

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НЕСИММЕТРИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В.В. Романова, С.В. Хромов

Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия

С помощью методов математической статистики и теории вероятностей произведена статистическая обработка результатов измерения показателей качества электрической энергии тяговой подстанции Урюм 220/35/27,5/10 кВ, РУ – 35 кВ, 1 СШ, ВЛ – 35 кВ (ВЛ – 241), расположенной в Забайкальском крае. Особое внимание уделено кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехе по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}).

Несимметрия напряжений – практически постоянное явление в электрических сетях различного класса напряжений. Она существенно влияет на потребителей электроэнергии, в том числе на саму питающую сеть, особенно негативно сказывается на процессе работы и сроке службы электрооборудования.

Актуальность данной проблемы подтверждается множеством исследований на подобную тему и значительным количеством повреждений потребителей электрической энергии, находящихся в эксплуатации (особенно в Забайкальском крае и Дальневосточных регионах).

В ходе исследования определен вид и параметры закона распределения случайной непрерывно распределённой величины K_{2U} . Для оценки степени совпадения эмпирического и теоретического распределений произведена трехкратная проверка на достоверность выбранного закона распределения с применением критериев согласия Пирсона χ^2 , Колмогорова и критерия ω^2 (Крамера – Мизеса – Смирнова). За теоретический закон принято логарифмически нормальное распределение.

Определена вероятность возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) на исследуемом объекте. Произведена оценка срока службы асинхронного электродвигателя в определенных диапазонах, которые выбраны, опираясь на существующий межгосударственный стандарт по качеству электрической энергии ГОСТ 32144–2013. Проведён анализ полученных результатов исследования. Представлены соответствующие выводы.

Ключевые слова: качество электрической энергии, несимметрия напряжений, надежность электрооборудования, математическая статистика и теория вероятностей, проверка гипотез, критерии согласия.

Введение

Статистические методы анализа данных, методы математической статистики и теории вероятностей приобретают все большее распространение, используются в различных приложениях. Данные методы применяются при обработке результатов исследований в различных сферах научно-технической деятельности. Так, например, применяя аппарат математической статистики и теории вероятностей, возможно определить вероятность возникновения негативного фактора, степень его влияния на электрооборудование, помимо этого определить вероятность безотказной работы, частоту и интенсивность отказов электрооборудования [1]. Ранее исследования кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи [3] по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) были направлены по разным предметным областям [4, 5] либо с помощью математических операций, либо с технической стороны, т. е. с точки зрения соответствия коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) нормативам по

качеству электрической энергии ГОСТ 32144–2013 [6, 7]. В настоящей работе предлагается двусторонний подход к изучению кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что в связи с неудовлетворительным состоянием качества электрической энергии (КЭЭ) [2] в электрических сетях Забайкальской энергосистемы наблюдается большое количество отказов электрооборудования на объектах потребителей. Электромагнитная обстановка в электрических сетях 0,4; 6; 35 кВ Забайкальской энергосистемы характеризуется отклонением таких показателей качества электрической энергии (ПКЭ), как несимметрии напряжений, несинусоидальности напряжения.

Несимметрия напряжений – довольно частое явление в электрических сетях различного класса напряжений и один из показателей, по которому оценивается КЭЭ. Несимметрия трехфазных систем напряжений – это кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха, степень влияния на надежность и эффективность работы электрообо-

рудования которой оценивается по величине коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}). Эти значения имеют случайный характер, наиболее полную характеристику случайных величин дают законы их распределения, поэтому для анализа и дальнейшего прогноза изменения K_{2U} необходимо применить методы теории вероятностей и математической статистики.

Анализ современных работ [4, 5] показал, что распределение случайной непрерывно распределенной величины K_{2U} преимущественно подчиняется нормальному закону распределения. Авторами работы предложена и доказана гипотеза о том, что несимметрия напряжений может быть описана логарифмически нормальным распределением. Следовательно, в отдельных случаях воздействие несимметрии напряжений будет иметь мультипликативный характер в отличие от классического аддитивного.

1. Постановка задачи

Проблемам обеспечения надежности и качества электрической энергии уделяется особое внимание. Причем эти проблемы тесно взаимосвязаны, т. е. при ненадлежащем качестве электрической энергии значительно снижается надежность электрооборудования и систем электроснабжения в целом [8, 9]. Таким образом, применяя вероятностно-статистические методы, возможно прогнозировать возникновение несимметрии напряжений в электрических сетях, помимо этого возможно спрогнозировать изменение срока службы оборудования. То есть, используя результаты подобных исследований, можно спланировать как организационные, так и технические мероприятия для снижения уровня кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи, при этом обеспечивая необходимый уровень эксплуатационной надежности электрооборудования.

Основная цель данной работы состоит в том, чтобы, опираясь на аппарат математической статистики и теории вероятностей, определить вероятность появления K_{2U} в определенных диапазонах на рассматриваемом объекте [4, 5], применяя при этом существующие нормативы по качеству электрической энергии ГОСТ 32144–2013.

2. Материалы и методы исследования

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи исследования:

1) на основании экспериментальных данных определить основные статистические параметры коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U});

2) определить вероятность появления K_{2U} на рассматриваемом объекте, используя при этом существующие нормативы по качеству электрической энергии ГОСТ 32144–2013;

3) определив фактическое значение вероятности появления K_{2U} на рассматриваемом объекте, рассмотреть необходимость проведения мер по симметрированию.

Основным критерием для определения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности являлось несоответствие требованиям ГОСТ 32144–2013 значений коэффициента K_{2U} на рассматриваемом объекте.

Поставленные задачи решались с использованием методов теории вероятностей, математической статистики, метода исследования экспериментальных данных с обработкой результатов на ЭВМ. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью широко распространенной компьютерной программы Microsoft Office Excel.

Объектом исследования являлась тяговая подстанция Урюм 220/35/27,5/10 кВ [10].

Измерения проводились в РУ – 35 кВ, 1 СШ, ВЛ – 35 кВ (ВЛ – 241) тяговой подстанции Урюм 220/35/27,5/10 кВ.

В табл. 1 приведены результаты измерений и обработки параметров ТП Урюм 220/35/27,5/10 кВ, РУ – 35 кВ, 1 СШ, ВЛ – 35 кВ (ВЛ – 241), дата проведения испытания – с 28.06.2012 16:25 по 05.07.2012 16:25.

На рассматриваемом объекте наблюдается отклонение от норм следующих ПКЭ: отклонение напряжения, коэффициентов 3, 5, 7, 11, 13, 15, 21, 25 гармонических составляющих напряжения, суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения, коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. Особое внимание заслуживают показатели $K_{U(15)}$, $K_{U(7)}$, $K_{U(13)}$, $K_{U(21)}$, K_{2U} , так как в несколько раз превышены нормы, установленные ГОСТ 32144–2013.

Анализируя приведенные в табл. 1 данные, можно сделать вывод, что основные ПКЭ не соответствуют нормативным значениям и приводят к ухудшению условий эксплуатации электроустановок, питающихся от данного распределительного устройства.

3. Результаты исследования и их обсуждение

Для исследования использовались данные замеров ПКЭ РУ – 35 кВ, 1 СШ, ВЛ – 35 кВ (ВЛ – 241) тяговой подстанции Урюм 220/35/27,5/10 кВ с. Урюм Могочинского района Забайкальского края, расчетный период составлял 7 сут с интервалом измерений 10 мин, установленных ГОСТ 32144–2013. В качестве средства измерения ПКЭ применялся прибор «Энергомонитор 3.3Т».

Далее осуществлялась обработка экспериментальных данных коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}). Применяя методы математической статистики, определяли закон распределения случайной величины.

Таблица 1

Отклонения основных показателей качества электрической энергии

Измеренный ПКЭ	Время измерения	Междуфазное АВ	Междуфазное ВС	Междуфазное АС	Нормативное значение	Примечание
Отклонение напряжения, %	100 %	-10,51	-4,33	-3,97	-10,0	Не соотв.
		12,52	13,22	13,14	10,0	Не соотв.
Коэффициент 3-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	7,41	7,72	5,46	3,0	Не соотв.
	100 %	9,50	9,30	8,40	4,5	Не соотв.
Коэффициент 5-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	3,98	2,57	3,12	3,0	Не соотв.
	100 %	5,10	3,30	4,80	4,5	Не соотв.
Коэффициент 7-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	5,23	3,74	3,51	2,5	Не соотв.
	100 %	6,70	4,80	5,40	3,75	Не соотв.
Коэффициент 9-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	3,67	3,04	1,95	1,0	Не соотв.
	100 %	4,70	3,90	3,00	1,5	Не соотв.
Коэффициент 11-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	3,51	2,91	2,73	2,0	Не соотв.
	100 %	4,50	3,50	4,20	3,0	Не соотв.
Коэффициент 13-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	4,99	3,51	3,84	1,5	Не соотв.
	100 %	6,40	4,50	5,90	2,25	Не соотв.
Коэффициент 15-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	1,95	1,41	2,34	0,3	Не соотв.
	100 %	2,50	1,70	3,60	0,45	Не соотв.
Коэффициент 17-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	0,47	0,39	0,59	1,0	Соотв.
	100 %	0,60	0,50	0,90	1,5	Соотв.
Коэффициент 19-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	0,39	0,31	0,33	1,0	Соотв.
	100 %	0,50	0,40	0,50	1,5	Соотв.
Коэффициент 21-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	0,58	0,47	0,52	0,2	Не соотв.
	100 %	0,70	0,60	0,80	0,3	Не соотв.
Коэффициент 23-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	0,94	0,66	0,91	1,0	Соотв.
	100 %	1,20	0,80	1,40	1,5	Соотв.
Коэффициент 25-й гармонической составляющей напряжения, %	95 %	1,09	0,75	0,78	1,0	Не соотв.
	100 %	1,40	0,90	1,20	1,5	Соотв.
Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения, %	95 %	6,70	5,60	6,20	4,0	Не соотв.
	100 %	13,40	10,00	9,20	6,0	Не соотв.
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %	95 %	3,4	-	-	2,0	Не соотв.
	100 %	9,15	-	-	4,0	Не соотв.

При выборе подходящего закона распределения случайной величины необходимо опираться на большое число экспериментальных значений [11–28].

Последовательность подбора закона распределения:

1) получение статистического ряда коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U});

2) построение полигона и гистограммы распределения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U});

3) проверка соответствия между эмпирическим и теоретическим распределениями с помощью статистических критериев согласия [14].

Проведем статистический анализ полученных результатов исследований.

Первоначально количество измерений K_{2U} составило 10 080. Далее провели усреднение значений, в соответствии с ГОСТ 32144–2013, в 10-минутном интервале.

Объем выборки составил $N = 1008$. Выборка усредненных значений измеряемых величин производилась в течение 1008 10-минутных интервалов в неделю, в соответствии с ГОСТ 32144–2013.

Вычисляем размах варьирования (разность между наибольшим и наименьшим значением выборки):

$$l = x_{\max} - x_{\min}, \quad (1)$$

где x_{\max} – максимальное значение выборки; x_{\min} – минимальное значение выборки;

$$l = 9,15 - 0,52 = 8,63.$$

Разбиваем выборку на 12 интервалов. Находим шаг интервала:

$$h = \frac{l}{n}; \quad (2)$$

$$h = \frac{8,63}{12} = 0,72.$$

Используя формулу

$$F_{\text{от}} = f/N, \quad (3)$$

где N – объем выборки; f – частота, определяем теоретические частоты наблюдаемой величины K_{2U} .

Составляем интервальный ряд распределения частот и относительных частот (табл. 2).

Пользуясь полученными значениями из табл. 2, построим полигон частот (рис. 1) и гистограмму относительных частот (рис. 2). Гистограмма является наиболее удобной формой представления информации об изменениях случайной величины.

График полигона и гистограмма распределения коэффициента по обратной последовательности напряжений (см. рис. 1, 2) дает визуальную ориентировочную оценку предполагаемого закона распределения. На гистограмме (см. рис. 2) наблюдается правый длинный «хвост» эмпирического распределения. Общий характер эмпирического распределения подтверждает обоснованность выбора модели логарифмически нормального распределения.

Основным критерием для принятия решения о выборе закона распределения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) послужил обзор существующих законов распределения [15]. Произведя обзор законов распределения, было принято логарифмически нормальное распределение, ввиду того, что оно (при $\mu = 0,5$) имеет график, наиболее похожий на гистограмму распределения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}). В результате можно сформулировать гипотезу о данном распределении как подчиняющемуся логарифмически нормальному закону. Принятую гипотезу о применении выбранного закона распределения необходимо проверить при помощи критериев согласия. Для этого следует выполнить трехкратную проверку на достоверность по разным критериям согласия [15–28].

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся способы проверки соответствия теоретического распределения эмпирическому. Для проверки воз-

Таблица 2

Интервальный ряд распределения частот и относительных частот

Интервал	Середина интервала	Частота	Относительная частота
0,52–1,24	0,88	17	0,0169
1,24–1,96	1,60	175	0,1736
1,96–2,68	2,32	230	0,2282
2,68–3,4	3,04	218	0,2163
3,4–4,11	3,76	141	0,1399
4,11–4,83	4,47	101	0,1002
4,83–5,55	5,19	45	0,0446
5,55–6,27	5,91	43	0,0427
6,27–6,99	6,63	17	0,0169
6,99–7,71	7,35	14	0,0139
7,71–8,43	8,07	5	0,0050
8,43–9,15	8,79	2	0,0020

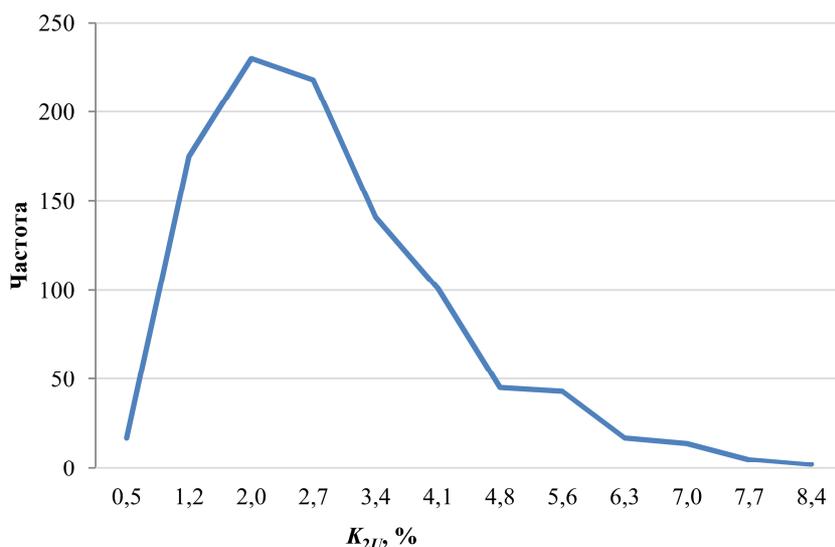


Рис. 1. Полигон частот

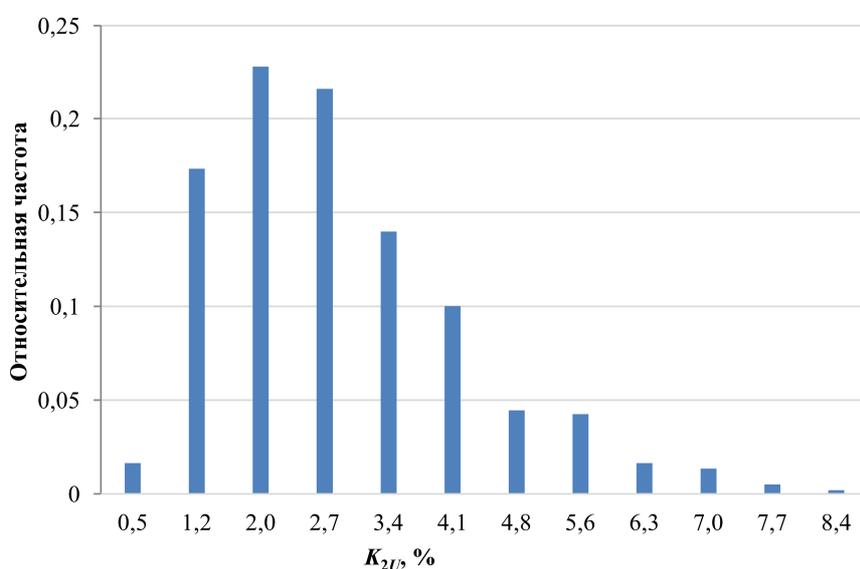


Рис. 2. Гистограмма относительных частот

возможности принятия закона распределения могут применяться следующие основные критерии:

- 1) критерий согласия Пирсона (критерий χ^2);
- 2) критерий согласия Колмогорова;
- 3) критерий ω^2 (Крамера – Мизеса – Смирнова).

За теоретический закон примем логарифмически нормальное распределение.

Функция плотности логарифмически нормального распределения имеет вид

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_{\log} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\{\ln(x) - \overline{\ln(x)}\}^2}{2\sigma_{\log}^2}}, \quad (4)$$

где x – случайная величина; $\overline{\ln(x)}$ – среднее логарифма случайной величины; σ_{\log} – среднеквадратичное отклонение логарифмов случайной величины.

Логнормальное распределение определяется двумя параметрами:

средним

$$\overline{\ln(x)} = \frac{\sum_{i=1}^n [\ln(x_i) \cdot P_i]}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (5)$$

и среднеквадратическим отклонением логарифмов

$$\sigma_{\log} = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\bar{x}^2}\right)}, \quad (6)$$

где \bar{x} – арифметическое среднее случайных чисел; P_i – вероятность появления случайного числа x_i ; σ , σ_{\log} – среднее квадратичное отклонение случайных чисел и их логарифмов, соответственно.

Далее выполняем построение графика плотности вероятности логарифмически нормального

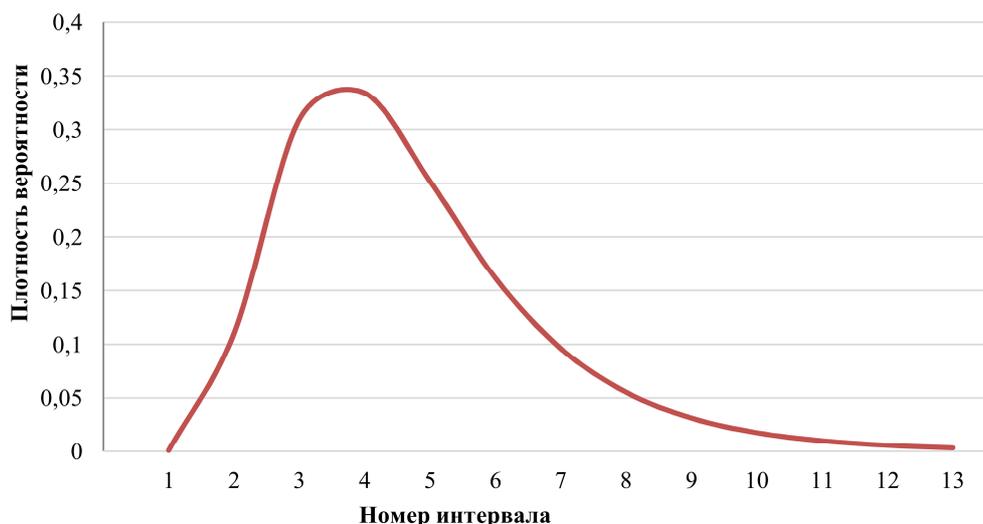


Рис. 3. График плотности вероятности логарифмически нормального распределения случайной непрерывно распределенной величины K_{2U}

распределения случайной непрерывно распределенной величины K_{2U} .

Анализ рис. 1 и 3 позволяет судить о том, что графики зависимостей имеют одинаковый вид, на основании которых можно сделать предположение о правильности выбранного закона распределения.

Находим основные параметры логнормального распределения.

Определяем среднее $\overline{\ln(x)}$ по формуле (5):

$$\overline{\ln(x)} = 1,067.$$

Определяем среднеквадратическое отклонение по формуле (6):

$$\sigma_{\log} = 0,44.$$

Далее осуществим проверку возможности принятия закона распределения, используя критерий согласия Пирсона χ^2 .

Проверка производится в следующей последовательности.

1. Определяем эмпирическое значение критерия χ^2 по следующей формуле

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(n(i) - m(i))^2}{m(i)}, \quad (7)$$

где $m(i)$ – теоретические частоты соответствующих значений; $n(i)$ – эмпирические частоты соответствующих значений; n – число разрядов наблюдаемых значений.

Критерий Пирсона $\chi_{н}^2 = 0,62$, данные заносим в табл. 3.

2. Из таблицы 3 приложения [14] для критических значений точек распределения χ^2 при выбранном уровне значимости α и для числа степеней свободы ν находим критическую точку $\chi^2(\alpha, \nu)$:

$$\nu = k - 3, \quad \nu = 9, \quad (8)$$

где k – число групп выборки или число временных интервалов.

Проверка случайной величины по критерию Пирсона

Таблица 3

x_i	$N(i)$	$n(i)$	$m(i)$	$(n(i) - m(i))^2 / m(i)$
0,88	17	0,0169	0,00077	0,33695
1,60	175	0,1736	0,11024	0,03643
2,32	230	0,2282	0,30942	0,02133
3,04	218	0,2163	0,33417	0,04160
3,76	141	0,1399	0,25182	0,04976
4,47	101	0,1002	0,25182	0,09129
5,19	45	0,0446	0,09607	0,02753
5,91	43	0,0427	0,05509	0,00281
6,63	17	0,0169	0,03113	0,00653
7,35	14	0,0139	0,01753	0,00076
8,07	5	0,0050	0,00991	0,00247
8,79	2	0,0020	0,00565	0,00237
Σ	1008			$\chi_{н}^2 = 0,619836$

$$\chi^2(\alpha, \nu) = 21,67, \\ 21,67 > 0,62.$$

3. Принимается решение о применимости логнормального закона распределения.

При $\chi_n^2 < \chi_{кр}$ распределение изучаемого параметра подчинено логнормальному закону распределения. При $\chi_n^2 > \chi_{кр}$ гипотеза о выбранном распределении отвергается в силу отличий теоретических и эмпирических частот.

Проверка по критерию Пирсона подтверждает, что случайная непрерывно распределенная величина K_{2U} следует логнормальному закону распределения теории вероятностей.

Далее осуществим проверку возможности принятия закона распределения, используя критерий согласия Колмогорова.

Проверка производится следующим образом.

Считается, что соответствие удовлетворительное, если выполняется условие

$$\Delta = D_{\max} \sqrt{n} \leq 1, \quad (9)$$

где D_{\max} – наибольшее отклонение теоретической кривой распределения от экспериментальной по модулю; n – общее число опытных интервалов.

$$\Delta = 0,15 \cdot \sqrt{12} = 0,53 \leq 1.$$

Соответствие удовлетворяет условию.

Проверка по критерию согласия Колмогорова подтверждает, что случайная непрерывно распределенная величина K_{2U} следует логнормальному закону распределения теории вероятностей.

Далее осуществим проверку возможности принятия закона распределения, используя критерий согласия ω^2 (или Крамера – Мизеса – Смирнова).

Проверка производится в следующей последовательности.

1. Значение статистики Крамера – Мизеса – Смирнова S^* вычисляется по формуле

$$S^* = n\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[F(x_i) - \frac{2i-1}{2n} \right]^2. \quad (10)$$

Значение вероятности $P(S > S^*) = 1 - a_1(S^*)$ берется из таблицы 2 приложения [17].

2. Критические значения критерия $a_1(S)$ при заданном a могут быть взяты из таблиц приложения [14], где a – это уровень значимости, при этом значение $a \leq 0,01$ (второй уровень значимости). Тогда

$$a_1(S) = 0,7434.$$

3. Гипотеза не отвергается, если для вычисленного по выборке значения статистики S^* выполняется следующее условие:

$$P(S > S^*) = 1 - a_1(S^*) > a_1(S); \quad (11)$$

$$a_1(S^*) = 0,07;$$

$$1 - a_1(S^*) = 0,93 > 0,7434.$$

Гипотеза верна.

Проверка по критерию согласия ω^2 подтверждает, что случайная непрерывно распределенная величина K_{2U} следует логнормальному закону распределения теории вероятностей.

В ходе решения вопроса проверки закона распределения оправдана гипотеза о логарифмически нормальном распределении.

В результате математической обработки результатов измерений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) принимаем модель логарифмически нормального распределения, получаем следующие параметры распределения:

– среднее из логарифма случайных чисел $\overline{\ln(x)} = 1,07$;

– среднеквадратическое отклонение логарифмов $\sigma_{\log} = 0,44$.

Таким образом, принимая модель логарифмически нормального распределения, определим вероятности появления K_{2U} в различных диапазонах: 0–2 %, 2–4 %, 4–∞ % на исследуемом объекте. Данные диапазоны выбраны, опираясь на нормативные значения K_{2U} .

В соответствии с [6, 7] установлены следующие нормативные значения коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} : они в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % и 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

Находим вероятность появления несимметрии напряжений в заданных интервалах с помощью определенного интеграла:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma_{\log} \sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-\frac{\{\ln(x) - \overline{\ln(x)}\}^2}{2\sigma_{\log}^2}}. \quad (12)$$

Вероятность попадания K_{2U} в интервал от 0 до 2 % определяется по формуле (12), подставляя соответствующие значения a и b :

$$P(0 < K_{2U} < 2) = \frac{1}{0,44\sqrt{2\pi}} \int_0^2 e^{-\frac{\{\ln(K_{2U}) - 1,07\}^2}{2 \cdot 0,44^2}};$$

$$P(0 < K_{2U} < 2) = 0,0997 = 9,97\%.$$

Вероятность попадания K_{2U} в интервал от 2 до 4 % определяется по формуле (12), подставляя соответствующие значения a и b :

$$P(2 < K_{2U} < 4) = \frac{1}{0,44\sqrt{2\pi}} \int_2^4 e^{-\frac{\{\ln(K_{2U}) - 1,07\}^2}{2 \cdot 0,44^2}};$$

$$P(2 < K_{2U} < 4) = 0,5291 = 52,91\%.$$

Вероятность попадания K_{2U} в интервал больше 4 % определяется по формуле (12), подставляя соответствующие значения a и b :

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = \frac{1}{0,44\sqrt{2\pi}} \int_4^{\infty} e^{-\frac{[\ln(K_{2U})-1,07]^2}{2 \cdot 0,44^2}} ;$$

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = 0,3711 = 37,12 \%.$$

Таким образом, определили вероятность возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) на исследуемом объекте в определённых диапазонах.

В итоге получили:

$$P(0 < K_{2U} < 2) = 0,0997 = 9,97 \%;$$

$$P(2 < K_{2U} < 4) = 0,5291 = 52,91 \%;$$

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = 0,3711 = 37,12 \%.$$

В ходе выполнения данной работы были решены следующие задачи:

1) на первом этапе данного исследования определен закон распределения случайной непрерывно распределённой величины K_{2U} ;

2) на втором этапе исследования определены основные статистические параметры, полученные в результате натурных измерений коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}):

– среднее из логарифма случайных чисел

$$\overline{\ln(x)} = 1,07 ;$$

– среднеквадратическое отклонение логарифмов $\sigma_{\log} = 0,44$.

3) на третьем этапе произведено окончательное решение о принятии логарифмически нормального распределения, установление с помощью критериев согласия степени совпадения эмпирического с теоретическим распределением;

4) на четвертом этапе определили вероятность появления K_{2U} на рассматриваемом объекте в интервалах:

$$P(0 < K_{2U} < 2) = 9,97 \%;$$

$$P(2 < K_{2U} < 4) = 52,91 \%;$$

$$P(4 < K_{2U} < \infty) = 37,12 \%.$$

Из трех рассмотренных интервалов наибольшая вероятность появления K_{2U} в интервале от 2 до 4 % составляет 52 %, в связи с этим возникает необходимость в применении специальных мер по устранению кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи на рассматриваемом объекте.

Данные вероятности возможно применять не только для прогнозирования возникновения несимметрии напряжений в электрических сетях, а также для оценки срока службы электрооборудования. Полученные значения вероятностей возникновения кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи позволяют судить о нарушениях работы электропотребителей, приводящих

к преждевременному выходу из строя и сокращению срока службы электрооборудования, например, таких как асинхронные двигатели (АД).

Так как срок службы АД в первую очередь определяется сроком службы изоляции обмоток электродвигателя, необходимо, прежде всего, рассмотреть изменение этого параметра [29, 30]. В [31] приведена формула изменения значения продолжительности жизни изоляции обмоток АД относительно номинального режима вследствие несинусоидальности и несимметрии питающего напряжения:

$$z = e^{-\left[-280(1,55 \cdot K_{2U}^2) + 1,39 \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v\sqrt{v}}\right]} . \quad (13)$$

Так как в данном случае нас интересует только несимметрия напряжений, выражение примет вид:

$$z = e^{-\left[-280(1,55 \cdot K_{2U}^2)\right]} . \quad (14)$$

Тогда снижение продолжительности жизни изоляции обмоток АД при различных значениях K_{2U} равна:

$$\text{при } K_{2U} = 0, z = e^{-\left[-280(1,55 \cdot 0^2)\right]} = 0 \% ;$$

$$\text{при } K_{2U} = 2 \%, z = e^{-\left[-280(1,55 \cdot 2^2)\right]} = 24,84 \% ;$$

$$\text{при } K_{2U} = 4 \%, z = e^{-\left[-280(1,55 \cdot 4^2)\right]} = 68,09 \% ;$$

$$\text{при } K_{2U} = 1,2 \%, z = e^{-\left[-280(1,55 \cdot 1,2^2)\right]} = 9,77 \% ;$$

$$\text{при } K_{2U} = 6 \%, z = e^{-\left[-280(1,55 \cdot 6^2)\right]} = 92,35 \% .$$

Соответственно получаем следующие значения:

1) при первом интервале от 0 до 2 % снижение срока службы АД составляет от 0 до 24,84 %;

2) при втором интервале от 2 до 4 % снижение срока службы АД составляет от 24,84 до 68,09 %;

3) при третьем интервале больше 4 % снижение срока службы АД составляет 68,09 %.

Как видно из представленных данных, вероятность сравнительно небольшого снижения срока службы АД до 25 % составляет всего около 10 %. Тогда как наиболее вероятная величина снижения срока службы АД лежит в диапазоне от 25 до 68 %. При длительной несимметрии 1,2 % происходит снижение срока службы АД примерно на 10 %.

Наблюдая за динамикой изменения K_{2U} , можно сделать вывод, что с увеличением K_{2U} происходит снижение срока службы АД. Так, срок службы АД при $K_{2U} = 6 \%$ снижается на 92,35 %.

Таким образом, величины вероятностей снижения срока службы АД показывают, что для питания асинхронных двигателей при длительной либо часто повторяющейся несимметрии напряжений, даже если величина K_{2U} соответствует

ГОСТ 32144–2013, необходимо предусматривать средства симметрирования с величиной длительной несимметрии на выходе устройства не более 1,2 %. Однако применение подобных ограничений кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи будет экономически оправдано только при установке устройств на тех объектах, где электродвигательная нагрузка составляет значительную часть от общей нагрузки объекта [32–34].

Заключение

В заключение хотелось бы отметить, что кондуктивная низкочастотная электромагнитная помеха по коэффициенту несимметрии напряжений по обратной последовательности (K_{2U}) формируется под действием различных факторов, основная же ее особенность состоит в том, что ее невозможно предвидеть. Однако, применяя математические методы и операции, возможно определить вероятность ее возникновения, при этом получаем более точное представление об искажающем факторе.

Наличие достоверной информации об уровнях искажения показателей качества электрической энергии, определение величины вероятности появления несимметрии напряжений на конкретном объекте представляют теоретический и особенно практический интерес для реализации последующей разработки технических мероприятий по устранению кондуктивной низкочастотной электромагнитной помехи.

Кроме того, применяя вероятностно-статистические методы, можем получить расширенный состав параметров, на которые опираются при проведении специальных мер для устранения несимметрии напряжений, при выборе и настройке средств симметрирования. Очевидно, что, применяя математические методы, возможно спрогнозировать изменение срока службы оборудования, развитие негативных процессов, приводящих к аварийным ситуациям, в результате которых снижается надежность электрооборудования, что, в свою очередь, позволит оперативно их устранить.

Работа выполнена в рамках реализации научных грантов Совета по научной и инновационной деятельности ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет» № 222 – ГР, № 223 – ГР от 09.02.17 г.

Литература

1. Повышение качества функционирования линий электропередачи: моногр. / Г.А. Данилов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов, Г.В. Ситников. – 2-е изд. – М.; Берлин: Директ – Медиа, 2015. – 558 с.
2. Романова, В.В. Состояние качества электрической энергии в распределительных сетях Забайкальского края / В.В. Романова, С.В. Хромов // Электроэнергетика Байкальского региона: проблемы и перспективы: материалы Всерос. науч.-

практ. конф. (Улан-Удэ – с. Горячинск, 10–12 июня 2016 г.): электрон. вариант. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2016. – С. 20–25.

3. ГОСТ Р 51317.2.5–2000. Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 53 с.

4. Наумов, И.В. Статистическая оценка режимов работы электрических сетей напряжением 0,38 кВ / И.В. Наумов, Д.А. Иванов, С.В. Подъячич // Вестник ИрГСХА: науч.-практ. журн. – Иркутск: Из-во Иркутск. гос. аграр. ун-та им. А.А. Ежевского. – 2015. – № 67. – С. 107–116.

5. Закарюкин, В.П. Имитационное моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2015. – № 2 (4). – С. 11–17.

6. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.

7. ГОСТ 33073–2014. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Контроль и мониторинг качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 87 с.

8. Валянский, А.В. Влияние качества электроэнергии на надежность силового трансформатора / А.В. Валянский, И.И. Карташев, Ю.В. Шаров // Электротехника. – 2014. – № 3. – С. 20–27.

9. Суднова, В.В. Качество электрической энергии / В.В. Суднова. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2000. – 80 с.

10. Протокол № 4. Претензионных испытаний электрической энергии по показателям качества. Филиал ОАО «МРСК Сибири» – «Читаэнерго». Испытательная лаборатория по качеству электрической энергии, 2012. – 25 с.

11. Иванов, В.Н. MS EXCEL в решении задач теории вероятности / В.Н. Иванов, Д.С. Кучеренко // Территория науки. – 2014. – Т. 1, № 1. – С. 77–83.

12. Гефан, Г.Д. Типология ошибок и заблуждений, связанных с задачами курса теории вероятностей. Часть 2: законы распределения случайных величин / Г.Д. Гефан, О.В. Кузьмин // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (73). – С. 131–136.

13. Гафарова, Л.М. Об особенностях применения критерия согласия пирсона χ^2 / Л.М. Гафарова, И.Г. Завьялова, Н.Н. Мустафин // Экономические и социально-гуманитарные исследования. – 2015. – № 4 (8). – С. 63–67.

14. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 416 с.
15. Pearson, E.S. *Biometrika tables for Statistics*. Vol. 2 / E.S. Pearson, H.O. Hartley. – Cambridge: University Press, 1972. – 634 p.
16. Ishii Goro. *Kolmogorov-Smirnov test in life-test* / Ishii Goro // *Ann. Inst. Stat. Math.* – 1958. – Vol. 10, no. 1. – P. 37–46.
17. Ishii Goro. *On the exact probabilities of Renyi's tests* / Ishii Goro // *Ann. Inst. Stat. Math.* 1959. – Vol. 11, no. 1. – P. 17–24.
18. Jiang, S. *Maximum likelihood estimates from censored data for mixed Weibull distributions* / S. Jiang, D. Kececioglu // *IEEE Trans. Reliab.* – 1992. – Vol. 41, no. 2. – P. 248–255. DOI: 10.1109/24.257791
19. Kale, B.K. *A note on the loss information due to grouping of observations* / B.K. Kale // *Biometrika.* – 1964. – Vol. 51, no. 3/4. – P. 495–497. DOI: 10.1093/biomet/51.3-4.495
20. Kale, B.K. *Approximations to the maximum-likelihood estimator using grouped data II* *Biometrika.* – 1966. – Vol. 53, no. 1/2. – P. 282–285. DOI: 10.2307/2334085
21. Kaplan, E.L. *Nonparametric estimation from incomplete observations* / E.L. Kaplan, P. Meier // *J. Amer. Stat. Assoc.* – 1958. – Vol. 53.
22. Kendall, P.J. *An estimation problem in life-testing* / P.J. Kendall, R.L. Anderson // *Technometrics.* – 1971. – Vol. 13. – P. 289–301.
23. Koziol, J.A. *Percentage points of the asymptotic distributions of one and two sample K-S statistics for truncated or censored data* / J.A. Koziol, P.D. Byair // *Technometrics.* – 1975. – Vol. 17, no. 4. – P. 507–510. DOI: 10.1080/00401706.1975.10489380
24. Koziol, J.A. *A Cramer von Mises statistic for randomly censored data* / J.A. Koziol, S.B. Green // *Biometrika.* – 1976. – Vol. 63, no. 2. DOI: 10.2307/2335723
25. Mann, H.B. *On the choice of the number of class intervals in the application of the chi square test* / H.B. Mann, A. Wald // *Ann. Math. Stat.* – 1942. – Vol. 13. – P. 306–317. DOI: 10.1214/aoms/1177731569
26. Mohamed, E.A. *On the problem of estimation of three parameter log-normal distribution in case of grouped data* / E.A. Mohamed // *AMSE rev.* – 1989. – Vol. 11, no. 2. – P. 53–64.
27. Миникаева, А.Ф. Идентификация законов распределения величин по результатам измерений. Критерий согласия А.Н. Колмогорова / А.Ф. Миникаева // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 562–565.
28. Орлов, А.И. Непараметрические критерии согласия Колмогорова, Смирнова, омега-квадрат и ошибки при их применении / А.И. Орлов // Политематический сетевой научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 97. – С. 31–45.
29. Повышение качества электрической энергии в сетях нелинейными потребителями / С.В. Горелов, К.К. Морев, В.И. Никулин, Е.С. Игнатенко // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2016. – № 3–4. – С. 151–153.
30. Ежова, М.С. Анализ методов расчета показателей надежности асинхронных двигателей / М.С. Ежова, В.Е. Полевой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 9–1. – С. 31–35.
31. Закладной, А.Н. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей / А.Н. Закладной, О.А. Закладной // Энергетика та електрифікація. – 2010. – № 4. – С. 63–67.
32. Виноградов, А.В. Способ управления качеством электрической энергии / А.В. Виноградов, М.В. Бородин, В. Большев // Техника в сельском хозяйстве. – 2014. – № 4. – С. 30–31.
33. Оськин, С.В. Техно-экономическая оценка эффективности эксплуатации оборудования / С.В. Оськин, Г.М. Оськина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – № 1. – С. 2–3.
34. Калинин, В.Ф. Влияние характера нагрузки на качество электрической энергии / В.Ф. Калинин, С.В. Кочергин, А.Н. Кагдин // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2014. – № 52. – С. 71–74.

Романова Виктория Викторовна, аспирант, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», Забайкальский государственный университет, г. Чита; romanova181@mail.ru.

Хромов Сергей Владимирович, аспирант, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», Забайкальский государственный университет, г. Чита; sergeixrom@inbox.ru.

Поступила в редакцию 21 октября 2017 г.

APPLICATION OF MATHEMATICAL STATISTICS METHODS FOR PREDICTING OCCURRENCE OF VOLTAGE UNBALANCE IN ELECTRICAL NETWORKS

V.V. Romanova, romanova181@mail.ru,

S.V. Khromov, sergeixrom@inbox.ru

Transbaikal State University, Chita, Russian Federation

In this paper a statistical analysis of the results of measuring the quality parameters of electric power of the traction substation Uryum 220/35/27.5/10 kV, RU – 35 kV, 1 SS, 35 kV overhead line (VL – 241) located in the Trans-Baikal Territory was performed using the methods of mathematical statistics and probability theory. A particular attention is paid to conducted low-frequency electromagnetic interference by the unbalance factor of the negative sequence voltage (K_{2U}).

Voltage unbalance is a fairly common phenomenon in electrical networks of various stress classes and one of the indicators by which the quality of electricity is estimated. Unbalance of stresses significantly affects consumers of electricity, including the supply network itself, and especially negatively it affects the process of operation and the service life of electrical equipment.

The relevance of this problem is confirmed by numerous studies on this issue and a significant amount of damage to consumers of electrical energy in service (especially in the Trans-Baikal Territory and the Far Eastern Regions). In the course of the research the form and parameters of the distribution law of a random continuously distributed quantity K_{2U} are determined.

To assess the degree of coincidence of the empirical and theoretical distributions, a three-fold test was carried out to verify the validity of the chosen distribution law using the Pearson's χ^2 , Kolmogorov, and ω^2 (Cramer – Mises – Smirnov) criteria. A theoretical logarithmically normal distribution is adopted.

The authors determined the likelihood of conducted low-frequency electromagnetic interference on the coefficient of voltage unbalance negative sequence (K_{2U}) for the studied object, besides, the estimation of the service life of the asynchronous motor within certain ranges was made. These ranges are selected basing on the existing interstate standard for the quality of electrical energy GOST 32144–2013. The research results are analyzed. The corresponding conclusions are presented.

Keywords: quality of power energy, voltage asymmetry, reliability of electrical equipment, mathematical statistics and probability theory, hypothesis testing, consent criteria.

The work is done in the framework of the research grants Council for research and innovation activities of the “Transbaikal State University” No. 222 – GR, No. 223 – GR from G. 09.02.17.

References

1. Danilov G.A., Denchik Yu.M., Ivanov M.N., Sitnikov G.V. *Povyshenie kachestva funkcionirovaniya linii elektroperedachi: monografiya* [Improving the Quality of Power Transmission Lines: Monograph]. 2nd ed. Moscow, Berlin, Direkt – Media, 2015. 558 p.
2. Romanova V.V., Khromov S.V. [State of the Quality of Electrical Energy in Distribution Networks of the Transbaikal Territory]. *Elektroenergetika baykal'skogo regiona: problemy i perspektivy: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Ulan-Ude – s. Goryachinsk, 10–12 iyunya 2016 g.): elektron. variant* [Electric Power Industry of the Baikal Region: Problems and Perspectives: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Ulan-Ude, BNTs SO RAN, 2016. pp. 20–25. (in Russ.)
3. GOST R 51317.2.5–2000. *Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Elektromagnitnaya obstanovka. Klassifikatsiya elektromagnitnykh pomekh v mestakh razmeshcheniya tekhnicheskikh sredstv* [Compatibility of Technical Means is Electromagnetic. Electromagnetic situation. Classification of Electromagnetic Interference in the Location of Technical Equipment]. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov Publ., 2001. 53 p.
4. Naumov I.V., Ivanov D.A., Pod'yachikh S.V. [Statistical Estimation of Operating Modes of Electrical Networks with a Voltage of 0,38 kV]. *Vestnik IrGSKhA: nauchno-prakticheskiy zhurnal* [IrgSHA Bulletin: Scientific and Practical Journal]. Irkutsk, Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky Publ., 2015, no. 67, pp. 107–116. (in Russ.)
5. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Avdienko I.M. [Simulation Modeling of Traction Power Supply Systems Equipped with Balancing Devices]. *Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona* [Transport of Asia-Pacific Region], 2015, no. 2 (4), pp. 11–17. (in Russ.)

6. GOST 32144–2013. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Normy kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electric Energy. Compatibility of Technical means is Electromagnetic. Norms of Quality of Electric Energy in General-Purpose Power Supply Systems]. Moscow, Standartinform Publ., 2014. 19 p.
7. GOST 33073–2014. *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya. Kontrol' i monitoring kachestva elektricheskoi energii v sistemakh elektrosnabzheniya obshchego naznacheniya* [Electric Energy. Compatibility of Technical Means is Electromagnetic. Monitoring and Monitoring of the Quality of Electrical Energy in General-Purpose Power Supply Systems], Moscow, Standartinform Publ., 2014. 87 p.
8. Valyjanskiy A.V., Kartashev I.I., Sharov Yu.V. [Influence of Quality of the Electric Power on Reliability of the Power Transformer]. *Electrical Engineering*, 2014, no. 3, pp. 20–27. (in Russ.)
9. Sudnova V.V. *Kachestvo elektricheskoy energii* [Quality of Electrical Energy]. Moscow, ZAO Energoservis Publ., 2000. 80 p.
10. *Protokol № 4. Pretenzionnykh ispytaniy elektricheskoi energii po pokazatelyam kachestva. Filial OAO "MRSK Sibiri" – "Chitaenergo"* [Protocol No. 4. Claims Testing of Electrical Energy in Terms of Quality Indicators. Branch of IDGC of Siberia, JSC – "Chitaenergo"], 2012. 25 p.
11. Ivanov V.N., Kucherenko D.S. [MS EXCEL in Solving Problems in Probability Theory]. *Territorija nauki* [The Territory of Science], 2014, vol. 1, no. 1. pp. 77–83. (in Russ.)
12. Gefan G.D., Kuz'min O.V. [Typology of Errors and Errors Associated with the Problems of the Course of Probability Theory. Part 2: The Laws of Distribution of Random Variables]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2013, no. 2 (73), pp. 131–136. (in Russ.)
13. Gafarova L.M., Zav'yalova I.G., Mustafin N.N. [On the Features of the Application of the Pearson's Consent Criterion χ^2]. *Ekonomicheskie i sotsial'no-gumanitarnye issledovaniya* [Economic and Socio-Humanitarian Studies], 2015, no. 4 (8), pp. 63 – 67. (in Russ.)
14. Bol'shev L.N., Smirnov N.V. *Tablitsy matematicheskoy statistiki* [Tables of Mathematical Statistics]. Moscow, Nauka Publ., Glavnaya redaktsiya fiziko-matematicheskoi literatury, 1983. 416 p.
15. Pearson E.S., Hartley N.O. *Biometrika Tables for Statistics*. Vol. 2. Cambridge, University Press, 1972. 634 p.
16. Ishii Goro. Kolmogorov–Smirnov Test in Life-Test. *Ann. Inst. Stat. Math.*, 1958, vol. 10, no. 1, pp. 37–46.
17. Ishii Goro. On Exact Probabilities of Renyi's Tests. *Ann. Inst. Stat. Math.*, 1959, vol. 11, no. 1, pp. 17–24.
18. Jiang S., Kececioglu D. Maximum Likelihood Estimates from Censored Data for Mixed Weibull Distributions. *IEEE Trans. Reliab.*, 1992, vol. 41, no. 2, pp. 248–255. DOI: 10.1109/24.257791
19. Kale B.K. A Note on the Loss Information Due to Grouping of Observations. *Biometrika*, 1964, vol. 51, no. 3/4, pp. 495–497. DOI: 10.1093/biomet/51.3-4.495
20. Kale B.K. Approximations to the Maximum-likelihood Estimator Using Grouped Data. *II Biometrika*, 1966, Vol. 53, no. 1/2, pp. 282–285. DOI: 10.2307/2334085
21. Kaplan E.L., Meier P. Nonparametric Estimation from Incomplete Observations. *J. Amer. Stat. Assoc.*, 1958, vol. 53.
22. Kendall P.J., Anderson R.L. An Estimation Problem in Life-Testing. *Technometrics*, 1971, vol. 13, pp. 289–301.
23. Koziol J.A., Byair P.D. Percentage Points of the Asymptotic Distributions of One and Two Sample K–S Statistics for Truncated or Censored Data. *Technometrics*, 1975, Vol. 17, no. 4, pp. 507–510. DOI:10.1080/00401706.1975.10489380
24. Koziol J.A., Green S.B. A Cramer von Mises Statistic for Randomly Censored Data. *Biometrika*, 1976, vol. 63, no. 2. DOI: 10.2307/2335723
25. Mann H.B., Wald A. On the Choice of the Number of Class Intervals in the Application of the Chi Square Test. *Ann. Math. Stat.*, 1942, vol. 13, pp. 306–317. DOI: 10.1214/aoms/1177731569
26. Mohamed E.A. On the Problem of Estimation of Three Parameter Log-normal Distribution in Case of Grouped Data. *AMSE rev.*, 1989, vol. 11, no. 2, pp. 53–64.
27. Minikaeva A.F. [Identification of Laws of Distribution of Quantities from Results of Measurements. Criterion for Agreement of A.N. Kolmogorov]. *Problemy razrabotki mestorozhdenij uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh* [Problems of development of hydrocarbon and ore minerals deposits], 2014, no. 1, pp. 562–565. (in Russ.)
28. Orlov A.I. [Nonparametric Criteria of Kolmogorov's Consent, Smirnov's Agreement, Omega-square and Errors in their Application]. *Politematicheskii setevoj nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Polytechnical Scientific Journal of the Kuban State Agrarian University], 2014, no. 97, pp. 31–45. (in Russ.)
29. Gorelov S.V., Morev K.K., Nikulin V.I., Ignatenko E.S. [Improving the Quality of Electrical Energy in Networks by Non-linear Consumers]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego vostoka* [Scientific Problems of Transport in Siberia and the Far East], 2016, no. 3–4, pp. 151–153. (in Russ.)

30. Ezhova M.S., Polevoy V.E. [Analysis of Methods for Calculating the Reliability of Asynchronous Motors]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [News of Tula State University. Technical Science], 2013, no. 9–1, pp. 31–35. (in Russ.)

31. Zakladnoy A.N., Zakladnoy O.A. [Methods for Estimating the Life of Asynchronous Electric Motors]. *Energetika ta elektrifikatsiya* [Energy and Electrification], 2010, no. 4, pp. 63–67.

32. Vinogradov A.V., Borodin M.V., Bol'shev V. [Method for Managing the Quality of Electrical Energy]. *Tekhnika v sel'skom khozyaystve* [Machinery in agriculture], 2014, no. 4, pp. 30–31. (in Russ.)

33. Os'kin S.V., Os'kina G.M. [Technical and Economic Assessment of Equipment Operation Efficiency]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva* [Mechanization and electrification of agriculture], 2006, no. 1, pp. 2–3. (in Russ.)

34. Kalinin V.F., Kochergin S.V., Kagdin A.N. [Effect of Nature of Load on Quality of Electrical Energy]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo* [Issues of Modern Science and Practice. University named after V.I. Vernadsky], 2014, no. 52, pp. 71–74. (in Russ.)

Received 21 October 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Романова, В.В. Применение методов математической статистики для прогнозирования возникновения несимметрии напряжений в электрических сетях / В.В. Романова, С.В. Хромов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 59–71. DOI: 10.14529/power170407

FOR CITATION

Romanova V.V., Khromov S.V. Application of Mathematical Statistics Methods for Predicting Occurrence of Voltage Unbalance in Electrical Networks. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 59–71. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170407
