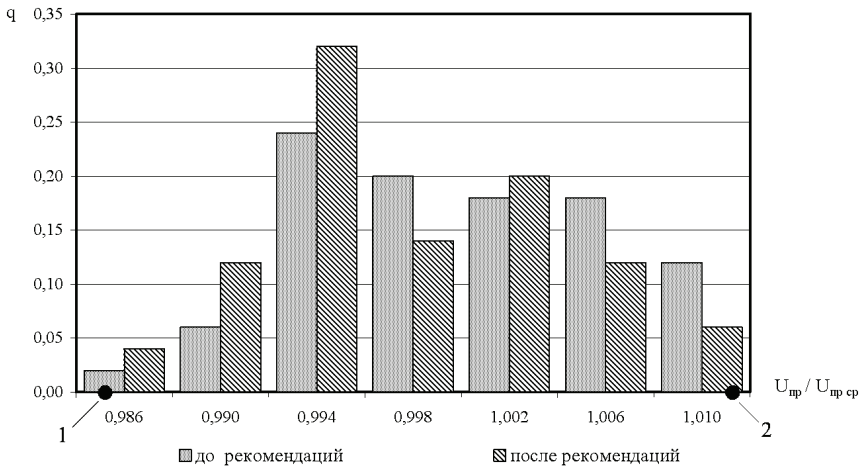


Рисунок 3 – Плотность распределения значений напряжения прикосновения для подстанции 1-го типа:

до выполнения рекомендаций ($U_{пр\ ср} = 249$ В; $\sigma = 2$ В);

после выполнения рекомендаций ($U_{пр\ ср} = 204$ В; $\sigma = 1,5$ В)

Проверка по критерию W [6] показала, что данные распределений могут подчиняться как нормальному закону, так и законам, отличным от нормального. Использование выборок (наборов параметров двухслойной модели) большого объема приводит к резкому возрастанию объема расчетов, а следовательно, и времени обработки. В связи с этим был проведен анализ выборок минимального объема (3 набора параметров) для ряда подстанций. Результаты анализа показали, что коэффициент вариации напряжения прикосновения (определяемый по соотношению $V = 100 \sigma / U_{пр\ ср}$, %) изменялся: для подстанций 1-го типа от 0,5 % до 1,2 %, для подстанций 2-го типа от 0,2 % до

12 %. Это подтверждает существенное влияние процедуры обработки данных ВЭЗ на величину напряжения прикосновения. Проверка показала, что распределение значений напряжения прикосновения могли, как подчиняться, так и отличаться от нормального закона.

Результаты проведенного анализа позволяют определять вероятность превышения напряжения прикосновения на оборудовании подстанции некоторой величины $P(U_{\text{пр}} \geq U_{\text{пр}}^*)$ следующим образом.

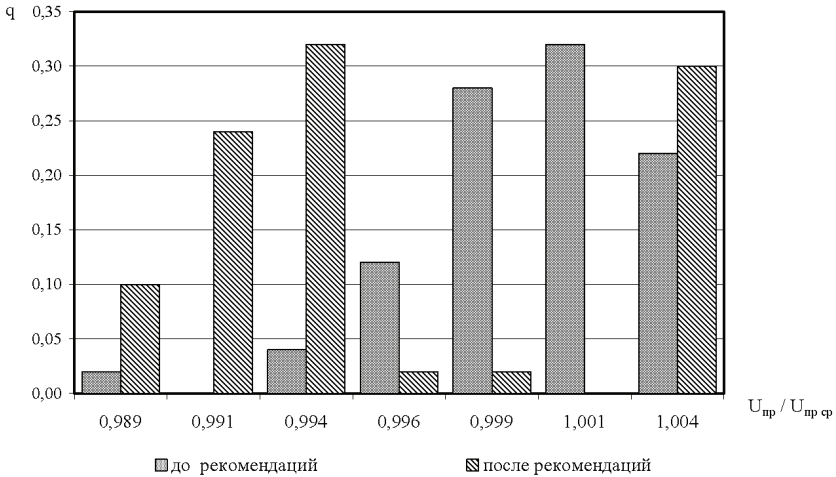


Рисунок 4 – Плотность распределения значений напряжения прикосновения для подстанции 2-го типа:

до выполнения рекомендаций ($U_{\text{пр ср}} = 478 \text{ В}$; $\sigma = 2 \text{ В}$);

после выполнения рекомендаций ($wU_{\text{пр ср}} = 154 \text{ В}$; $\sigma = 4 \text{ В}$)

В случае подтверждения нормального закона распределения напряжения прикосновения [7]

$$P(U_{\text{пр}} \geq U_{\text{пр}}^*) = 1 - N(U_{\text{пр ср}}, \sigma, U_{\text{пр}}^*), \quad (1)$$

где $U_{\text{пр}}^*$ – допустимое (граничное) значение напряжения прикосновения;

$N(U_{\text{пр ср}}, \sigma, U_{\text{пр}}^*)$ – значение функции нормального распределения при допустимом значении напряжении прикосновения равного $U_{\text{пр}}^*$;

$U_{\text{пр ср}}$, σ – соответственно среднее значение напряжения прикосновения и его среднее квадратическое отклонение.

В случае если распределение отличается от нормального, вероятность превышения значений напряжения прикосновения на оборудовании подстанции некоторой величины определяется по следующему соотношению:

$$P(U_{\text{пр}} \geq U_{\text{пр}}^*) = 1 - F(U_{\text{пр}}^*), \quad (2)$$

где $F(U_{\text{пр}}^*)$ – значение функции распределения напряжения прикосновения

при $U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}^*$.

Ввиду стремления к минимизации объема производимых расчетов, для вычисления $F(U_{\text{пр}}^*)$ предлагается следующая упрощенная методика, исключающая определение вида функции распределения $F(U_{\text{пр}})$.

Пусть нам известны три случайных значения напряжения прикосновения $U_1 \leq U_2 \leq U_3$ (см. рис. 5), причем одновременное равенство всех трех значений исключается. Тогда ломаная кривая $abcdefg$ является эмпирической функцией распределения напряжения прикосновения, построенной по методике, применяемой для дискретных значений [7]. Используя приведенную эмпирическую функцию распределения, можем дать верхнюю и нижнюю оценку ее значения $F(U_{\text{пр}}^*)$ при некотором граничном значении напряжения прикосновения, для определения которых используется линейная интерполяция и экстраполяция.

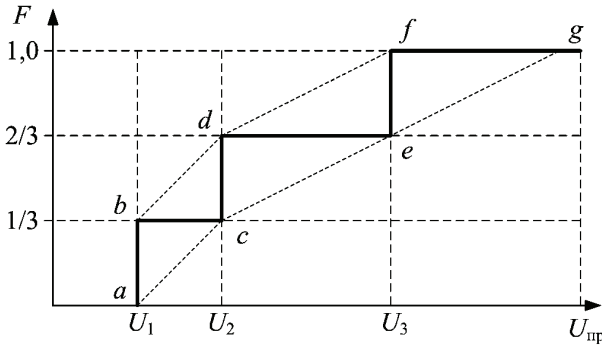


Рисунок 5 – Иллюстрация определения значений функции распределения

Если $U_{\text{пр}}^*$ находится в интервале $[U_1, U_2)$, то нижняя граница ac и верхняя граница bd определяются по следующим соотношениям:

$$F(U_{\text{пр}}^*)_{\min} = F(a) + \frac{F(c) - F(a)}{U_2 - U_1} (U_{\text{пр}}^* - U_1); \quad (3)$$

$$F(U_{\text{пр}}^*)_{\max} = F(b) + \frac{F(d) - F(b)}{U_2 - U_1} (U_{\text{пр}}^* - U_1). \quad (4)$$

Если $U_{\text{пр}}^*$ находится в интервале $[U_2, U_3)$, то для определения нижней границы ce и верхней границы df используются следующие соотношения:

$$F(U_{\text{пр}}^*)_{\min} = F(c) + \frac{F(e) - F(c)}{U_3 - U_2} (U_{\text{пр}}^* - U_2); \quad (5)$$

$$F(U_{\text{пр}}^*)_{\max} = F(d) + \frac{F(f) - F(d)}{U_3 - U_2} (U_{\text{пр}}^* - U_2). \quad (6)$$

где $F(a), \dots, F(e)$ – значение эмпирической функции в точках a, \dots, e .

При $U_{\text{пр}}^* \geq U_3$ нижняя граница eg и верхняя граница fg определяются

следующим образом: $F(U_{\text{пр}}^*)_{\min}$ – по соотношению (5), $F(U_{\text{пр}}^*)_{\max} = 1$.

В практических расчетах чаще всего вызывает интерес вероятность появления напряжения прикосновения превышающего U_3 . Для этого варианта отличие верхней и нижней оценок всегда меньше чем разность $1 - F(e)$, которая уменьшается по мере увеличения граничного значения $U_{\text{пр}}^*$. Если все же отличие верхней и нижней оценок функции распределения не удовлетворяет практической потребности, то необходимо увеличить объем выборки. Далее привести проверку закона распределения и, в зависимости от ее результатов, вычислить вероятность по одному из рассмотренных вариантов.

Применяемая в настоящее время точечная оценка напряжения прикосновения [3] имеет два существенных недостатка.

Если рассчитанное значение напряжения прикосновения принадлежит левой области распределения (см. рис. 3, точка 1), то с большой вероятностью на оборудовании могут возникнуть более высокие значения напряжения прикосновения, которые могут превысить допустимую величину.

Если рассчитанное значение напряжения прикосновения принадлежит правой области распределения с малой плотностью появления (см. рис. 3, точка 2) и для него не выполняются условия допустимости, то принимаемые меры снижения напряжения прикосновения приведут к неоправданным затратам.

Выводы

1. В работе предложен вероятностный подход к определению напряжения прикосновения с учетом статистического характера расчетов сопротивления грунта.

2. Предложена методика оценки возможности появления с заданной вероятностью опасного напряжения прикосновения.

3. Указаны направления проведения технико-экономического анализа необходимости принятия мер по снижению напряжения прикосновения.

Приведенные материалы могут служить базой для исследований статистической зависимости напряжения прикосновения от других определяющих его параметров.

Список литературы: 1. Кац Е.Л. Заземляющие устройства электроустановок высокого и низкого напряжений / Е.Л. Кац, Б.Г. Меньшов, Ю.В. Целебровский // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. электр. станции и сети. – М.: ВИНТИ, 1989. – Т. 15. – 158 с. 2. Правила улаштування електроустановок. Розділ 1. Загальні правила. Глава 1.7 Заземлення і захисні заходи електробезпеки / М.А. Бороницький, І.Я. Карпець, В.В. Лях та ін. – К.: Об'єднання енергетичних підприємств «Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики». – 2006. – 71 с. 3. Линк И.Ю. Математическая модель неэквипотенциального заземляющего устройства подстанции, размещенного в двухслойном грунте / И.Ю. Линк, Д.Г. Колиушко, Г.М. Колиушко // Электронное моделирование. – 2003. – Т. 25, № 2. – С. 99-111. 4. Петков О.О. Визначення параметрів двохшарової моделі ґрунту за результатами вертикального електричного зондування, проведеного в районі розташування підстанцій / О.О. Петков, Д.Г. Колиушко, І.Ю. Линк // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. – 2004. – № 2. – С. 3-11. 5. Коновалова Л.Л. Электроснабжение промышленных предприятий и установок / Л.Л. Коновалова, Л.Д. Рожкова. – М.: Энергоатомиздат,

1989. – 528 с. 6. СТ СЭВ 1190-78. Стандарт СЭВ Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 37 с. 7. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей / *Е.С. Вентцель*. – М.: Высшая школа, 2002. – 575 с.

Поступила в редколлегию 14.03.2012.