УДК 621. 311

НЕОБХОДИМЫЕ И ДОСТАТОЧНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ДОСТОВЕРНОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В. В. ШАРОВ

Казанский государственный энергетический университет

Рассмотрена модель выбора оптимального числа контролируемых параметров электрооборудования в условиях эксплуатации по показателю достоверности. Показано, что математическая модель приемлема по точности получаемых решений и проста с точки зрения ее реализации на практике.

Для управления состоянием электрооборудования в условиях эксплуатации необходимо знать достоверность контроля при оценке его состояния. При разработке моделей управления состоянием различных технических систем, как правило, вводят предположение, что достоверность контроля состояния равна единице [1]. Однако на практике достичь такого уровня достоверности достаточно сложно, а в теоретическом плане это приводит к усложнению процедур получения решений [2, 3]. При решении практических задач оценки состояния электрооборудования в условиях эксплуатации можно определить необходимые и достаточные условия, которые позволяют процедуру контроля при оценке состояния электрооборудования сделать достоверной.

Достоверность контроля при оценке состояния электрооборудования

Оценка состояния электрооборудования возможна двумя путями: первый – с контролем уровня надежности, второй – с контролем параметров [4]. Исходя из этого при постановке задач определяются области и условия работоспособности электрооборудования различных типов, которые имеют свою специфику. При использовании модели оценки состояния электрооборудования с контролем параметров учитываются следующие независимые и единственно возможные события. Первое событие – параметр Π_i годный. Второе событие – параметр $\overline{\Pi}_i$ негодный. Третье событие – параметр $\Pi_i^{ск}$, который оценивается системой контроля как годный. Четвертое событие – параметр $\overline{\Pi}_i^{ск}$, который оценивается системой контроля как негодный.

При этом под годным понимается параметр, значения которого находятся в пределах установленных допусков, при которых сохраняется работоспособность электрооборудования, а под негодным – параметр, значения которого выходят за пределы установленных допусков, при которых нарушается работоспособность электрооборудования.

Исходя из постановки задачи, события, записываемые в виде $\Pi_i\ \Pi_i^{ск}$, $\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}$, $\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}$, $\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск}$, считаются как сложные события, поэтому их

© *В.В. Шаров*

вероятности определяются, соответственно, как $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$, $P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$, $P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$.

Полученные таким образом сложные события в пределах рассматриваемого электрооборудования составляют полную группу событий, поэтому сумма их вероятностей равна единице:

$$P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск}) + P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}) + P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}) + P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск}) = 1. \quad (1)$$

Используя теорему умножения вероятностей, получаем соотношения:

$$P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск}) = P(\overline{\Pi}_i)\, P(\Pi_i^{ск} / \Pi_i), \quad (2)$$

$$P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}) = P(\overline{\Pi}_i)\, P(\overline{\Pi}_i^{ск} / \overline{\Pi}_i), \quad (3)$$

$$P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}) = P(\overline{\Pi}_i)\, P(\overline{\Pi}_i^{ск} / \overline{\Pi}_i), \quad (4)$$

$$P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск}) = P(\overline{\Pi}_i)\, P(\Pi_i^{ск} / \overline{\Pi}_i), \quad (5)$$

где $P(\Pi_i^{ск} / \Pi_i)$ – условная вероятность оценки параметра «годен» при условии его годности; $P(\overline{\Pi}_i^{ск} / \Pi_i)$ – условная вероятность оценки параметра «негоден» при условии его годности; $P(\overline{\Pi}_i^{ск} / \overline{\Pi}_i)$ – условная вероятность оценки параметра «негоден» при условии его негодности; $P(\Pi_i^{ск} / \overline{\Pi}_i)$ – условная вероятность оценки параметра «годен» при условии его негодности.

Из соотношений (2)…(5) следует, что

$$P(\Pi_i^{ск} / \Pi_i) + P(\overline{\Pi}_i^{ск} / \Pi_i) = 1, \quad (6)$$

$$P(\overline{\Pi}_i^{ск} / \overline{\Pi}_i) + P(\Pi_i^{ск} / \overline{\Pi}_i) = 1. \quad (7)$$

Кроме того, из соотношений (2)…(5) определяются следующие значения вероятностей:

$$P(\Pi_i) = P(\Pi_i\ \Pi_i^{ск}) + P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}), \quad (8)$$

$$P(\overline{\Pi}_i) = P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск}) + P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}), \quad (9)$$

$$P(\Pi_i^{ск}) = P(\Pi_i\ \Pi_i^{ск}) + P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск}), \quad (10)$$

$$P(\overline{\Pi}_i^{ск}) = P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}) + P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}). \quad (11)$$

Анализируя соотношения (8)…(11), можно сделать вывод, что ошибочная оценка параметров системой контроля имеет место при условии наступления событий $\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск}$ и $\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск}$. Исходя из этого, достоверность контроля *i*-го параметра D_i^k, под которой понимается вероятность правильной оценки системой

контроля состояния параметра, определяется из соотношения

$$D_i^k = P(\Pi_i \ \Pi_i^{\text{ск}}) + P(\overline{\Pi}_i \ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}}). \qquad (12)$$

Вероятности ошибочной оценки состояний i-го параметра $P(\overline{\Pi}_i \ \Pi_i^{\text{ск}})$ и $P(\overline{\Pi}_i \ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}})$ представляют собой ошибку второго рода, являющуюся риском заказчика, и ошибку первого рода, являющуюся риском изготовителя, соответственно.

Для определения вероятностей D_i^k, $P(\overline{\Pi}_i \ \Pi_i^{\text{ск}})$ и $P(\Pi_i \ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}})$по величине допуска на параметр и по его среднему квадратическому отклонению, а также исходя из точности измерений для системы контроля, необходимо записать математические соотношения для этих вероятностей. Для решения данной задачи введем обозначения в виде плотностей распределения $f_n(x_i)$ и ошибок измерения $f_{\text{ои}}(t_i)$ i-го параметра соответственно, нижнюю $x_{\text{н}i}$ и верхнюю $x_{\text{в}i}$ границы его допуска соответственно, его номинальное значение x_{0i}, величину его допуска $\Delta_i(1+\kappa_i) = x_{\text{в}i} - x_{\text{н}i}$, а также коэффициент несимметричности поля его допуска $\kappa_i = (x_{\text{в}i} - x_{0i})/(x_{0i} - x_{\text{н}i})$. Введенные обозначения показаны на рис. 1.

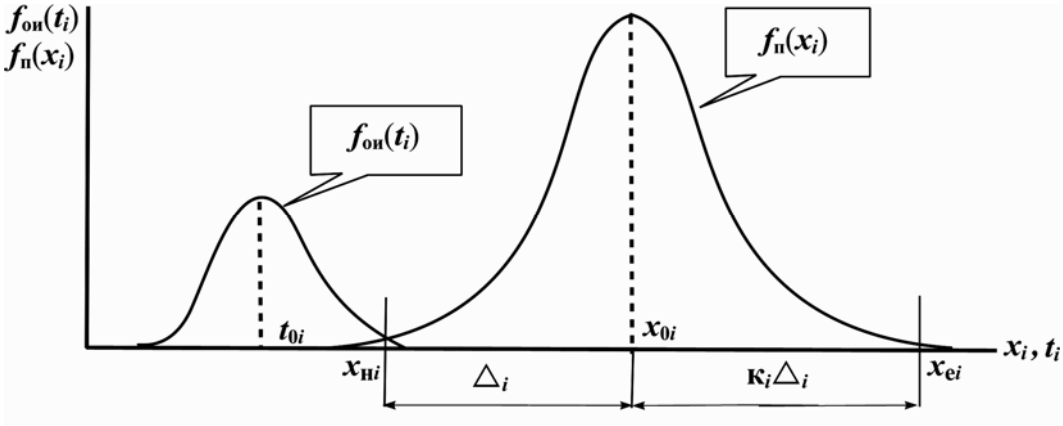

Рис. 1. Характеристики контролируемого параметра и системы контроля

Исходя из принятых обозначений, соотношения для вероятностей $P(\Pi_i \ \Pi_i^{\text{ск}})$, $P(\Pi_i \ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}})$, $P(\overline{\Pi}_i \ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}})$ и $P(\overline{\Pi}_i \ \Pi_i^{\text{ск}})$ будут иметь вид:

$$P(\Pi_i \Pi_i^{\text{ск}}) = \int_{x_{\text{н}i}}^{x_{\text{в}i}} f_n(x_i)\Big[\int_{x_{\text{н}i}-x_i}^{x_{\text{в}i}-x_i} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i\Big]dx_i, \qquad (13)$$

$$P(\Pi_i \overline{\Pi}_i^{\text{ск}}) = \int_{x_{\text{н}i}}^{x_{\text{в}i}} f_n(x_i)\Big[\int_{-\infty}^{x_{\text{н}i}-x_i} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i + \int_{x_{\text{в}i}-x_i}^{\infty} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i\Big]dx_i, \qquad (14)$$

$$P(\overline{\Pi}_i \overline{\Pi}_i^{\text{ск}}) = \int_{-\infty}^{x_{\text{н}i}} f_{\text{п}}(x_i)\Big[\int_{-\infty}^{x_{\text{н}i}-x_i} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i + \int_{x_{\text{в}i}-x_i}^{\infty} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i\Big]\,dx_i +$$

$$+ \int_{x_{\text{в}i}}^{\infty} f_{\text{п}}(x_i)\Big[\int_{-\infty}^{x_{\text{н}i}-x_i} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i + \int_{x_{\text{в}i}-x_i}^{\infty} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i\Big]\,dx_i, \qquad (15)$$

$$P(\overline{\Pi}_i \Pi_i^{\text{ск}}) = \int_{-\infty}^{x_{\text{н}i}} f_{\text{п}}(x_i)\Big[\int_{x_{\text{н}i}-x_i}^{x_{\text{в}i}-x_i} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i\Big]dx_i + \int_{x_{\text{в}i}}^{\infty} f_{\text{п}}(x_i)\Big[\int_{x_{\text{н}i}-x_i}^{x_{\text{в}i}-x_i} f_{\text{ои}}(t_i)dt_i\Big]\,dx_i. \qquad (16)$$

Для использования соотношений (13)…(16) на практике необходимо вероятности событий выразить через характеристики параметров электрооборудования. Обычно в состав контролируемого электрооборудования входит большое число элементов, на которые в процессе эксплуатации действуют различные дестабилизирующие факторы. В результате влияния большого числа факторов и равномерного их воздействия на основании центральной предельной теоремы теории вероятностей делается допущение, что значения параметров электрооборудования распределены по нормальному закону. Практика эксплуатации электрооборудования данное допущение, как правило, подтверждает, и в большинстве случаев значения параметров электрооборудования подчинены нормальному закону. Исходя из этого, подставляя в соотношения (13)…(16) плотность распределения $f_{\text{п}}(x_i)$ и плотность распределения ошибок измерения $f_{\text{ои}}(t_i)$ *i*-го параметра для нормального закона соответственно, в результате получаем соотношения вида

$$f_{\text{п}}(x_i) = \frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}} e^{-(x_i - x_{0i})^2/2\sigma_{\text{i}}^2}, \qquad (17)$$

$$f_{\text{ои}}(t_i) = \frac{1}{\sigma_{\text{ои}_i}\sqrt{2\pi}} e^{-(t_i - t_{0i})^2/2\sigma_{\text{ои}_i}^2}, \qquad (18)$$

где σ_i – среднее квадратическое отклонение *i*-го параметра; $\sigma_{\text{ои}_i}$ – средняя квадратическая ошибка измерения *i*-го параметра системой контроля.

Во время выполнения операций эксплуатационного контроля считаем, что систематическая ошибка измерения *i*-го параметра отсутствует. В этом случае t_{0i}=0. Обозначим через $\Delta_i/\sigma_i = r_i$, которая является характеристикой допусков параметров электрооборудования в процессе производства, а через $3\sigma_{\text{ои}_i}/\Delta_i = z_i$, которая является характеристикой точности системы контроля при измерении параметров и известна в результате проведения испытаний данной системы. Для определения вероятностей $P(\Pi_i\ \Pi_i^{\text{ск}})$, $P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}})$, $P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}})$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{\text{ск}})$ сделаем замену переменных в виде $y = (x_i - x_{0i})/\sigma_i$ и $\tau = t_i/\sigma_{\text{ои}_i}$.

В результате замены переменных и преобразований, выполненных с

соотношениями (13)…(16), а также с учетом соотношений (17) и (18) получаем соотношения вида:

$$P(\Pi_i \Pi_i^{\text{ск}}) = \frac{1}{2\pi} \int_{r_i}^{k_i r_i} e^{-\frac{y_i^2}{2}} \left[\int_{-3\frac{r_i + y_i}{r_i z_i}}^{3\frac{k_i r_i - y_i}{r_i z_i}} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i \right] dy_i , \tag{19}$$

$$P(\Pi_i \overline{\Pi}_i^{\text{ск}}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-r_i}^{k_i r_i} e^{-\frac{y_i^2}{2}} \left[\int_{-\infty}^{-3\frac{r_i + y_i}{r_i z_i}} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i + \int_{3\frac{k_i r_i - y_i}{r_i z_i}}^{\infty} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i \right] dy_i , \tag{20}$$

$$P(\overline{\Pi}_i \ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{-r_i} e^{-\frac{y_i^2}{2}} \left[\int_{-\infty}^{-3\frac{r_i + y_i}{r_i z_i}} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i + \int_{3\frac{k_i r_i - y_i}{r_i z_i}}^{\infty} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i \right] dy_i +$$

$$+ \frac{1}{2\pi} \int_{k_i r_i}^{\infty} e^{-\frac{y_i^2}{2}} \left[\int_{-\infty}^{-3\frac{r_i + y_i}{r_i z_i}} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i + \int_{3\frac{k_i r_i - y_i}{r_i z_i}}^{\infty} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i \right] dy_i , \tag{21}$$

$$P(\overline{\Pi}_i \Pi_i^{\text{ск}}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{-r_i} e^{-\frac{y_i^2}{2}} \left[\int_{-3\frac{r_i + y_i}{r_i z_i}}^{3\frac{k_i r_i - y_i}{r_i z_i}} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i \right] dy_i +$$

$$+ \frac{1}{2\pi} \int_{k_i r_i}^{\infty} e^{-\frac{y_i^2}{2}} \left[\int_{-3\frac{r_i + y_i}{r_i z_i}}^{3\frac{k_i r_i - y_i}{r_i z_i}} e^{-\frac{\tau_i^2}{2}} d\tau_i \right] dy_i . \tag{22}$$

Так как интегралы, определяемые соотношениями (19)…(22) не выражаются через элементарные функции, то определить их можно численными методами. Для определения вероятностей $P(\Pi_i \ \Pi_i^{\text{ск}})$, $P(\Pi_i \ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}})$, $P(\overline{\Pi}_i \ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}})$ и $P(\overline{\Pi}_i \ \Pi_i^{\text{ск}})$ можно построить номограммы [3]. По этим номограммам можно решать прямые задачи, суть которых заключается в следующем. Задаваясь характеристиками r_i, k_i и z_i контролируемого параметра, можно определить любую

из вероятностей $P(\Pi_i\ \Pi_i^{ск})$, $P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$, $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$. Кроме того, используя номограммы можно решать и обратные задачи по определению допустимых погрешностей измерения параметров и выбору полей допусков на параметры, при которых вероятности ошибочной оценки системой контроля состояния параметров $P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$находятся в заданных пределах.

Представленные соотношениями (19)…(22) вероятностные модели по определению допустимых погрешностей измерения параметров и выбору полей допусков на параметры, а также вероятности ошибочной оценки системой контроля состояния параметров $P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$ позволяют решать оценочные задачи по отношению каждого отдельного параметра электрооборудования.

При комплексной оценке состояния электрооборудования по совокупности n контролируемых параметров решение задачи также сводится к определению вероятностей $P(\Pi_i\ \Pi_i^{ск})$, $P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$, $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$. В этом случае при решении задачи в такой постановке определяющими являются вероятности $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$ в виду того, что они позволяют осуществлять достоверную оценку состояния контролируемого электрооборудования. При этом вероятности $P(\Pi_i\ \Pi_i^{ск})$, $P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$, $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$ определяются соответствующими вероятностями каждого контролируемого параметра электрооборудования.

Для определения указанных вероятностей делается допущение, что все n контролируемых параметров электрооборудования являются независимыми. Кроме того, под исправным электрооборудованием следует понимать такое его состояние, у которого все n контролируемых параметров находятся в пределах установленных допусков, а неисправным - у которого хотя бы один из этих параметров находится за пределами данных допусков.

Исходя из этого, соотношения для вероятностей будут иметь следующий вид:

$$P(\Pi_{эо}) = \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i), \qquad (23)$$

$$P(\overline{\Pi}_{эо}) = \prod_{i=1}^{n} P(\overline{\Pi}_i) - \sum_{i,j} P(\overline{\Pi}_i,\overline{\Pi}_j) + \sum_{i,j,k} P(\overline{\Pi}_i,\overline{\Pi}_j,\overline{\Pi}_k) - \ldots +$$

$$+ (-1)^{n-1} P(\overline{\Pi}_1,\overline{\Pi}_2,\ldots,\overline{\Pi}_n) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i), \quad \text{при } i \neq j \neq k. \qquad (24)$$

Следующим условием перехода от вероятностей отдельных параметров к вероятностям для всего электрооборудования является соотношение следующего вида:

$$P(\Pi_{эо}^{ск}) = \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i^{ск}), \qquad (25)$$

$$P(\overline{\Pi}_{эо}^{ск}) = \sum_{i=1}^{n} P(\overline{\Pi}_i^{ск}) - \sum_{i,j} P(\overline{\Pi}_i^{ск},\overline{\Pi}_j^{ск}) + \sum_{i,j,k} P(\overline{\Pi}_i^{ск},\overline{\Pi}_j^{ск},\overline{\Pi}_k^{ск}) - ... +$$

$$+ (-1)^{n-1} P(\overline{\Pi}_1^{ск},\overline{\Pi}_2^{ск},...,\overline{\Pi}_n^{ск}) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i^{ск}), \quad \text{при } i \neq j \neq k. \qquad (26)$$

Достоверность оценки электрооборудования в соотношении (25) заключается в том, что принятие решения «Допустить к дальнейшей эксплуатации» возможно, если каждый из его параметров оценен системой контроля как годный.

Учитывая соотношения (8), (10), (23) и (25), можно записать соотношения для вероятностей $P(\Pi_{эо})$ и $P(\Pi_{эо}^{ск})$:

$$P(\Pi_{эо}) = P(\Pi_{эо}\Pi_{эо}^{ск}) + P(\Pi_{эо}\overline{\Pi}_{эо}^{ск}) = P(\Pi_{эо})P(\Pi_{эо}^{ск}/\Pi_{эо}) + P(\Pi_{эо})P(\overline{\Pi}_{эо}^{ск}/\Pi_{эо}) =$$
$$= \prod_{i=1}^{n} [P(\Pi_i)P(\Pi_i^{ск}/\Pi_i) + P(\Pi_i)P(\overline{\Pi}_i^{ск}/\Pi_i)] = \prod_{i=1}^{n} [P(\Pi_i)P(\Pi_i^{ск}/\Pi_i)] + \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i)[1 -$$
$$- \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i^{ск}/\Pi_i)],$$

$$P(\Pi_{эо}^{ск}) = P(\Pi_{эо}\Pi_{эо}^{ск}) + P(\overline{\Pi}_{эо}\Pi_{эо}^{ск}) = P(\Pi_{эо})P(\Pi_{эо}^{ск}/\Pi_{эо}) + P(\Pi_{эо}^{ск})P(\overline{\Pi}_{эо}/\Pi_{эо}^{ск}) =$$
$$= \prod_{i=1}^{n} [P(\Pi_i)P(\Pi_i^{ск}/\Pi_i) + P(\Pi_i^{ск})P(\overline{\Pi}_i/\Pi_i^{ск})] = \prod_{i=1}^{n} [P(\Pi_i)P(\Pi_i^{ск}/\Pi_i)] + \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i^{ск})[1 -$$
$$- \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i/\Pi_i^{ск})].$$

Окончательные соотношения имеют вид:

$$P(\Pi_{эо}\Pi_{эо}^{ск}) = \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i\Pi_i^{ск}), \qquad (27)$$

$$P(\Pi_{эо}\overline{\Pi}_{эо}^{ск}) = P(\Pi_{эо}) - \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i\Pi_i^{ск}), \qquad (28)$$

$$P(\overline{\Pi}_{эо}\Pi_{эо}^{ск}) = P(\Pi_{эо}^{ск}) - \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i\Pi_i^{ск}), \qquad (29)$$

$$P(\overline{\Pi}_{эо}\overline{\Pi}_{эо}^{ск}) = P(\overline{\Pi}_{эо}) - P(\Pi_{эо}^{ск}) + \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i\Pi_i^{ск}) =$$

$$P(\overline{\Pi}_{эо}^{ск}) - P(\Pi_i) + \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i\Pi_i^{ск}). \qquad (30)$$

Таким образом, зная вероятности $P(\Pi_i\ \Pi_i^{ск})$, $P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$, $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{ск})$ и

$P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{ск})$ и определив предварительно вероятности $P(\Pi_i)$, $P(\Pi_i^{ск})$, $P(\Pi_{эо})$ и $P(\Pi_{эо}^{ск})$ по соотношениям (8), (10), (23) и (25) соответственно, по соотношениям (27)…(30) определяем, соответственно, вероятности $P(\Pi_{эо}\Pi_{эо}^{ск})$, $P(\Pi_{эо}\overline{\Pi}_{эо}^{ск})$, $P(\overline{\Pi}_{эо}\Pi_{эо}^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_{эо}\overline{\Pi}_{эо}^{ск})$.

Соотношения, которые используют при вычислении условных вероятностей $P(\Pi_{эо}^{ск}/\Pi_{эо})$, $P(\overline{\Pi}_{эо}^{ск}/\Pi_{эо})$, $P(\Pi_{эо}/\Pi_{эо}^{ск})$ и $P(\overline{\Pi}_{эо}/\Pi_{эо}^{ск})$, имеют вид:

$$P(\Pi_{эо}^{ск}/\Pi_{эо}) = \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i^{ск}/\Pi_i), \tag{31}$$

$$P(\overline{\Pi}_{эо}^{ск}/\Pi_{эо}) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i^{ск}/\Pi_i), \tag{32}$$

$$P(\Pi_{эо}/\Pi_{эо}^{ск}) = \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i/\Pi_i^{ск}), \tag{33}$$

$$P(\overline{\Pi}_{эо}/\Pi_{эо}^{ск}) = 1 - \prod_{i=1}^{n} P(\Pi_i/\Pi_i^{ск}). \tag{34}$$

Соотношения для определения условных вероятностей $P(\overline{\Pi}_{эо}^{ск}/\overline{\Pi}_{эо})$, $P(\Pi_{эо}^{ск}/\overline{\Pi}_{эо})$, $P(\overline{\Pi}_{эо}/\overline{\Pi}_{эо}^{ск})$, и $P(\Pi_{эо}/\overline{\Pi}_{эо}^{ск})$ выразить в простой форме через соответствующие вероятности отдельных параметров электрооборудования в математическом виде представляет собой достаточно сложную задачу.

При оценке достоверности контроля в качестве ее количественной основы принимается вероятность правильного определения системой контроля состояния электрооборудования. В целом достоверность контроля зависит от методической и инструментальной достоверностей. При этом под методической достоверностью понимается вероятность правильного определения состояния электрооборудования по контролируемым параметрам при условии безошибочной их оценки системой контроля. Под инструментальной достоверностью понимается вероятность правильной оценки системой контроля контролируемых параметров электрооборудования. Общая достоверность контроля электрооборудования определяется как произведение методической и инструментальной достоверностей: $D_к^{эо} = D_к^{м} D_к^{и}$.

При решении поставленной задачи за основу берется инструментальная достоверность контроля электрооборудования, которая обозначена через $D_к^{и}$. В соответствии с определением соотношение для инструментальной достоверности $D_к^{и}$ будет иметь вид

$$D_к^{и} = P(\Pi_{эо}\Pi_{эо}^{ск}) + P(\overline{\Pi}_{эо}\overline{\Pi}_{эо}^{ск}). \tag{35}$$

При этом минимальное значение достоверности $D_{к\,min}^{и}$ контроля, исходя из числа n контролируемых параметров электрооборудования, определяется из следующего соотношения:

$$\frac{dD^{\text{и}}_{\text{к}\min}}{dn} = 2\,[P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}})]^n \ln P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}}) -$$

$$-[P(\Pi_i)]^n \ln P(\Pi_i) - [P(\Pi_i^{\text{ск}})]^n \ln P(\Pi_i^{\text{ск}}) = 0\,. \qquad (36)$$

Из соотношения $D^{\text{и}}_{\text{к}} = \varphi(n)$ видно, что с увеличением числа n контролируемых параметров электрооборудования достоверность контроля уменьшается и достигает минимума на основе соотношения (36).

Максимальные значения вероятности $P(\Pi_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, $P(\Pi_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, $P(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})$ и $P(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, исходя из числа n контролируемых параметров электрооборудования, определяются на основе соотношений:

$$\frac{dP(\Pi_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})}{dn} = [P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}})]^n \ln P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}}) = 0\,; \qquad (37)$$

$$\frac{dP(\Pi_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})}{dn} = [P(\Pi_i)]^n \ln P(\Pi_i) - [P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}})]^n \ln P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}}) = 0\,; \qquad (38)$$

$$\frac{dP(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})}{dn} = [P(\Pi_i^{\text{ск}})]^n \ln P(\Pi_i^{\text{ск}}) - [P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}})]^n \ln P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}}) = 0\,; \qquad (39)$$

$$\frac{dP(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})}{dn} = [P(\overline{\Pi}_i^{\text{ск}})]^n \ln P(\overline{\Pi}_i^{\text{ск}}) - [P(\Pi_i)]^n \ln P(\Pi_i) +$$

$$+[P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}})]^n \ln P(\Pi_i\Pi_i^{\text{ск}}) = 0\,. \qquad (40)$$

Вероятности для одного параметра имеют следующие значения: $P(\Pi_i\ \Pi_i^{\text{ск}}) = 0{,}9990$; $P(\Pi_i\ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}}) = 0{,}0002$; $P(\overline{\Pi}_i\ \Pi_i^{\text{ск}}) = 0{,}0001$ и $P(\overline{\Pi}_i\ \overline{\Pi}_i^{\text{ск}}) = 0{,}0007$.

Значения вероятностей $P(\Pi_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, $P(\Pi_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, $P(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, $P(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})$ и достоверности контроля $D^{\text{и}}_{\text{к}}$ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вероятности $P(\Pi_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, $P(\Pi_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, $P(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})$, $P(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})$ и $D^{\text{и}}_{\text{к}}$

Номер параметра	Вероятность $P(\Pi_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})$	Вероятность $P(\Pi_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})$	Вероятность $P(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\Pi^{\text{ск}}_{\text{эо}})$	Вероятность $P(\overline{\Pi}_{\text{эо}}\overline{\Pi}^{\text{ск}}_{\text{эо}})$	Достоверность $D^{\text{и}}_{\text{к}}$
1	0,9991100	0,0002100	0,0001100	0,0005700	0,9996800
2	0,9982207	0,0004197	0,0002199	0,0011397	0,9993604
3	0,9973323	0,0006290	0,0003295	0,0017101	0,9990424
4	0,9964447	0,0008380	0,0004450	0,0022723	0,9987170
5	0,9955578	0,0010147	0,0005483	0,0028472	0,9984050
6	0,9946718	0,0012550	0,0006574	0,0034158	0,9980876
7	0,9937865	0,0014630	0,0007664	0,0039841	0,9977706
8	0,9929020	0,0016750	0,0008751	0,0045522	0,9974542

Продолжение таблицы 1

Номер параметра	Вероятность $P(\Pi_{эо}\Pi_{эо}^{ск})$	Вероятность $P(\Pi_{эо}\overline{\Pi}_{эо}^{ск})$	Вероятность $P(\overline{\Pi}_{эо}\Pi_{эо}^{ск})$	Вероятность $P(\overline{\Pi}_{эо}\overline{\Pi}_{эо}^{ск})$	Достоверность $D_к^и$
9	0,9920183	0,0018781	0,0009836	0,0051200	0,9971383
10	0,9911354	0,0020851	0,0010920	0,0056876	0,9968230
11	0,9902533	0,0022918	0,0012817	0,0062547	0,9965080
12	0,9893720	0,0024981	0,0013082	0,0068217	0,9961937
13	0,9884914	0,0027042	0,0014161	0,0073883	0,9958797
14	0,9876117	0,0029099	0,0015237	0,0079548	0,9955665
15	0,9867323	0,0031157	0,0016316	0,0085204	0,9952527
16	0,9858544	0,0033204	0,0017385	0,0090866	0,9949410
17	0,9849770	0,0035252	0,0018456	0,0096522	0,9946292
18	0,9841003	0,0037297	0,0019526	0,0102174	0,9943177
19	0,9832245	0,0039377	0,0020593	0,0107824	0,9940069
20	0,9823493	0,0041377	0,0021660	0,0113470	0,9936963
21	0,9814751	0,0043410	0,0022723	0,0119115	0,9933866
22	0,9806015	0,0045442	0,0023786	0,0124756	0,9930771
23	0,9797288	0,0047470	0,0024846	0,0130396	0,9927684
24	0,9788569	0,0049494	0,0025904	0,0136032	0,9924601
25	0,9779857	0,0051516	0,0026961	0,0141665	0,9921522
26	0,9771153	0,0053534	0,0028016	0,0147296	0,9918449
27	0,9762456	0,0055550	0,0029070	0,0152923	0,9915379
28	0,9753768	0,0057562	0,0030121	0,0158549	0,9912317
29	0,9745087	0,0059571	0,0031171	0,0164171	0,9909258
30	0,9736414	0,0061576	0,0032219	0,0169790	0,9906204

Изменение достоверности контроля в зависимости от количества контролируемых параметров электрооборудования приведено на рис. 2.



Рис. 2. Изменение достоверности контроля в зависимости от количества контролируемых параметров электрооборудования

© *Проблемы энергетики, 2006, № 3-4*

Таким образом, приведенные математические соотношения позволяют определять допустимые погрешности измерения параметров электрооборудования в зависимости от их количества и значения полей допусков на эти параметры, при которых вероятности ошибочной оценки системой контроля состояния данных параметров находятся в заданных пределах.

Summary

The model of a choice of optimum number of controllable parameters of an electric equipment under operating conditions on a parameter of reliability is considered. It is shown, that the mathematical model is comprehensible on accuracy of received decisions and is simple from the point of view of its realization in practice.

Литература

1. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учебное пособие.- М.: Высш. школа, 1982.- 231 с.: ил.

2. Белоконь Р. Н., Кендель В. Г. Об одном оптимальном алгоритме допускового контроля работоспособности изделий.- В сб.: Оптимизация автоматизированных систем и технологических процессов.- Киев, 1973.

3. Вигман Б. А., Дунаев Б. Б. Определение точности допусковых контрольно-измерительных устройств.- Измерительная техника.- 1963.- №1.

4. Шаров В. В. Некоторые особенности эксплуатации энергосистем по техническому состоянию//Известия вузов. Проблемы энергетики.- 1999.- № 11-12.- С. 61-66.

5. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. -М.: Изд. Стандартов, 1990.- 36 с.

Поступила 29.12.2005