

## О ПРОГНОЗИРОВАНИИ НАДЕЖНОСТИ

Современная теория надежности применяется для решения разнообразных задач: начиная с оценки надежности производственных систем и кончая вопросами разработки стратегии их обслуживания с помощью прогнозирования показателей надежности в конкретных условиях эксплуатации. Последние используются для обоснования периодичности профилактики оборудования с целью поддержания надежности системы на заданном уровне [1].

Существуют различные подходы и методы решения задач надежности, которые основаны на разных моделях отказов. Для установления сроков вывода выключателя в ремонт могут быть использованы модели отказов по износу [2]. Так, модель равномерного износа заключается в том, что процесс сработки ресурса надежности рассматривается как последовательность  $(N + 1)$  состояний элемента от начального  $E_N$  с ресурсом  $N$  до состояния отказа  $E_0$  - при полной сработке ресурса. Считают, что переходы возможны только от каждого предыдущего состояния  $E_{k+1}$  к последующему  $E_k$ , и при этом срабатывается  $\frac{1}{N}$  доля ресурса, т.е. на эту долю снижается ресурс элемента по износу. Диаграмма переходов, отвечающая модели с равномерным износом, представлена на рис. 1, а. Тогда время сработки ресурса зависит от параметра потока воздействий, изнашивающих выключатель  $\lambda_1$ , т.е. потока отключений (коротких замыканий на данном присоединении).

Вероятность безотказной работы выключателя  $R_1(t)$  по износу за время  $t$  можно найти как сумму вероятностей  $P_k(t)$  событий  $E_k$  при  $1 \leq k \leq N$ . Формула имеет вид

$$R_1(t) = \sum_{k=1}^N P_k(t) = 1 - \int_0^t \frac{1}{\Gamma(N)} e^{-\lambda_1 x} \lambda_1^{N-1} x^{N-1} dx =$$

$$= 1 - P_x^2(\tau, 2N),$$

$$\text{где } \Gamma(N) = \int_0^{\infty} x^{N-1} e^{-x} dx; \quad \tau = 2\lambda_1 t;$$

$P_{\lambda_1}^2(\tau, 2N)$  - интегральная функция распределения "хи-квадрат".

Модель равномерного износа можно применить к трансформаторным и секционными выключателям. Выключатели, установленные на воздушных линиях передач, коммутируют различные режимы коротких замыканий. Чем тяжелее режим, тем большая доля ресурса срабатывает при его отключении. По степени загрязнения масла при горении дуги в зависимости от времени коммутации и мощности короткого замыкания выделяют 3 вида коммутаций на ЛЭП: 1) к.з. с током  $0,3 \div 0,6$  от предельного – сработка  $\frac{1}{N}$  ресурса (расчетный по степени загрязнения масла); 2) к.з. с предельным током – сработка  $\frac{2}{N}$  ресурса; 3) неудаленные к.з. с высокой частотой восстанавливающегося напряжения – сработка  $\frac{5}{N}$  ресурса (в 5 раз тяжелее расчетного).

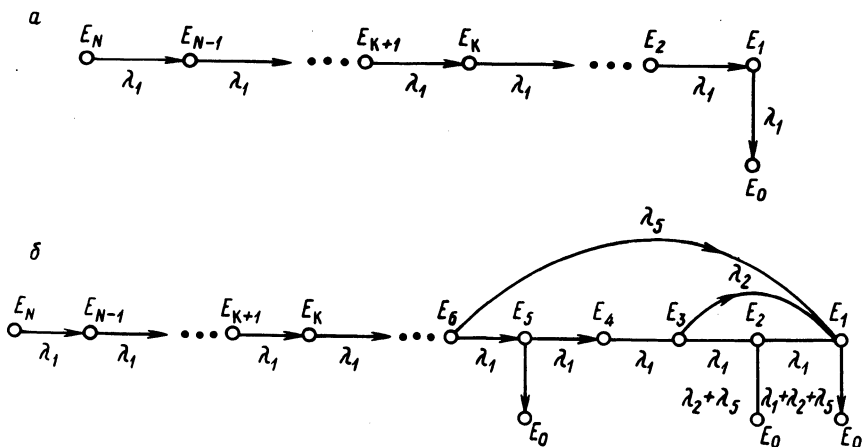


Рис. 1. Диаграмма переходов для модели отказов с равномерным (а) и неравномерным (б) износом.

Это означает, что если ресурс выключателя  $N$ , то он может быть сработан или за  $N_1 = N$  отключений 1-го вида или за  $N_2 = \frac{N}{2}$  отключений 2-го вида или за  $N_5 = \frac{N}{5}$  отключений 3-го вида, т.е.

$$N = N_1 = 2 N_2 = 5 N_5 .$$

По типу дугогасительной системы современные выключатели имеют ресурс 20 отключений.

Диаграмма переходов для такой модели неравномерного износа представлена на рис. 1, б. Здесь интенсивности соот-

ветствующих переходов зависят от параметров потока коммутаций.

Вероятность отсутствия отказов по износу для этой модели вычисляется так:

$$R_{\text{из}}(t) = \sum_{k=1}^N P_k(t).$$

Здесь  $P_N(t) = e^{-\lambda_{\Sigma} t}$ ;  $P_{N-1}(t) = \lambda_1 e^{-\lambda_{\Sigma} t}$ ;

$$P_{N-2}(t) = \left( \frac{\lambda_1^2 t^2}{2!} + \lambda_2 t \right) e^{-\lambda_{\Sigma} t};$$

$$P_{N-3}(t) = \left( \frac{\lambda_1^3 t^3}{3!} + \frac{\lambda_1 \lambda_2 t^2}{2!} + \lambda_3 t \right) e^{-\lambda_{\Sigma} t} \text{ и т.д.};$$

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N \lambda_j.$$

В условиях эксплуатации вместо начального ресурса  $N$  надо подставить располагаемый ресурс

$$n = N - (n_1 + 2n_2 + 5n_5) = N - n_{\text{из}},$$

где  $n_{\text{из}}$  - сработанная доля ресурса, если выключатель число коротких замыканий соответственно отключил  $n_1$ ,  $n_2$  и  $n_5$ , 1-го, 2-го и 3-го видов.

Для  $n > 20$  формула, приведенная в [3], вычисления вероятностей безотказной работы выключателя по износу при неравномерной сработке ресурса на предстоящее время  $t$  работы имеет вид

$$k \leq \frac{n-1}{5} \quad p < \frac{n-1-5k}{2} \quad n-1-5k-2p$$

$$R_{\text{из}}(t) = \sum_{k=0} \sum_{p=0} \sum_{m=0} \frac{(\lambda_5 t)^k}{k!} e^{-5t} \cdot \frac{(\lambda_2 t)^p}{p!} e^{-2t} \cdot \frac{(\lambda_1 t)^m}{m!} e^{-\lambda_1 t}$$

Показатель фактического уровня надежности  $R(t)$  представляет собой вероятность совмещения отсутствия за время  $t$  начальных отказов  $R_{\text{нач}}(t)$ , внезапных (чисто случайных) отказов  $R_0(t)$  и отказов по износу  $R_{\text{из}}(t)$ .

Формула для него имеет вид

$$R(t) = R_{\text{нач}}(t) R_o(t) R_{\text{из}}(t) ,$$

где  $R_{\text{нач}}(t) = \alpha$ ;  $R_o(t) = e^{-\lambda_o t}$ ;  $\lambda_o = \text{const}$  .

Если вычисленное значение  $R(t)$  получится ниже заданного уровня надежности, то следует выключатель вывести во внеочередной ремонт, после которого его располагаемый ресурс восстановится до  $n = N$  .

Резюме. Кроме общепринятой модели экспоненциального закона надежности весьма плодотворными в энергетике являются модель отказов с равномерным износом и модель отказов по износу при неравномерной сработке ресурса. Они позволяют прогнозировать надежность выключателей, установленных на конкретных присоединениях в различных условиях эксплуатации.

#### Л и т е р а т у р а

1. Окорочков В.Р. Надежность производственных систем. Л., 1972. 2. Гук Ю.Б., Казак М.А., Мясников А.В. Теория и расчет надежности систем электроснабжения. М., 1970. 3. Гук Ю.Б., Зейлидзон Е.Д., Манов Н.А. О применении основных понятий и критериев теории надежности в релейной защите. - Электрические станции, 1967, № 8.

УДК 621.316

М.И. Травянский

#### ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ 6 кВ

Количество трансформаторных подстанций (ТП) городской электрической сети непрерывно возрастает. Ежегодно примерно шестая часть ТП подвергается капитальному ремонту, четвертая - текущему. Кроме того, в межремонтный период возможны аварийные ремонты того или иного оборудования ТП. Некоторые виды оборудования ТП ремонтируются в сроки, соответствующие их физическому износу. В условиях эксплуатации важно предвидеть количество возможных аварийных отключений того или иного оборудования, оценить значения удельной повреждаемости отдельных элементов сети, найти