

УДК 622.621.31-213.34:622.86

А.Г. Захарова, И.О. Шалаев

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА ПРИ ОБСЛЕДОВАНИИ СОСТОЯНИЯ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА КРУПНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

В соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» (ПТЭЭП) по истечении установленного нормативно-технической документацией срока службы все технологические системы и электрооборудование должны подвергаться техническому освидетельствованию комиссией, возглавляемой техническим руководителем Потребителя, с целью оценки состояния, установления сроков дальнейшей работы и условий эксплуатации.

Обследование состояния технологических систем обычно не встречает особых трудностей из-за относительно небольшого числа их элементов. В то же время, комиссии, образованные техническими руководителями крупных предприятий, сталкиваются с необходимостью обследовать большое число (до нескольких десятков тысяч единиц) электротехнического оборудования, и, в частности, взрывозащищенного (ВЗЭО), если предприятие имеет в своем составе взрывоопасные производства, что требует больших затрат времени и средств.

Оценка технического состояния ВЗЭО включает следующие основные операции:

- разделение ВЗЭО по характерным признакам, а именно: по типам (электродвигатели высоковольтные и низковольтные, электроаппараты высоковольтные и низковольтные, другое электрооборудование); по годам выпуска (длительности эксплуатации); по видам НТД, по которым оно было изготовлено (ПИВЭ, ПИВРЭ или ГОСТ); по видам взрывозащиты (d – взрывонепроницаемая оболочка; o – масляное или негорючей жидкостью заполнение; p – заполнение или продувка оболочки под избыточным давлением; i – искробезопасная электрическая цепь; q – кварцевое заполнение оболочки; защита вида "e" и др.). Для каждой из выявленных таким образом групп подсчитывается общее число ВЗЭО, объединенного общностью признаков;

- определение выборки из генеральной совокупности;

- проверку параметров, обеспечивающих взрывозащиту, на соответствие требованиям нормативно-технической документации (НТД);

- измерение основных электрических характеристик: сопротивления изоляции; тангенса угла диэлектрических потерь $\tan \delta$ или коэффициента абсорбции R_{60}/R_{15} , где R_{60} и R_{15} – сопротивления изоляции через 60 и 15 с после начала измерения. При наличии соответствующих приборов опреде-

ляют емкость C и диэлектрическую постоянную ϵ ,

- составление протокола освидетельствования ВЗЭО с оценкой технического состояния, установления сроков дальнейшей работы и условий эксплуатации.

Эта работа может быть успешно выполнена на основе методического обеспечения, учитывающего как существующую нормативно – техническую базу, так и результаты выполненных ранее научно-исследовательских работ.

Методы математической статистики позволяют выбрать из общего числа подлежащего обследованию электрооборудования некоторое представительное число образцов (выборку), произвести с относительно небольшими затратами времени их техническое обследование и с некоторой заранее принятой вероятностью распространить полученные результаты на все однотипное электрооборудование, находящееся в эксплуатации, в том числе и взрывозащищенное (ВЗЭО), и принять решение о сроках его дальнейшей безопасной эксплуатации.

К показателям, характеризующим состояние низковольтного (до 1000 В) электрооборудования, относят сопротивление изоляции, а для высоковольтного еще и показатели увлажненности изоляции – коэффициент абсорбции R_{60}/R_{15} и тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$.

Действующая нормативная документация [1 - 3] рекомендует определять характеристики состояния электрооборудования, в том числе взрывозащищенного, двумя методами – параметрическим, если законы распределения случайных величин известны, и непараметрическим, если законы неизвестны. Применительно к задаче определения технического состояния может быть применен параметрический метод, так как из выполненных ранее исследований, например, [4, 5] известно, что плотность распределения вероятностей сопротивления изоляции однотипного ВЗЭО имеет, как правило, нормальное распределение. Такие же распределения имеют характеристики увлажненности изоляции ($\tan \delta$ и коэффициент абсорбции R_{60}/R_{15}) и электрической прочности.

Плотность нормального закона распределения, например, сопротивления изоляции однотипного электрооборудования, записывается в виде:

$$f(R_{us}) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{|R_{us} - R_{cp}|}{2\sigma}\right),$$

где σ – среднеквадратическое отклонение сопротивления изоляции; R_i – результат i -го измерения сопротивления изоляции; R_{cp} – среднее значение по результатам n замеров выборки из генеральной совокупности однотипных изделий, например, электродвигателей.

Среднее арифметическое значение находят по соотношению:

$$R_{cp} = \sum R_i / n \quad (1)$$

среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma = \sqrt{D(R)},$$

где

$$D(R) = \left[\sum_1^n (R_i - R_{cp})^2 \right] / (n-1). \quad (2)$$

Для формирования выборки используют известную выборку без возврата. Каждое из однотипных изделий, представляющих генеральную совокупность, идентифицируется по инвентарному или по заводскому номеру. Изделия могут быть специально пронумерованы. С помощью генератора случайных чисел из генеральной совокупности извлекаются номера изделий, попадающих в выборку, которые после их записи обратно не возвращаются. Повторяя процедуру по одному изделию, получают выборочную совокупность любого заданного размера – выборку без возврата.

Рассчитывают необходимый объем выборки, задавшись желательной степенью точности оценки Δ и доверительной вероятностью $\gamma = (1 - \beta)$. Здесь возможны два варианта.

Если известно, что исследуемая случайная величина подчиняется нормальному закону распределения и ее среднеквадратическое отклонение σ известно, то доверительную вероятность принимают $\gamma = (1 - \beta) = \Phi(t_p)$ и из таблицы нормальной функции распределения

$$\Phi^*(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

для заданной вероятности находят t_p [6]. Объем выборки определяют по формуле:

$$n = (N t_p^2 \sigma^2) / [(N-1) \Delta^2 + t_p^2 \sigma^2], \quad (3)$$

где N – объем генеральной совокупности.

Если отклонение σ случайной величины R , подчиняющейся нормальному закону неизвестно, то предварительно берут небольшую пробную выборку n^* и по ее данным приближенно оценивают параметр

$$\sigma^{*2} = \frac{1}{k-1} \sum (x_i - x_{cp}^*)^2,$$

где σ^{*2} – выборочная дисперсия пробной выборки.

Эту оценку подставляют в формулу (3), которая в этом случае принимает вид:

$$k = (N t_{n^* \gamma}^2 \sigma^{*2}) / [(N-1) \Delta^2 + t_{n^* \gamma}^2 \sigma^{*2}]$$

где $t_{n^* \gamma}^2$ – значение t – распределения Стьюдента, соответствующее вероятности γ и числу наблюдений k .

При большом объеме генеральной совокупности ($N \rightarrow \infty$) используют выражение

$$n = (t_p^2 \sigma^2) / \Delta^2,$$

если дисперсия известна, и выражение

$$n = (t_{n^* \gamma}^2 \sigma^{*2}) / \Delta^2,$$

если дисперсия неизвестна.

После расчета объема случайной выборки приступают к процедуре отбора случайных образцов с помощью безвозвратного способа, описанного выше. Затем производят измерения характеристик, определяющих техническое состояние электрооборудования (сопротивления изоляции, электрической прочности или показателей увлажненности изоляции) каждого изделия, попавшего в выборку (по идентификационным номерам), в отдельности. Результаты измерений фиксируют в виде ряда $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ и с помощью формул (1) и (2) определяют выборочные характеристики – среднее арифметическое или оценку математического ожидания R°_{cp} , дисперсию $D^{\circ}(R)$ и среднеквадратическое отклонение σ° . Знак \circ означает, что эти характеристики относятся к выборке. Далее определяется, с какой степенью достоверности эти данные характеризуют генеральную совокупность, то есть можно ли выборочные характеристики и с какой вероятностью считать характеристиками генеральной совокупности. Для этой цели необходимо найти генеральную дисперсию и построить доверительные интервалы.

Генеральную дисперсию определяют по формуле:

$$\sigma^2 = (N-1) \sigma^{\circ2} / N.$$

При большом объеме генеральной совокупности сомножитель $(N-1)/N$ принимают равным единице и тогда генеральная дисперсия оценивается выборочной дисперсией, то есть $\sigma^0 = \sigma^{\circ2}$.

В случае, если количество имеющегося электрооборудования меньше объема рассчитанной выборки, техническому освидетельствованию подлежит все электрооборудование, составляющее генеральную совокупность.

Если выборочное математическое ожидание (среднее арифметическое значение), рассчитанное по результатам испытания выборки, сопротивления изоляции известно и равно R°_{cp} , то истинное значение R_{iz} находится между нижней R_H и верхней R_B границами доверительного интервала:

$$R_H < R_{iz} < R_B. \quad (4)$$

Двусторонние доверительные интервалы в формуле (4) рассчитывают, используя таблицы [6], где приведены квантили распределения Стьюдента $t_{\gamma/2}$ для двусторонних интервалов.

Для принятой доверительной вероятности γ и объема выборки ($n-1$) находят критерий $t_{\gamma(2)}$ и нижнюю и верхнюю границы интервалов:

$$R_H = R_{ep}^0 - (t_{\gamma(2)} \sigma) / \sqrt{n}, \quad (5)$$

$$R_B = R_{ep}^0 + (t_{\gamma(2)} \sigma) / \sqrt{n}. \quad (6)$$

В большом числе случаев, например, при измерениях сопротивления изоляции и других характеристик, нет необходимости знать верхнюю границу доверительного интервала, поскольку нижняя граница показывает, соответствует нормам выбранные случайным образом изделия или нет. В этом случае нижнюю границу находят по таблицам [6], где приведены квантили распределения Стьюдента $t_{\gamma(1)}$ для односторонних интервалов, а формула для ее определения имеет вид:

$$R_H \leq R_{ep}^0 - (t_{\gamma(1)} \sigma) / \sqrt{n} \quad (7)$$

Расчеты по формулам (5) - (7), показывают, что с вероятностью $\gamma = 1 - \beta = \Phi(t_\gamma)$ исследуемая величина находится внутри доверительного интервала $R_H < R_{из} < R_B$.

В случае, если исследуемая величина выходит за рамки доверительных интервалов (5) - (7), техническому освидетельствованию подлежит все электрооборудование, составляющее генеральную совокупность.

Необходимо заметить, что для оценки удовлетворительного технического состояния электродвигателей по такому параметру, как сопротивление изоляции, значение доверительной вероятности можно принять не более $\gamma = 0,8$ из-за широкого разброса этого параметра в процессе эксплуатации. Опыт свидетельствует, что у поступивших с заводов-изготовителей электродвигателей сопротивление изоляции колеблется от 500 до 1000 МОм. Примерно такие же значения оно имеет и у электродвигателей, поступивших из ремонта. В

соответствии с ПТЭЭП сопротивление изоляции обмоток электродвигателей на напряжение до 1000 В должно быть не менее 1 МОм при температуре $10 - 30^\circ C$, а при температуре $60^\circ C - 0,5$ МОм, то есть оно может меняться в два раза у одного и того же электродвигателя в разных его состояниях – в рабочем (нагретом) и нерабочем (охлажденном). В силу такого большого разброса нормируемого сопротивления изоляции можно рекомендовать принимать в расчетах значение доверительной вероятности не выше 0,8.

В [4, 5] представлены значения $R_{из}$, $\operatorname{tg}\delta$, R_{60}/R_{15} , C и ε , при которых электрооборудование считается удовлетворяющим техническим требованиям и может быть допущено к дальнейшей эксплуатации. Приведенные значения технических характеристик ВЗЭО должны быть меньше нижнего значения доверительного интервала. Срок следующего освидетельствования (длительность эксплуатации до следующего освидетельствования) определяют по формуле:

$$t_{kp} = \frac{R_{нач} - R_{факт}}{U_t},$$

где U_t – скорость изменения сопротивления изоляции от начального значения $R_{нач}$ до фактического $R_{факт}$ на момент измерения или скорость изменения характеристики за это время.

Применение предложенной методики позволяет оценить состояние ВЗЭО и условия его эксплуатации, а также предсказать возможную ее длительность с определенной достоверностью и приемлемой допустимой ошибкой на предприятиях, имеющих взрывоопасные производства, без необходимости обследования нескольких десятков тысяч единиц электрооборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ 27.301-95 Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. - М.: Госстандарт России, 1997.
- РД 50-690-89. Методические указания. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. – М.: Госстандарт СССР, 1991.
- ОСТ 16-0.801.196-84. Оборудование электротехническое взрывозащищенное и рудничное. Надежность. Методика сбора и статистической обработки информации по результатам эксплуатационных испытаний. – М.: Госстандарт СССР, 1985.
- Соболев, В. Г. Электрическая изоляция рудничного электрооборудования. – М.: Недра, 1982.
- Беняк, Н. А. Принципы управления состоянием изоляции в электротехнических комплексах / А. И. Сидоров, К. В. Лапченков // Безопасность жизнедеятельности: Сб. научн. трудов. Челябинск: ЧГТУ, 1996. – С. 7–10.
- Кремер, Н. Ш. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2002.

□ Авторы статьи:

Захарова

Алла Геннадьевна

– докт. техн. наук, проф. каф. электро-
привода и автоматизации КузГТУ,
тел. 8-906-982-9918

Шалаев

Иван Олегович

– ассистент каф. электроснабжения
горных и промышленных предпри-
ятий КузГТУ, тел. 8-950-598-1437