

УДК 621.019.

МЕТОД РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПРИ ВОЗРАСТАЮЩЕЙ СКОРОСТИ ИХ ИЗНОСА**ФАРХАДЗАДЕ Э.М., МУРАДАЛИЕВ А.З., НИКДЖОЙ А.Д.****АзНИИ Энергетики и Энергопроектирования.
Институт энергетического и водного ресурса (Иран)**

Оценка показателей остаточного ресурса и остаточного срока службы элементов электроустановок по статистическим данным повреждаемости и дефектам, выявленным при эксплуатации, позволяет своевременно выявить наступление катастрофического износа, снизить затраты на плановые и аварийные ремонты. Разработан метод и алгоритм статистической оценки показателей долговечности элементов электроустановок при возрастающей скорости их износа.

Рассмотрим процесс старения элементов с возрастающей скоростью износа. Если элемент подвержен воздействию ряда факторов (Ф), один из которых выделяется своей значимостью, то часто по мере роста износа элемент достигает технического состояния, при котором значимость многих ранее не учитываемых факторов (Ф) возрастает. Это приводит к росту скорости износа. Например, грозозащитные тросы линий электропередачи подвержены воздействию ветра (Ф1), вызывающего вибрацию, резких колебаний температуры воздуха (Ф2), вызывающих изменение стрелы провеса и тяжения, коррозии (Ф3), вызывающей изменение сечения троса, нагреву электрической дугой, токами короткого замыкания и токами молнии (Ф4), снижающих механическую прочность, гололедной нагрузки (Ф5), вызывающей резкое увеличение тяжения, некачественного монтажа и ремонта (Ф6), приводящих к возникновению слабых звеньев. Опыт эксплуатации показывает, что наибольшее число обрывов грозозащитного троса происходит на корродированных участках (Ф3), в зимнее время (Ф2+Ф5), в местах с некачественной опрессовкой соединения или повреждения троса при монтаже (Ф6), в местах частичного пережога проволок наружного повива электрической дугой (Ф4) или от вибрации.

Возрастающая скорость износа часто наблюдается на элементах устройства, работающего за пределами своих возможностей. Наглядным примером здесь является износ изоляции при превышении температуры в наиболее нагретой точке предельно допустимой величины. В соответствии с законом Аррениуса срок службы изоляции обратно пропорционален экспоненциальной функции температуры. Процессы с возрастающей скоростью износа относятся к группе катастрофического износа. Если несколько обобщить эти примеры, то можно представить себе модель, состоящую из N параллельно включенных звеньев, выполняющих одну и ту же функцию. При отказе звена, нагрузка распределяется между оставшимися звеньями, вследствие чего, надежность их работы снижается. Процесс старения со временем затрагивает все большее число звеньев. Ослабленный в результате износа (ресурс исчерпан) элемент становится чувствительным ко многим другим воздействующим факторам, один из которых приводит к его разрушению.

На рис.1а приведены типовые эмпирические функции возрастающей скорости износа $V_{\Pi}(t)$. Кривые $V_{\Pi}(t)$ соответствуют функциям:

- линейной
$$V_{\Pi,1}(t) = 2at \quad (1)$$

- степенной $V_{\Pi,2}(t) = a_2 b_2 t^{b_2-1}$ (2)

- экспоненциальной $V_{\Pi,3}(t) = a_3 e^{a_3 t}$ (3)

Поскольку

$$\Pi(t) = \int_0^t V_{\Pi}(t) dt$$

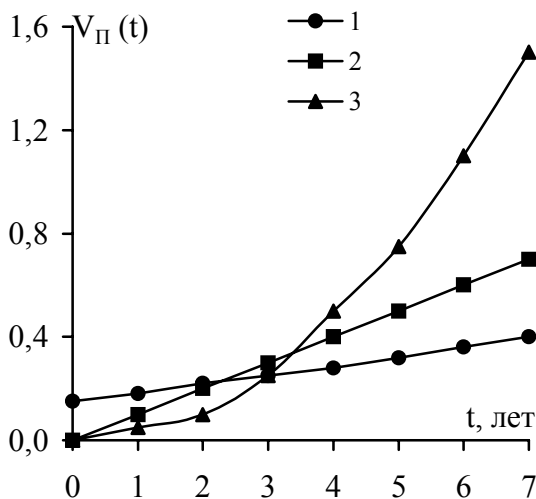
в результате интегрирования (1-3) получим

$$\Pi_1(t) = a_1 t^2$$
 (4)

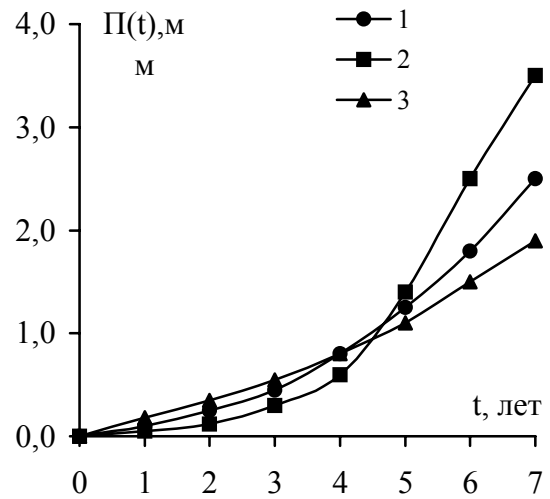
$$\Pi_2(t) = a_2 t^{b_2} \quad (b_2 \geq 2)$$
 (5)

$$\Pi_3(t) = e^{a_3 t} - 1$$
 (6)

Формулы (4-6) отражают закономерности износа при условии, что $\Pi(t=0)=\Pi(0)=0$ и $\Pi(t>0)>0$. Графическая иллюстрация этих зависимостей приведена на рис 1б. Сопоставление кривых износа показывает одну важную их особенность: при совмещении этих кривых в начальной части (путем подбора постоянных коэффициентов) они существенно различаются с ростом t . И, наоборот, при совмещении их в конечной части, наибольшее различие наблюдается в начальной части кривых. Практическим следствием является: точность аппроксимации экспериментальных кривых износа $\Pi^*(t)$ аналитическими зависимостями (4-6) при фиксированном объеме выборки и точности измерения с увеличением интервала между измерениями $\Delta t=t_2-t_1$ возрастает. Отметим также, что $\Pi_1(t)$ является частным случаем $\Pi_2(t)$, когда $b_2=2$. Условие $\Pi(0)=0$ соответствует предположению, что начальный износ равен нулю, т.е. элемент новый, а условие $\Pi(t>0)>0$ – предположению отсутствия «порога чувствительности» (t_0), при котором $\Pi(t \leq t_0)=0$. [1]



а) 1- $V_{\Pi,1}(t)$; 2- $V_{\Pi,2}(t)$; 3- $V_{\Pi,3}(t)$;



б) 1- $\Pi_1(t)$; 2- $\Pi_2(t)$; 3- $\Pi_3(t)$;

Рис.1. Типовые кривые изменения возрастающей скорости износа и соответствующие этим кривым изменения износа во времени ($a_1=0.05$; $a_2=0.01$; $b_2=3$; $a_3=0.15$)

Рассмотренные выше закономерности изменения износа $\Pi(t)$ имеют место, если факторы, вызывающие износ элемента, действуют непрерывно и равномерно. Свойства элемента таковы, что со временем показатели износа нелинейно возрастают. Наряду с непрерывным воздействием, не менее часто наблюдаются периодические дискретные воздействия, последствия каждого из которых несколько превышают последствия предшествующих воздействий. При этом кривая $\Pi(t)$ имеет колебательный характер

относительно кривой с непрерывным воздействием факторов. Характер отклонения определяется «тяжестью» дискретных воздействий. Наглядным примером неравномерного воздействия с различной интенсивностью является процесс нарушения динамической стойкости обмоток трансформатора при протекании токов короткого замыкания. Если число дискретных воздействий велико, в течении расчетного срока службы элемента, характер воздействия может быть принят равномерным, и отклонением реализации $\Pi(t)$ от закона изменения при непрерывном воздействии можно пренебречь.

В условиях, когда непрерывный контроль показателей износа конкретных элементов невозможен, прогноз долговечности осуществляется гарантированными оценками. Случайный характер реализаций износа обуславливается преимущественно

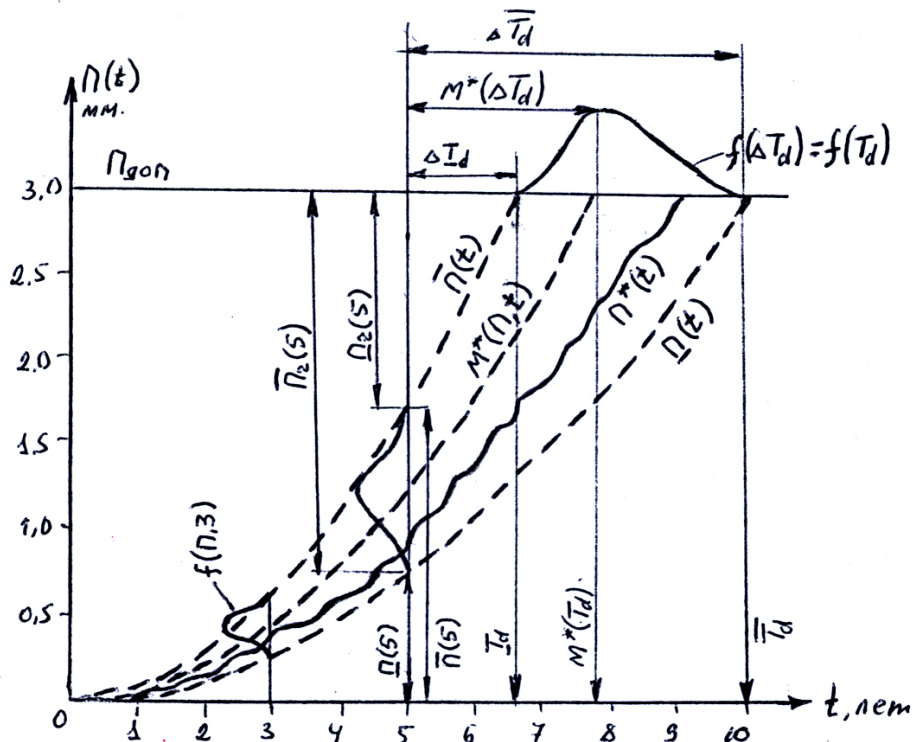


Рис 2. Графическая иллюстрация показателей долговечности.

свойствами каждого элемента выборки, которые статистически отображаются функцией распределения $F(\Pi, t)$. Если же число допустимых единичных воздействий мало, они существенно различаются по «тяжести», наблюдается перемешивание реализаций износа отдельных элементов выборки, иначе говоря, последовательность элементов выборки по величине износа при последующем измерении меняется. Само изменение определяется функцией распределения «тяжести» воздействия $F(W, t)$. Распределение реализаций в этом случае будет представлять собой функцию распределения со случайным аргументом.

На рис.2. показана типовая закономерность группы ОЭ, аппроксимируемых уравнением (4), вид отдельных реализаций $\Pi^*(t)$, изменение среднего износа $M^*(\Pi, t)$, графическая иллюстрация ПД по величинам износа (Π), остаточного ресурса (Π_r), предельного срока службы (T_d) и остаточного срока службы (ΔT_d) для допустимого износа $\Pi_{доп}$. Уточнив ПД, рассмотрим вопросы их оценки в условиях когда:

- факторы, вызывающие износ, действуют равномерно (непрерывно или дискретно) и практически с одной и той же «тяжестью». Иначе говоря, процесс износа элемента задается одним из уравнений (5 или 6).
- реализации $\Pi^*(t)$ ОЭ неизвестны, а проведение испытаний на долговечность требует недопустимо много времени и затрат.

Для определения ПД:

1. Выделим две группы ОЭ, различающиеся сроком службы t_1 и t_2 . В соответствии с рис.1б. $t_1 \ll t_2$.

2. Уточняем выполняемые ОЭ функции, условия работы, причины, вызывающие износ, показатель П, определяющий износ ОЭ. Методология выбора показателя П будет рассмотрена нами ниже.

3. Проводим измерение величины износа П каждого ОЭ.

4. Вычисляем статистические характеристики износа в каждой группе ОЭ: средние значения - $M^*(\Pi, t_1)$ и $M^*(\Pi, t_2)$, дисперсии - $D^*(\Pi, t_1)$ и $D^*(\Pi, t_2)$, статистические ($F^*(\Pi, t_1)$ и $F^*(\Pi, t_2)$) и эмпирические ($F(\Pi, t_1)$ и $F(\Pi, t_2)$) функции распределения, граничные значения доверительного интервала $[\underline{\Pi}(t_1), \overline{\Pi}(t_1)]_R$ и $[\underline{\Pi}(t_2), \overline{\Pi}(t_2)]_R$, где $R=1-\nu/2$, ν -уровень значимости.

5. Вычисляются постоянные коэффициенты уравнения (5) и (6). Для уравнения (5)

$$\left. \begin{aligned} M^*(\Pi_2, t_1) &= a_2^* t_1^{b_2^*} \\ M^*(\Pi_2, t_2) &= a_2^* t_2^{b_2^*} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Преобразуя (7), получим

$$b_2^* = \frac{\ln \frac{M^*(\Pi_2, t_2)}{M^*(\Pi_2, t_1)}}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (8)$$

$$a_2^* = e^{\left[\ln M^*(\Pi_2, t_1) - b_2^* \ln t_1 \right]} \quad (9)$$

Для уравнения (6) по аналогии

$$a_3^* = \frac{\ln [M^*(\Pi_3, t_1) + 1]}{t_1} \quad (10)$$

1. Вычисляем ПД:

6.1. По величинам износа. При $\Pi(t) = \Pi_2(t)$.

$$M^*(\Pi_2, t) = a_2^* t^{b_2^*} \quad (11)$$

$$\underline{\Pi}_2(t) = \underline{a}_2 t^{\underline{b}_2} \quad (12)$$

$$\overline{\Pi}_2(t) = \overline{a}_2 t^{\overline{b}_2}, \quad (13)$$

где

$$\underline{b}_2 = \frac{\ln \frac{\underline{\Pi}_2(t_2)}{\underline{\Pi}_2(t_1)}}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (14)$$

$$\overline{b}_2 = \frac{\ln \frac{\overline{\Pi}_2(t_2)}{\overline{\Pi}_2(t_1)}}{\ln \frac{t_2}{t_1}} \quad (15)$$

$$\underline{a}_2 = e^{\left[\ln M^*(\underline{\Pi}_2, t_1) - \underline{b}_2 \ln t_1 \right]} \quad (16)$$

$$\bar{a}_2 = e^{\left[\ln M(\bar{\Pi}_2, t_1) - \bar{b}_2 \ln t_1 \right]} \quad (17)$$

При $\Pi(t) = \Pi_3(t)$

$$M^*(\Pi, t) = e^{a_3 t} - 1 \quad (18)$$

$$\underline{\Pi}(t) = e^{\underline{a}_3 t} - 1 \quad (19)$$

$$\bar{\Pi}(t) = e^{\bar{a}_3 t} - 1 \quad (20)$$

$$\underline{a}_3 = \frac{\ln[\underline{\Pi}, t_1] + 1}{t_1} \quad (21)$$

$$\bar{a}_3 = \frac{\ln[\bar{\Pi}, t_1] + 1}{t_1} \quad (22)$$

Как следует из рис.2., дисперсия $D(\Pi, t)$ с ростом t увеличивается. Если $F(\Pi, t_1)$ и $F(\Pi, t_2)$ соответствуют нормальному закону, число ОЭ в каждой группе одинаково, то поскольку

$$\bar{\Pi}(t) = M^*(\Pi, t) + C_{R, (n-1)} \frac{\sigma^*(\Pi, t)}{\sqrt{n}} \quad (23)$$

$$\underline{\Pi}(t) = M^*(\Pi, t) - C_{R, (n-1)} \frac{\sigma^*(\Pi, t)}{\sqrt{n}} \quad (24)$$

где $C_{R, (n-1)}$ – статистика Стьюдента,

отношение доверительных интервалов будет равно

$$\frac{\bar{\Pi}(t_2) - \underline{\Pi}(t_2)}{\bar{\Pi}(t_1) - \underline{\Pi}(t_1)} = \frac{\sigma^*(\Pi, t_2)}{\sigma^*(\Pi, t_1)} \quad (25)$$

Если $\Pi(t) = \Pi_2(t)$, то с учетом (12) и (13)

$$\frac{\bar{\Pi}(t_2) - \underline{\Pi}(t_2)}{\bar{\Pi}(t_1) - \underline{\Pi}(t_1)} = \frac{\bar{a}_2 t_2^{\bar{b}_2} - \underline{a}_2 t_2^{\underline{b}_2}}{\bar{a}_2 t_1^{\bar{b}_2} - \underline{a}_2 t_1^{\underline{b}_2}} \quad (26)$$

Отсюда

$$\sigma^*(\Pi_2, t_2) = \sigma^*(\Pi_2, t_1) \frac{\bar{a}_2 t_2^{\bar{b}_2} - \underline{a}_2 t_2^{\underline{b}_2}}{\bar{a}_2 t_1^{\bar{b}_2} - \underline{a}_2 t_1^{\underline{b}_2}} \quad (27)$$

$$\sigma^*(\Pi_2, t) = \sigma^*(\Pi_2, t_2) \frac{\bar{a}_2 t^{\bar{b}_2} - \underline{a}_2 t^{\underline{b}_2}}{\bar{a}_2 t_2^{\bar{b}_2} - \underline{a}_2 t_2^{\underline{b}_2}} \quad (28)$$

Следовательно

$$F(\Pi_2, t) = \Phi \left[\frac{\Pi_2(t) - M^*(\Pi_2, t)}{\sigma^*(\Pi_2, t)} \right] \quad (29)$$

где $M^*(\Pi_2, t)$ и $\sigma^*(\Pi_2, t)$ вычисляются, соответственно, по формулам (11) и (12).

Если же $\Pi(t) = \Pi_3(t)$, то по аналогии

$$\sigma^*(\Pi_3, t) = \sigma^*(\Pi_3, t_2) \frac{e^{\bar{a}_3 t} - e^{\underline{a}_3 t}}{e^{\bar{a}_3 t_2} - e^{\underline{a}_3 t_2}}, \quad (30)$$

а параметры распределения (29) вычисляются по формулам (18) и (30)

6.2. По величинам остаточного ресурса (Π_r). Могут быть рассчитаны в результате непосредственного измерения Π_r для каждого ОЭ или исходя из условия

$$\Pi_r(t) = \Pi_{\text{ДОП}} - \Pi(t)$$

При непосредственном измерении расчеты проводятся в соответствии с алгоритмом п.6.1., в противном случае

$$M^*(\Pi_r, t) = \Pi_{\text{ДОП}} - M^*(\Pi, t) \quad (31)$$

$$D^*(\Pi_r, t) = D^*(\Pi, t) \quad (32)$$

$$\underline{\Pi}_r(t) = \Pi_{\text{ДОП}} - \overline{\Pi}(t) \quad (33)$$

$$\overline{\Pi}_r(t) = \Pi_{\text{ДОП}} - \underline{\Pi}_r(t) \quad (34)$$

Функция распределения остаточного ресурса $F(\Pi_r, t)$ в момент t вычисляется по формуле [2]:

$$F(\Pi_r, t) = 1 - F(\Pi_{\text{ДОП}} - \Pi_r, t) \quad (35)$$

6.3. По величине предельного срока службы (T_d). Поскольку при $\Pi(t) = \Pi_{\text{ДОП}}$ величина $t = T_d$, то из формул (11-13) следует

$$M^*(T_{d,2}) = e^{-\frac{\ln \frac{\Pi_{\text{ДОП}}}{a_2}}{b_2}} \quad (36)$$

$$T_{d,2} = e^{-\frac{\ln \frac{\Pi_{\text{ДОП}}}{a_2}}{b_2}} \quad (37)$$

$$\overline{T_{d,2}} = e^{-\frac{\ln \frac{\Pi_{\text{ДОП}}}{a_2}}{b_2}}, \quad (38)$$

а из формул (18-20), когда $\Pi(t) = \Pi_3(t)$

$$M^*(T_{d,3}) = \frac{\ln[\Pi_{\text{ДОП}} + 1]}{a_3} \quad (39)$$

$$T_{d,3} = \frac{\ln[\Pi_{\text{ДОП}} + 1]}{a_3} \quad (40)$$

$$\overline{T_{d,3}} = \frac{\ln[\Pi_{\text{ДОП}} + 1]}{a_3} \quad (41)$$

Формулы (36) и (39) могут быть положены в основу сравнения показателей, характеризующих износ ОЭ. Поскольку допустимое значение для каждого показателя износа различно, сравнение чувствительности показателя к износу может быть выполнено путем сравнения оценок $M^*(T_d)$. За расчетный показатель износа (Π_p) рекомендуется принять показатель, соответствующий минимальному значению $M^*(T_d)$.

$$M^*(T_d, \Pi_p) = \min \{T_d, \Pi_i\}_m, \quad (42)$$

где

$$A = \sigma^*(\Pi_2, t_2) \cdot (\overline{a_2 t^{b_2}} - \underline{a_2 t^{b_2}})^{-1}$$

m – число показателей (факторов), вызывающих износ. Подставив в формулу (29) $\Pi_2(t) = \Pi_{\text{ДОП}}$, $t = T_d$, имеем

$$M^*(\Pi_2, t) = M^*(\Pi_{\text{ДОП}}, T_d) = a_2^* T_d^{b_2^*}$$

$$\sigma^*(\Pi_2, t) = \sigma^*(\Pi_{\text{доп}}, t) = \sigma^*(\Pi_2, t_2) \frac{\overline{a_2 T_d^{b_2}} - \underline{a_2 T_d^{b_2}}}{\overline{a_2 t_2^{b_2}} - \underline{a_2 t_2^{b_2}}}$$

и имея ввиду, что $F(T_d) = 1 - F(\Pi_{\text{доп}}, T_d)$ получим

$$F(T_d) = 1 - F(\Pi_{\text{доп}}, T_d) = 1 - \Phi \left[\frac{\Pi_{\text{доп}} - a_2^* T_d^{b_2}}{A(\overline{a_2 T_d^{b_2}} - \underline{a_2 T_d^{b_2}})} \right] \quad (43)$$

Результаты расчетов $F(T_{d,2})$ для данных примера износа, изображенного на рис.2. приведены в таблице. Для численных значений параметров (41), равных $b_2^* = 2 = \text{const}$; $a_2^* = 0,05$; $\underline{a_2} = 0,03$; $\overline{a_2} = 0,07$; $\Pi_{\text{доп}} = 3$; $\sigma^*(\Pi_2, 5) = 0,25$; $R = 0,95$; $t_2 = 5$

$$F(T_{d,2}) = 1 - \Phi [B_1 T_{2,d}^{-2} - B_2] = 1 - \Phi [300 \cdot T_{2,d}^{-2} - 5],$$

где B_1 и B_2 – постоянные, равные

$$B_1 = \frac{\Pi_{\text{доп}} \cdot t_2^b}{\sigma^*(\Pi_2, t_2)} = \frac{3 \cdot 5^2}{0,25} = 300$$

$$B_2 = \frac{a_2^* \cdot t_2^b}{\sigma^*(\Pi_2, t_2)} = \frac{0,55 \cdot 5^2}{0,25} = 5$$

Таблица

Функция распределения $F(T_d)$ (рис.2)

T_d	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
$F(T_d)$	0,02	0,11	0,37	0,62	0,80	0,90	0,95	0,98

При измерении величины износа ОЭ наблюдаются и ряд иных моделей распределения износа. В частности, для ОЭ, технология изготовления которых и последующий контроль обеспечивают однородность качества, изнашиваются с одинаковой скоростью $V_{\Pi}(t)$, распределение вероятностей величины износа (Π) при сроке службы t хорошо интерполируется экспоненциальной функцией

$$F_1(\Pi, t) = e^{-\Pi(t)M_1^*(\Pi, t)}, \quad (44)$$

где $M^*(\Pi, t)$ – среднее значение результатов измерения. Если же качество ОЭ неоднородно, или условия работы отдельных элементов несколько тяжелее, то функция $F(\Pi, t)$ имеет вид

$$F_2(\Pi, t) = 1 - e^{-\Pi(t)M_2^*(\Pi, t)} \quad (45)$$

Если далее $V_{\Pi}(t)$ – линейная или степенная функция, то $M^*(\Pi, t)$ может быть представлено зависимостью (11).

Учитывая, что недопустимый режим работы элемента наступает при превышении износа допустимой величины ($\Pi_{\text{доп}}$), срок службы элемента t при $\Pi(t) = \Pi_{\text{доп}}$ становится равным допустимому (d) значению ($t = T_d$), то подставив (11) в (44) и (45), получим

$$F_1(T_d) = 1 - F_1(\Pi_{\text{доп}}, T_d) = 1 - e^{-\Pi_{\text{доп}} \cdot a_2 T_d^{b_2}} = 1 - e^{-\frac{T_d^{b_2}}{S}} \quad (46)$$

$$F_2(T_d) = 1 - F_2(\Pi_{\text{доп}}, T_d) = e^{-\frac{T_d^{b_2}}{S}} \quad (47)$$

Нетрудно заметить, что $F_1(T_d)$ соответствует функции распределения Вейбулла, а $F_2(T_d)$ – функции надежности Вейбулла.

6.4. По величинам остаточного срока службы (ΔT_d). С инженерной точки зрения величина ΔT_d предпочтительнее T_d , т.к. непосредственно характеризует техническое

состояние элемента. Кроме того, для восстанавливаемых элементов величина T_d существенно зависит от возможностей восстановления и потому может изменяться в больших пределах. Поскольку остаточный срок службы элемента ΔT_d равен разности предельного (T_d) и текущего срока службы (t_i), то расчетные формулы для ПД величины ΔT_d могут быть получены непосредственно из расчетных формул ПД для T_d путем вычитания t_i . Так если $t_i=5$ (см. рис.2.), то $M^*(\Delta T_d)=2,8$ лет; $\Delta T_d=1,6$ лет; $\Delta T_d=5$ лет, а распределение $F(T_d)=F(\Delta T_d)$ с соответствующими квантилями ($\Delta T_d = T_d - t_i$)

Заключение.

Получены расчетные формулы для ПД элементов с возрастающей скоростью износа при равномерном, непрерывном или дискретном воздействии факторов, вызывающих износ, и практически неизменной «тяжести» воздействия.

-
1. Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б. Модели отказов. М., Сов. радио, 1966.
 2. Сборник задач по теории вероятностей, математической статистике и теории случайных функций. Под. ред. А.А. Свешникова: М., Наука, 1965, 632 с.

ELEKTRİK QURĞULARININ ELEMENTLƏRİNİN, KÖHNƏLMƏ SÜRƏTLƏRİNİN YÜKSƏLƏN HALINDA, UZUNÖMÜRLÜLÜK GÖSTƏRİCİLƏRİNİN HESABLAMA ÜSULU

FƏRHADZADƏ E.M., MURADƏLİYEV A.Z., NİKCOY A.D.

Elektrik qurğularının elementlərinin, köhnəlmə sürətlərinin yüksələn halında, uzunömürlülük göstəricilərinin statistik qiymətləndirilməsinin üsulu və alqoritmi işlənmişdir.

THE METHOD OF CALCULATION OF DURABILITY PARAMETERS OF ELECTROINSTALLATIONS ELEMENTS AT GROWING SPEED OF THEIR DETERIORATION

FARHADZADE E.M., MURADALIYEV A.Z., NIKJOY A.D.

The estimation of parameters of a residual resource and residual service life of elements of electroinstallations on the statistical data повреждаемости and defects revealed at operation, allows in time to reveal approach of catastrophic deterioration, to lower expenses for scheduled and emergency repairs. The method and algorithm of a statistical estimation of parameters of durability of elements of electroinstallations is developed at growing speed of their deterioration.