

нович [и др.]; под ред. Б. М. Богдановича. – Мн.: Выш. школа, 1980. – 208 с., ил.

5. Богданович, Б. М. Нелинейные искажения в приемно-усилительных устройствах / Б. М. Богданович. – М.: Связь, 1980. – 280 с., ил.

6. Пупков, К. А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем / К. А. Пупков, В. И. Капалин, А. С. Ющенко. – М.: Наука, 1976. – 448 с., ил.

7. Винер, Н. Нелинейные задачи в теории случайных процессов / Н. Винер. – М.: ИЛ, 1961. – 79 с.

8. Устройство для измерения передаточных функций Вольтерра нелинейных четырехполосников: а. с. 586403 СССР, МКИ G 01R 29/02 / Б. М. Богданович, В. П. Дорошев, С. С. Позняк, Л. А. Черкас, А. И. Шакирин. – № 2054383/18-21 4; заявл. 16.08.74; опубл. 30.12.77 // Бюл. № 48. – С. 3.

УДК 621.316.1

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 24.09.2013

## АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОТКАЗОВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ

И.В. Протосовицкий, канд. техн. наук, доцент, А.И. Зеленкевич, ст. преподаватель,  
Д.А. Кулаковский, аспирант (БГАТУ); А.И. Науменко, начальник службы  
распределительных сетей (РУП «Витебскэнерго»)

### Аннотация

*В статье приведен анализ и прогнозирование отказов в распределительных сетях Республики Беларусь на примере Витебских электрических сетей.*

*The analysis and forecasting of refusals of distributive networks of the Republic of Belarus by way of example of Vitebsk electric networks are given in the article.*

### Введение

Функционирование и развитие АПК республики невозможно без качественной и надежной работы сельских электрических сетей (СЭС), которые являются заключительным звеном при обеспечении сельскохозяйственных потребителей электроэнергией. Основное отличие сельскохозяйственных электрических сетей от промышленных заключается в том, что они находятся в непосредственном взаимодействии с конкретным сельскохозяйственным потребителем или агропромышленным объектом. Для поддержания стабильной работы СЭС необходимо решать вопросы, направленные на повышение надежности и качества электроснабжения путем применения совокупности технических и организационных мероприятий. К ним можно отнести:

- повышение эффективности управления сетями;
- подготовку обслуживающего персонала необходимого уровня;
- замену устаревшего оборудования;
- повышение технической оснащенности и безопасности СЭС на основе новых, научно-обоснованных технических решений и технологий.

В последнее время в распределительных сетях наблюдается постоянный рост числа электропотребителей, обладающих высокой чувствительностью к надежности электроснабжения и качеству электроэнергии (электронные и микропроцессорные устройства и др.). Для поддержания надежности электроснабжения на соответствующем уровне необходимо разрабатывать и принимать меры по повышению надежности, в частности, распределительных воздуш-

ных линий напряжением 10 и 0,4 кВ, так как они являются наиболее ненадежным звеном в системе электроснабжения, и большинство всех аварий происходит именно в сетях данного класса напряжений [1].

Основными причинами снижения надежности СЭС являются отказы оборудования, ошибки эксплуатационного персонала, превышение срока эксплуатации, отклонение реальных условий от расчетных, ущерб от стихийных бедствий.

Целью данной работы является проведение теоретического анализа состояния распределительных электрических сетей на примере Витебских ЭС, а также составление прогноза отказов в распределительных сетях.

### Основная часть

Система электроснабжения сельских районов в Республике Беларусь сформирована на основе сетей трех типов, отличающихся между собой уровнем напряжения.

Первый тип сетей – это питающие сети высокого напряжения – 110 кВ. В таких сетях происходит передача электрической энергии от энергосистем к промежуточным питающим подстанциям – 110/35, 110/10, 35/10, 110/35/10 кВ.

Второй тип сетей – это распределительные сети среднего напряжения – 35 и 10 кВ. Они состоят из воздушных линий электропередачи – 35 и 10 кВ, а также из потребительских подстанций – 35/0,4 и 10/0,4 кВ.

Третий тип сетей – распределительные сети низкого напряжения – 0,4 кВ. Эти сети непосредственно питают электроэнергией потребителей. Они имеют

большую протяженность, чем питающие, и, соответственно, в них возникает больше аварийных ситуаций, влияющих на уровень надежности электроснабжения потребителей.

Уровень надежности электроснабжения в большей степени зависит от надежности элементов электрических сетей, которая в свою очередь характеризуется такими показателями, как вероятность безотказной работы; интенсивность отказов; продолжительность ремонтных и восстановительных работ; частота преднамеренных отключений; время преднамеренных (плановых) отключений.

Сбор статистической информации и обработка данных по отказам элементов электрических сетей позволяет сделать вывод о техническом состоянии электрооборудования и получить прогнозные модели развития конкретной системы электроснабжения.

В работе рассмотрены отказы основного электрооборудования распределительных сетей напряжением 0,4-10 кВ, эксплуатируемого в Витебских электрических сетях в период с 2002 по 2011 гг.

При обработке статистических данных по отключениям были выделены наиболее повреждаемые (ненадежные) элементы распределительной электрической сети. К ним относятся:

1. Элементы воздушных линий:
  - изоляторы ШФ-20В(Г);
  - провода АС сечением до 35 мм<sup>2</sup>
2. Элементы кабельных линий:
  - кабели;
  - соединительные муфты.
3. Элементы ТП, КТП, РП:
  - трансформаторы силовые, мощностью до 250 кВ·А;
  - изоляторы опорные;
  - изоляторы ПНБ-10;
  - разрядники РВО-10.

Для определения устойчивости функционирования отдельных элементов распределительной электрической сети необходимо разработать математическую модель прогнозирования отказов. Наиболее эффективным математическим аппаратом при разработке модели является модель вероятностного прогнозирования [2].

На первоначальной стадии разработки модели собрана и проанализирована статистическая информация по отказам распределительных электрических сетей. Информация получена из оперативных журналов по отключениям за период с 2002 по 2012 гг. в Витебских электрических сетях, в состав которых входят 7 районов электросетей (Городокский РЭС, Витебский сельский РЭС, Витебский городской РЭС, Лиозненский РЭС, Бешенковичский РЭС, Шумилинский РЭС, Рубовский РЭС).

Рассмотрим в качестве примера отключение воздушных линий электропередачи в распределительных электрических сетях по причине обрыва и перегорания провода.

Статистические данные об отказах, произошедших в период с 2002 по 2011 гг. в распределительных электрических сетях Витебских ЭС по причине обрыва

ва провода на воздушной линии электропередачи, представлены в табл. 1.

Построим группированный статистический ряд для данных, представленных в табл. 1. Для этого диапазон значений случайной величины отказов разбиваем на интервалы.

Оптимальная величина интервала разбиения [3]:

**Таблица 1. Количество аварийных отключений по причине обрыва провода в распределительных электрических сетях Витебских ЭС (2002-2011 гг.)**

Годы	Месяцы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2002	4	0	5	0	1	1	0	2	7	6	4	2
2003	14	1	1	0	0	3	1	5	2	2	2	1
2004	27	2	2	6	4	1	7	1	0	1	6	2
2005	5	0	1	2	1	2	5	7	1	1	7	3
2006	13	4	1	0	4	4	2	6	4	7	1	3
2007	7	5	1	0	1	2	3	4	1	4	2	1
2008	2	3	2	5	3	1	7	6	5	5	1	5
2009	7	2	2	2	4	6	5	1	1	1	1	6
2010	4	0	1	0	4	3	10	4	3	1	4	6
2011	23	8	0	4	3	2	14	2	1	5	2	4

$$\Delta x \leq \frac{x_{\max} - x_{\min}}{1 + 3,21 \cdot \lg n} = \frac{27 - 0}{1 + 3,21 \cdot \lg 120} = 3,5, \text{ г}$$

где  $(x_{\max} - x_{\min})$  – размах вариации случайной величины  $X$ ;

$n$  – общее число произведенных наблюдений (120 месяцев).

Определим число интервалов разбиения

$$k = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta x} = \frac{27 - 0}{3,5} = 7,7. \quad (1)$$

Разобьем все количество отказов, произошедших с 2002 по 2011 гг., на 8 интервалов.

Определим частоты попадания в интервалы разбиения

$$p_i^* \{X \in (x_i, x_{i+1})\} = \frac{l_i}{n},$$

где  $l_i$  – число наблюдений, в которых значение случайной величины  $X$  попало в  $i$ -й разряд.

$$\text{Причем } \sum_{i=1}^k p_i^* = 1.$$

Также рассчитываем плотность частоты для каждого интервала разбиения:

$$f_i^* = \frac{p_i^*}{\Delta i},$$

где  $\Delta i$  – длина соответствующего интервала. Так как все интервалы приняты равными, то

$$\Delta i = x_{i+1} - x_i = 3,375.$$

Все расчеты занесем в табл. 2.

**Таблица 2. Результаты расчета наблюдаемых частот попадания данных в интервалы разбиения и плотностей частот**

Интервалы	0÷3,375	3,375÷6,75	6,75÷10,125	10,125÷13,5	13,5÷16,875	16,875÷20,25	20,25÷23,625	23,625÷27
Частота, $p_i^*$	0,583	0,291	0,083	0,008	0,017	0,000	0,008	0,008
Плотность частоты, $f_i^*$	0,173	0,086	0,025	0,002	0,005	0,000	0,002	0,002
Число попаданий в интервал, $l_i$	70	35	10	1	2	0	1	1

По данным табл. 2 построим гистограмму (рис. 1).

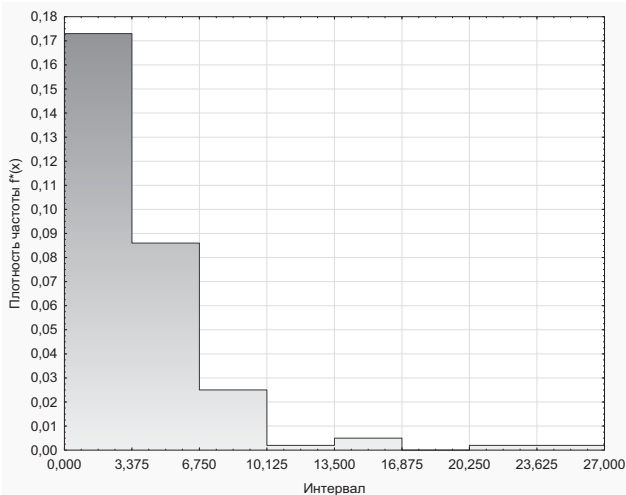


Рисунок 1. Гистограмма распределения отказов

Далее подбираем закон плотности распределения вероятности и на гистограмме строим график плотности распределения  $f(x)$  отключений линий по причине обрыва провода.

В данном случае в качестве теоретического закона распределения отказов принимаем экспоненциальный закон распределения. Этот закон применяется для анализа сложных систем, работающих в тяжелых условиях, где преобладают внезапные отказы. Главной его особенностью является независимость потока отказов от времени эксплуатации [4].

Функция плотности распределения вероятности, которой описывается экспоненциальный закон, имеет вид

$$f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda x} \quad (x > 0),$$

где  $\lambda = \omega(x) = const$  – параметр (интенсивность) потока отказов.

Функция распределения для экспоненциального закона:

$$F(x) = \int_0^x \lambda e^{-\lambda x} dx = 1 - e^{-\lambda x}.$$

Найдем приближенное значение статистического среднего  $m_x^*$

$$m_x^* = \sum_{i=1}^k \tilde{x}_i p_i^* = 1,688 \cdot 0,583 + 5,063 \cdot 0,291 + 8,442 \cdot 0,083 + 11,813 \cdot 0,008 + 15,237 \cdot 0,017 + 21,942 \cdot 0,008 + 25,313 \cdot 0,008 = 3,911.$$

Определим параметр потока отказов

$$\lambda = \frac{1}{m_x^*} = \frac{1}{3,911} = 0,256.$$

Для выравнивания гистограммы построим ее показательную кривую распределения  $f(x) = 0,256 \cdot e^{-0,256x}$ .

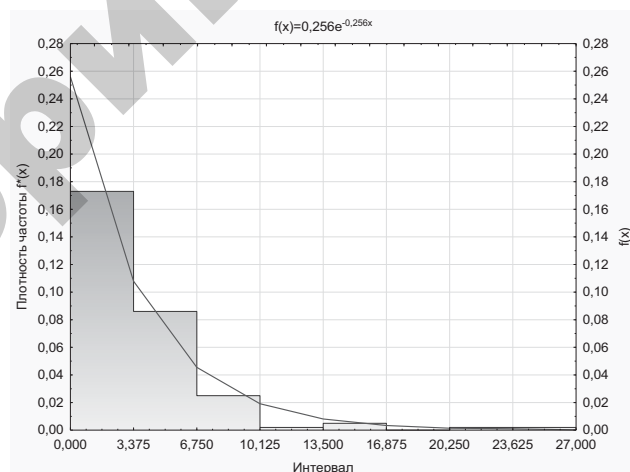


Рисунок 2. Гистограмма с наложенной теоретической функцией плотности распределения вероятности отказов

Пользуясь критерием согласия  $\chi^2$  Пирсона, определяем, не противоречит ли статистическим данным гипотеза о том, что случайная величина  $X$  распределена по экспоненциальному закону

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (2)$$

где  $k$  – число интервалов статистического ряда (1);  $p_i$  – теоретическое значение вероятности попадания случайной величины  $X$  в  $i$ -й интервал, согласно выбранному закону распределения.

**Таблица 3. Результаты расчета теоретических частот попадания данных в интервалы разбиения**

Интервалы	0÷3,375	3,375÷6,75	6,75÷10,125	10,125÷13,5	13,5÷16,875	16,875÷20,25	20,25÷23,625	23,625÷27
Частота, $p_i$	0,579	0,244	0,103	0,043	0,018	0,008	0,003	0,001

В качестве уровня значимости принимаем  $\alpha=0,05$  [5]. Составим таблицу вероятностей попаданий случайной величины  $X$ , подчиненной экспоненциальному закону с параметрами  $m = 3,911$  и  $\lambda=0,256$  в интервалы (табл. 3).

Вероятность попадания случайной величины  $X$  в интервал разбиения равна приращению функции распределения на этом интервале:

$$p_i = P\{X \in (x_i, x_{i+1})\} = \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x)dx = F(x_{i+1}) - F(x_i),$$

где  $F(x) = 1 - e^{-\lambda x}$ .

По формуле (2) найдем расчетное значение  $\chi^2$ :

$$\chi_{набл}^2 = \sum_{i=1}^8 \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} = 10,17.$$

Число степеней свободы  $r$  для экспоненциального закона распределения [6]:

$$r = k - 2 = 8 - 2 = 6.$$

Определяем критическое значение  $\chi^2$  для  $r = 6$  и  $\alpha = 0,05$  [3].

$$\chi_{крит}^2(0,05; 6) = 12,6.$$

Сравним значения критериев согласия

$$\chi_{набл}^2 < \chi_{крит}^2,$$

$$10,17 < 12,6.$$

Таким образом, можно сделать вывод, что выдвинутая гипотеза об экспоненциальном распределении случайной величины  $X$  не противоречит статистическим данным.

На основании подобранного закона распределения составим прогноз отключений на 2012 год. Для этого необходимо представить закон распределения в интегральном виде и решить интеграл через нахождение квантиля с доверительной вероятностью  $P=0,95$  [5].

На рис. 3 представлена кривая распределения для экспоненциального закона  $f(x)=0,256 \cdot e^{-0,256x}$ . Заштрихованная площадь соответствует вероятности  $a = 0,95$ .

Получим уравнение для прогнозирования отказов воздушных линий по причине обрыва проводов

$$P = F(x) = \int_0^{a_{0,95}} f(x)dx = \int_0^{a_{0,95}} \lambda e^{-\lambda x} dx = \int_0^{a_{0,95}} 0,256 e^{-0,256x} dx = 0,95. \quad (3)$$

В течение года поток отказов не равномерен и это означает, что количество отказов может отличаться в несколько раз в разные месяцы года. Используя выражение (3) можно получить прогноз данных по отказам электрооборудования (в частности отказы воздушных линий по причине обрыва проводов) с вероятностью 95 % для любого месяца в году. Прогнозируемые значения принимаем для месяцев с максимальным процентным числом отказов из-за того, что может возникнуть ошибка при отличии прогнозируемых и наблюдаемых значений отказов за месяц в два и более раза.

Решая уравнение (3), получим:  $a_{0,95}=11,7$ .

Для расчета прогноза отказов используем пропорцию

$$\Pi = a_{0,95} \cdot \frac{r_{набл}, \%}{r_{max}, \%},$$

где  $\Pi$  – корректируемое значение прогноза на месяц;

$a_{0,95}$  – квантиль плотности распределения с доверительной вероятностью 0,95;

$r_{набл}, \%$  – количество отказов для рассчитываемого месяца, выраженное в % от общего годового числа отказов;

$r_{max}, \%$  – максимальное количество отказов в месяц в течение года, выраженное в % от общего годового числа отказов.

Точность прогноза можно оценить при помощи

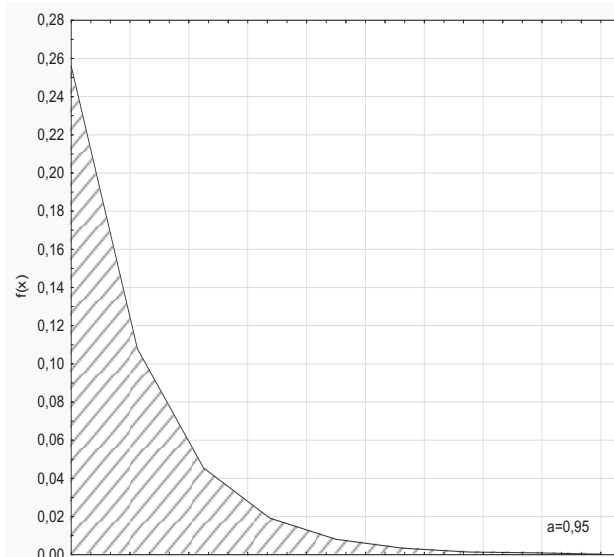


Рисунок 3. Кривая распределения  $f(x)=0,256 \cdot e^{-0,256x}$

относительной ошибки, которая определяется по выражению

$$W = \frac{t - t_n}{t} \cdot 100 \%,$$

где  $t$  – число отказов в месяц за прогнозируемый период;

$t_n$  – значение прогноза на месяц.

**Таблица 4. Среднее годовое распределение отказов воздушных линий по причине обрыва проводов по месяцам за период с 2002 по 2011 гг.**

Месяцы	$r_{набл}, \%$
1	24,824
2	5,854
3	3,747
4	4,449
5	5,854
6	5,854
7	12,646
8	8,899
9	5,854
10	7,728
11	7,025
12	7,728
Всего за год	100

Рассчитаем прогнозные значения отказов воздушных линий по причине обрыва проводов на каждый месяц 2012 года, а также подсчитаем ошибку прогноза, сравнивая прогнозные значения и реальные данные по отказам ВЛ за 2012 год. Результаты сводим в табл. 5.

**Таблица 5. Прогнозные значения и ошибка прогноза**

Месяц	Прогноз количества отказов	Реальное число отказов	Ошибка прогноза W, %
1	12	3	-290
2	3	8	65,51
3	2	7	74,77
4	2	5	58,06
5	3	3	8,03
6	3	5	44,82
7	6	8	25,5
8	4	5	16,11
9	3	4	31,02
10	4	6	39,29
11	3	2	-65,55
12	4	3	-21,41
<b>Всего за год</b>	<b>47</b>	<b>59</b>	<b>19,75</b>

Отрицательные значения ошибка прогноза принимает в тех случаях, когда прогнозные значения превышают реальные.

### Заключение

Дана оценка состояния распределительных сетей 10-0,4 кВ на примере Витебских ЭС, а также подобран и проверен на соответствие критерию Пирсона экспоненциальный закон распределения отказов воздушных линий по причине обрыва проводов. По расчетным данным построена кривая распределения  $f(x)=0,256 \cdot e^{-0,256x}$  и получено уравнение для прогнозирования отказов

$$\int_0^{a_{0,95}} 0,256e^{-0,256x} dx = 0,95.$$

В результате произведенных расчетов прогнозного значения отказов воздушных линий электропередачи по причине обрыва проводов было выявлено, что ошибка при прогнозе на год незначительная и составляет 19,75 %, однако при прогнозировании отказов по месяцам ошибка очень высокая – более 50 %. Исходя из полученных значений ошибки можно сделать вывод, что предложенный способ эффективен при составлении годовых прогнозов.

На основании прогнозной информации можно более качественно проводить организационно-технические мероприятия, влияющие на надежность электроснабжения, а также спланировать работу персонала и рассчитать запасной фонд.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лещинская, Т.Б. Многокритериальная оценка технико-экономического состояния распределительных электрических сетей / Т.Б. Лещинская, В.В. Князев // Вестник МГАУ, 2010. – №2. – С. 14.
2. Микрюков, Д.Н. Модель прогноза отказов электрооборудования / Д.Н. Микрюков // Сб. науч. тр. проф.-преподав. состава Рязанской ГСХА. – Рязань, 2006. – С. 314.
3. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пос. для втузов / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.
4. Шеметов, А.Н. Надежность электроснабжения: учеб. пос. / А.Н. Шеметов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2006. – 141 с.
5. Анищенко, В.А. Основы надежности систем электроснабжения: учеб. пос. / В.А. Анищенко, И.В. Колосова. – Мн.: БНТУ, 2007. – 151 с.
6. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пос. для втузов / В.Е. Гмурман. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1977. – 479 с.