

ПРИМЕНЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЙБУЛЛА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСТЕПЕННЫХ ОТКАЗОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПОНИЖЕННОМ КАЧЕСТВЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В., Нестерович В.В., Бараненко Т.К.
Приазовский государственный технический университет
gorpinich_o_v@pstu.edu

Expressions for reliability indices of electrical equipment operated in the networks with low power quality are presented. The comparative analysis of the two models for unavailability estimation using Weibull and normal distributions is considered. The results in the numerical examples are demonstrated.

Существует два подхода к решению задач теории и практики надежности электроэнергетических систем (ЭЭС). Первый подход базируется на исследовании физических процессов развития отказов элементов ЭЭС и изучении физико-химических свойств и параметров электрооборудования (ЭО). При использовании этого подхода текущие состояния элементов описываются уравнениями, отражающими физические закономерности, следовательно, в процессе функционирования элемент может находиться в различных состояниях. Второй подход основан на исследовании статистических закономерностей появления отказов группы идентичных электроэнергетических объектов. В этом случае отказы рассматриваются как некоторые случайные события, а многообразные физические состояния элементов сводятся, как правило, к двум состояниям – работоспособному и неработоспособному (полному или частичному).

На современном этапе развития теории и практики надежности ЭЭС наиболее исследован статистический подход. Однако разработанные в рамках этого подхода модели надежности характеризуются тем, что показатели надежности элементов ЭЭС в ряде случаев определяются без учета их конструктивных особенностей, физико-химических свойств применяемых материалов, режима работы и внешних воздействий неблагоприятных факторов (температура, влажность, вибрация и т.п.). При этом выражение надежности в виде отвлеченной от реального процесса функционирования числовой величины не всегда имеет физический смысл, так как при изменении перечисленных факторов будет изменяться и число, характеризующее надежность. Ограниченность статистического метода исследования проявляется в полной мере, когда возникает необходимость определить, не просто работает или не работает элемент ЭЭС, а как работает и к чему такая работа приведет в дальнейшем. Указанные недостатки предопределяют дальнейшее развитие методов оценки функциональной надежности ЭО и объединение этих методов со статистическими моделями отказов в целях адекватного отражения особенностей функционирования.

Известно, что в зависимости от процессов проявления отказы ЭО подразделяются на внезапные и постепенные. Внезапные отказы носят случайный характер и проявляются в результате резкого изменения основных параметров ЭО (механические повреждения, повреждения вследствие неблагоприятных внешних условий, ошибки дежурного персонала и т.д.). Постепенные отказы возникают в результате явлений износа, старения ЭО или его отдельных частей, при этом наблюдается плавное изменение основных параметров ЭО. Следует отметить, что подразделение отказов на внезапные и постепенные является достаточно условным, так как постепенные отказы часто проявляются в форме внезапных и наоборот.

Для описания внезапных отказов элементов ЭЭС используют экспоненциальное распределение, основное свойство которого заключается в том, что интенсивность отказов не зависит от времени и в среднем остается приблизительно постоянной величиной. Для описания постепенных отказов элементов ЭЭС чаще всего используют нормальное распределение, распределение Вейбулла и гамма-распределение с параметрами, при которых интенсивность отказов с течением времени возрастает. Цель работы – представить математические модели, позволяющие определить показатели надежности ЭО при пониженном качестве электроэнергии (КЭ) для случая, когда время безотказной работы описывается распределением Вейбулла; сравнить результаты расчета показателей надежности, полученные с использованием распределения Вейбулла и нормального распределения, и оценить возникающую при этом погрешность.

При аппроксимации статистических данных возможны случаи, когда одни и те же данные могут быть одинаково успешно описаны нормальным распределением и распределением Вейбулла. Поясним сказанное на конкретном примере. Рассмотрим результаты исследования причин отказов кабельных линий (КЛ), проведенного в Польше (табл. 1) [1].

Таблица 1 - Причины отказов КЛ напряжением 15 кВ

Причины отказов	%
Нарушение изоляции	37,4
Старение	26,2
Механические повреждения	18,8
Коммутационные и грозовые перенапряжения	9,4
Воздействие влаги	5,1
Причина неизвестна	3,1

В результате исследования было установлено, что главными причинами отказов КЛ являются нарушение изоляции и старение (см. табл. 1). В исследовании использовалась статистически значимая выборка – в результате четырехлетних наблюдений было проанализировано 382 отказа, рассматривались кабели с периодом эксплуатации от 1 года до 28 лет. После того, как были исключены из рассмотрения отказы, обусловленные механическими повреждениями (объем выборки составил 310 отказов), J.C. Stepien установил, что функция надежности КЛ может быть аппроксимирована распределением Вейбулла со следующими параметрами:

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{19}\right)^{5,2}\right], \quad (1)$$

где $b = 5,2$ – параметр формы; $a = 19$ – параметр масштаба.

Так как полученный параметр формы $b > 1$, то интенсивность отказов КЛ с течением времени монотонно возрастает, что свидетельствует о наличии явлений старения.

Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение срока службы КЛ при использовании распределения Вейбулла можно определить из следующих выражений:

$$m_V = a\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right); \quad (2)$$

$$\sigma_V^2 = a^2\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right)\right], \quad (3)$$

где $\Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$, $\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right)$ – гамма-функции от параметра распределения b .

Гамма-функция определяется равенством

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt. \quad (4)$$

При известных значениях m_V и σ_V параметр формы b может быть найден из соотношения:

$$\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right)} = 1 + \left(\frac{\sigma_V}{m_V}\right)^2. \quad (5)$$

После того, как определен параметр формы b , путем решения уравнения (2) находится параметр масштаба a .

Расчет по выражениям (2), (3) с учетом уравнения (1) приводит к следующим результатам: $m_V = 17,49$ лет, $\sigma_V = 3,86$ лет.

Если параметр формы $b = 3,9$, то расхождение между нормальным распределением и распределением Вейбулла становится незначительным [2]. Так как в уравнении (1) $b = 5,2 > 3,9$, следовательно, функция надежности КЛ достаточно хорошо описывается нормальным законом распределения со следующими параметрами:

$$R(t) = 0,5 + \Phi\left(\frac{17,49 - t}{3,86}\right), \quad (6)$$

где $\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ – интеграл вероятностей.

Анализ выражений (1) и (6) показывает, что максимальная погрешность не превышает 5,2 %. Следовательно, с допустимой для практики точностью расчеты нормальное распределение и распределение Вейбулла могут рассматриваться в данном случае как эквивалентные.

Рассмотрим пример использования распределения Вейбулла для моделирования постепенных отказов ЭО, работающего в условиях пониженного КЭ. Поскольку одной из конечных целей расчета надежности, как

правило, является оценка ущерба от недоотпуска электроэнергии, то необходимые расчеты проведем применительно к оценке именно этого комплексного показателя надежности. Для этого используем результаты исследования [3], проведенного на заводе по производству пластмассы. Завод получает питание от двух трансформаторов мощностью 630 кВА по двум радиальным линиям. Основную нагрузку составляют печи сопротивления с управлением от преобразователей, электропривод и асинхронные двигатели. Компенсация реактивной мощности на предприятии осуществляется с помощью батарей конденсаторов. Для снижения уровня высших гармоник (ВГ) в точке общего присоединения до нормируемых пределов был выполнен технико-экономический расчет пассивного и активного фильтра. При использовании пассивного фильтра, состоящего из фильтра 5-й гармоники и фильтра верхних частот для подавления помех на частотах выше 17-й ВГ, суммарные затраты в течение 10 лет эксплуатации составили 25 тыс. \$ (19,5 тыс. \$ – стоимость устройств, 5,5 тыс. \$ – стоимость потерь электроэнергии в них). Суммарные затраты при установке активного фильтра мощностью 120 кВА также с учетом 10 лет эксплуатации составили 55,5 тыс. \$ (43,5 тыс. \$ – стоимость фильтра, 12 тыс. \$ – стоимость потерь электроэнергии).

Предположим, что при отсутствии фильтров искажение кривой питающего напряжения приводит к ускоренному электрическому старению изоляции трансформаторов. Воздействие электрического старения на снижение надежности изоляции трансформаторов будем учитывать с помощью показателя

$$K_m = U_m / U_{1m}, \quad (7)$$

где U_m и U_{1m} – амплитуда несинусоидального напряжения и амплитуда напряжения основной частоты, соответственно.

Для оценки ущерба от недоотпуска электроэнергии используем выражение [4]

$$Y = ym(\Xi) = yK_{\Pi}m(P)t_{\Pi}, \quad (8)$$

где Y – математическое ожидание ущерба от недоотпуска электроэнергии; y – удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии; $m(\Xi)$ и $m(P)$ – математическое ожидание недоотпущенной электроэнергии и потребляемой мощности, соответственно; K_{Π} – коэффициент простоя; t_{Π} – длительность перерыва электроснабжения.

Если время безотказной работы описывается распределением Вейбулла, то коэффициент простоя (средняя вероятность застать трансформатор в неработоспособном состоянии из-за постепенного отказа, вызванного повышенным износом изоляции за счет ВГ) можно определить по следующему выражению:

$$K_{\Pi \text{ ВГ}} = \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{2i-1}{2N} \right) \frac{\exp \left[- \left(\frac{(i-1) \frac{t}{N} + T}{a} \right)^b \right] - \exp \left[- \left(\frac{i \frac{t}{N} + T}{a} \right)^b \right]}{\exp \left[- \left(\frac{T}{a} \right)^b \right]}, \quad (9)$$

где a , b – параметры распределения Вейбулла (см. выражение (1)); t – период, следующий за периодом T безотказной работы; N – количество интервалов, каждый из которых имеет длину $\Delta t = t/N$.

Коэффициент готовности

$$K_{Г \text{ ВГ}} = 1 - K_{\Pi \text{ ВГ}}. \quad (10)$$

Коэффициент простоя $K_{\Pi \text{ ВГ}}$ может быть легко интегрирован в существующие методы для оценки надежности ЭО, если определить эквивалентный общий коэффициент простоя, учитывающий возможность появления внезапных отказов. При экспоненциальном законе распределения времени безотказной работы и времени восстановления вероятность застать ЭО в неработоспособном состоянии из-за внезапного отказа

$$K_{\Pi \text{ вн}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{T_{\text{в.ср}}}{T_{\text{ср}} + T_{\text{в.ср}}} = \frac{T_{\text{в.ср}}}{T_{0\text{ср}}} = \frac{\omega T_{\text{в.ср}}}{8760}, \quad (11)$$

где λ – интенсивность внезапных отказов; μ – интенсивность восстановления; $T_{\text{в.ср}}$ – среднее время восстановления; $T_{\text{ср}}$ – средняя наработка до отказа или среднее время безотказной работы; $T_{0\text{ср}}$ – средняя наработка между отказами; ω – средний параметр потока отказов.

Эквивалентный общий коэффициент простоя

$$K_{\Pi} = K_{\Pi \text{ вн}} + K_{\Pi \text{ вг}} - K_{\Pi \text{ вн}} K_{\Pi \text{ вг}}. \quad (12)$$

Соответствующий коэффициент готовности

$$K_{Г} = 1 - K_{\Pi}. \quad (13)$$

В табл. 2 представлены показатели надежности трансформатора типа ТМ-630/10, рассчитанные при разных значениях параметров распределения случайной величины K_m (при расчете принято, что закон

распределения случайной величины K_m – равномерный, в первых двух столбцах табл. 2 приведены математическое ожидание $m(K_m)$ и среднеквадратическое отклонение $\sigma(K_m)$). Средний параметр потока отказов принят равным $\omega = 0,08$ 1/год; $T_{в.ср} = 60$ ч; $T = 12$ лет; $t = 10$ лет. В табл. 3 приведены результаты оценки ущерба от снижения надежности трансформаторов при наличии ВГ. Расчет ущерба выполнен при условии, что перерыв электроснабжения происходит из-за постепенного отказа одного из трансформаторов, в то время как другой находится в плановом ремонте. Удельный ущерб от недоотпуска электроэнергии принят равным $y = 12$ \$/кВт·ч; $m(P) = 900$ кВт; $t_{п} = 60$ ч. Расчеты показателей надежности проведены для двух случаев: а) время безотказной работы описывается нормальным распределением; б) время безотказной работы описывается распределением Вейбулла.

Таблица 2 - Показатели надежности трансформатора типа ТМ-630/10 при искаженной кривой питающего напряжения

Параметры величины K_m		Показатели надежности				
		Нормальное распределение			Распределение Вейбулла	
$m(K_m)$	$\sigma(K_m)$	$K_{пвн}$	$K_{пвг}$	$K_{п}$	$K_{пвг}$	$K_{п}$
1,04	$1,155 \cdot 10^{-2}$	$5,48 \cdot 10^{-4}$	0,01934	0,019878	0,0264	0,026933
1,05	$1,155 \cdot 10^{-2}$	$5,48 \cdot 10^{-4}$	0,066809	0,06732	0,070019	0,070529
1,06	$1,155 \cdot 10^{-2}$	$5,48 \cdot 10^{-4}$	0,173467	0,173919	0,166905	0,167362

Таблица 3 - Влияние ВГ на убытки потребителя от недоотпуска электроэнергии

$m(K_m)$	Нормальное распределение			Распределение Вейбулла			Затраты на фильтры ВГ, тыс. \$	
	$K_{пвг}$	$K_{п}$	Ущерб, тыс. \$	$K_{пвг}$	$K_{п}$	Ущерб, тыс. \$	Активный фильтр	Пассивный фильтр
1,04	0,01934	0,019878	12,881	0,0264	0,026933	17,453	55,500	25,000
1,05	0,066809	0,06732	43,623	0,070019	0,070529	45,703	55,500	25,000
1,06	0,173467	0,173919	112,7	0,166905	0,167362	108,45	55,500	25,000

Сравнение результатов расчета показателей надежности, полученных с использованием распределения Вейбулла и нормального распределения, приводит к достаточно интересным выводам. Оказывается, при одних и тех же параметрах величины K_m (отрицательного воздействия ВГ на изоляцию), а, соответственно, и одинаковых значениях математического ожидания и среднеквадратического отклонения срока службы, использование нормального распределения дает завышенную оценку надежности и заниженную оценку ущерба при малых значениях K_m (по сравнению с распределением Вейбулла). По мере увеличения отрицательного воздействия на изоляцию результаты расчетов показателей надежности, полученные с использованием рассматриваемых распределений, приблизительно совпадают. При больших значениях K_m ситуация меняется – завышенную оценку надежности и заниженную оценку ущерба дает распределение Вейбулла (по сравнению с нормальным распределением). В целом, с допустимой для практики точностью расчетов надежности нормальное распределение и распределение Вейбулла могут рассматриваться в данном случае как эквивалентные.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stepien J.C. Reliability models of medium voltage cable lines // Present-Day Problems of Power Engineering. – Jurata, Hel Peninsula (Poland), 2001. – P. 323 – 330.
2. Хаушильд В., Мош В. Статистика для электротехников в приложении к технике высоких напряжений: Пер. с нем. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 312 с.
3. A survey on power quality cost in industrial customers / R. Lamedica, G. Esposito, E. Tironi, D. Zaninelli, and A. Prudenzi // IEEE PES Winter Meeting. – Columbus (USA), 2001. – P. 938 – 943.
4. Zhezhelenko I.V., Sayenko Y.L., Gorpinich A.V. Economical damage due to low power quality // Proc. 9th International Conference on "Electrical Power Quality and Utilization" (EPQU'07). – Barcelona (Spain), 2007. – P. 123 – 128.

Рекомендовано д.т.н. Сивокобиленко В.Ф.