УДК 621.019

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО СРОКА СЛУЖБЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК ПРИ УБЫВАЮЩЕЙ СКОРОСТИ ИХ ИЗНОСА.

ФАРХАДЗАДЕ Э.М., МУРАДАЛИЕВ А.З., НИКДЖОЙ А.Д.*

Азербайджанский НИИ Энергетики и Энергопроектирования
*Институт энергетического и водного ресурса (Иран)**

Реферат.

Важной практической задачей эксплуатации является своевременной выявление изношенных элементов электроустановок. Рассмотрены метод и алгоритм оценки надежности элементов электроустановок при убывающей скорости износа.

Снижение скорости износа $V_П(t)$ характерно для некоторых коррозионных процессов, процессов накопления усталости в металлах, диффузионных процессов, процесса накопления деформации при высоких температурах, на элементах, которые со временем «приспосабливаются» к условиям работы. Закономерности снижения $V_П(t)$ определяются детерминированной $\upsilon_п(t)$ и случайной $\rho(t)$ составляющими.[1] Чем неравномерность воздействия во времени и степень изменения тяжести воздействия больше, тем больше влияние $\rho(t)$, и, следовательно, тем больше отдельные реализации «переплетаются» друг с другом.

Будем различать четыре разновидности износа однотипных элементов (ОЭ), работающих в сходных условиях с одинаковым сроком службы, для которых:

1. Воздействие факторов, вызывающих износ ОЭ, практически равномерное, а разбросом тяжести воздействий, ведущих к износу, можно пренебречь, т.е. $\rho(t)=1$. Однако начальное качество ОЭ различно, в частности, после проведения восстановления износа (ремонтные работы) качество элементов может существенно отличаться.
2. Начальный износ равен нулю $\rho(t)=1$, тяжесть воздействия для каждого элемента различна.
3. Начальное качество ОЭ и тяжесть воздействия факторов, в том числе свойства материалов, различны, $\rho(t)=1$.
4. Начальное качество ОЭ различно. Износ ОЭ происходит под воздействием ряда факторов, различающихся интенсивностью и тяжестью воздействия, т.е. $\rho(t)\neq1$.

В настоящей статье будут рассмотрены вопросы оценки показателей долговечности (ПД) для ОЭ, износ которых отвечает первой из рассматриваемых выше разновидностей.

Графическая иллюстрация закономерностей износа ОЭ показана на рисунке 1.

На рис.2. приведены некоторые закономерности изменения убывающей скорости износа элементов.

На рис.3.а, б – соответствующие им кривые изменения износа во времени при $П(0)\neq0$ (рис.3а.) и $t\neq0$ (рис.3б.).

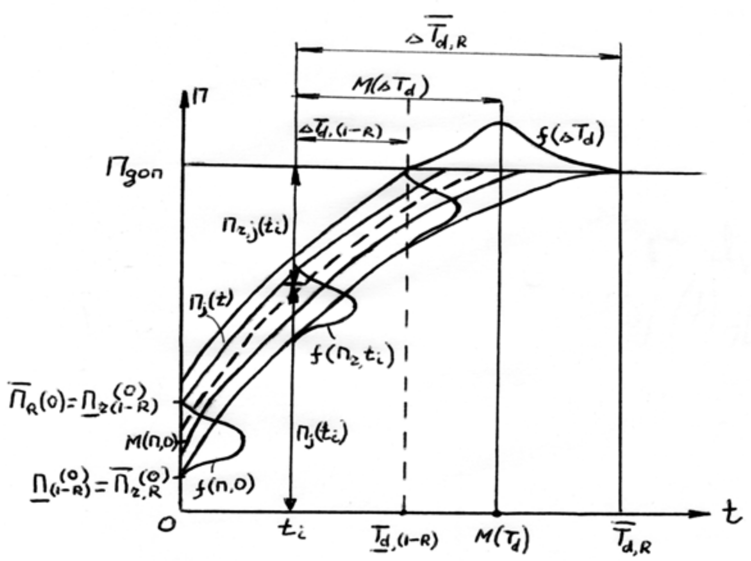

Рис. 1. Графическая иллюстрация закономерности износа при $dV_{П}(t)/dt<0$.

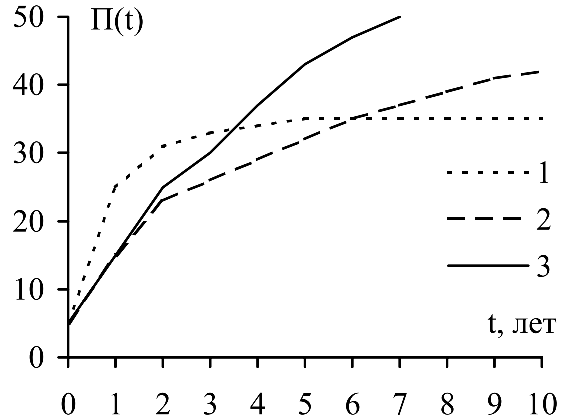

Рис.2. Типовые закономерности изменения убывающей скорости износа.
($a_{1,1}$=30; $a_{1,2}$=15; $a_{1,3}$=10)
а) П(0)=5 б) t_0=2

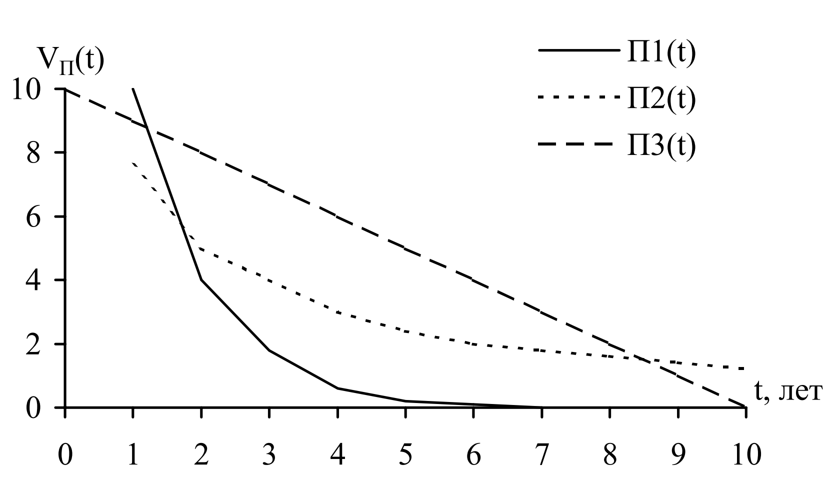

Рис.3. Типовые закономерности износа при $dV_{П}(t)/dt<0$.
а – $П(0)\neq0$; б – $t_0\neq0$.
1- $П_1(t)$; 2 – $П_2(t)$; 3 – $П_3(t)$.

Кривые $\upsilon_п(t)$ соответствуют типовым элементарным функциям:

1) Показательной функции

$$\upsilon_{П,1}(t) = a_1 e^{-t}, \quad (1)$$

2) Дробной рациональной функции:

обратной пропорциональности

$$\upsilon_{П,2}(t) = a_2.(1+t), \quad (2)$$

линейной

$$\upsilon_{П,3}(t) = a_3 - t, \quad (3)$$

где a_1, a_2, a_3 – некоторые постоянные коэффициенты

Закономерности износа П(t) вычислим путем интегрирования функции $\upsilon_п(t)$ в интервале [0,1]. При интегрировании необходимо учесть следующее.

Качество однотипных элементов (ОЭ), свойства их материалов и, в частности, качество ОЭ после восстановления части износа различаются. Поэтому случайно различаются и характеристики износа ОЭ, работающих в сходных условиях с одинаковым сроком службы.

Будем различать ОЭ, имеющие некоторый начальный износ, среднее значение которого равно $M^*(П,0)$, и ОЭ, износ которых возникает, в среднем, через некоторый интервал времени $M^*(t_0)$ после ввода в работу.

В первом случае износ в момент времени t определяется по формуле:

$$П(t) = П(0) + \int_0^t \upsilon_П(t)dt,$$

а во втором случае

$$П(t) = \int_0^t \upsilon_П(t - t_0)dt,$$

где

$$П(t \le t_0) = 0.$$

С учетом вышеизложенного, для функций (1-3)

при П(0)≠0 имеем

$$П_1(t) = a_{1,1}(1 - e^{-t}) + П_1(0) \quad (4)$$

$$П_2(t) = a_{1,2}\ln(1+t) + П_2(0) \quad (5)$$

$$П_3(t) = t\left(a_{1,3} - \frac{t}{2}\right) + П_3(0), \quad (6)$$

а при П(0)=0 и t≠0

$$П_1(t) = a_{1,1}(1 - e^{-(t-t_{0,1})}) \quad (7)$$

$$П_2(t) = a_{1,2}\ln(1 + t - t_{0,2}) \quad (8)$$

$$П_3(t) = a_{1,3}(t - t_0) - \frac{(t - t_{0,3})^2}{2}. \quad (9)$$

Последовательность расчета показателей долговечности (ПД) рассмотрим для функции $П_1(t)$. Графическая иллюстрация ПД для величин износа П(t), остаточного ресурса $П_r(t)$, предельного (T_d) и остаточного (ΔT_d) срока службы приведена на рис.1. Выделены оценка среднего значения, верхнее и нижнее граничные значения доверительного интервала, функция распределения. Прежде чем перейти к выводу формул для расчета ПД, отметим, что в реальных условиях эксплуатации электроустановок, даже при известном типе функции П(t), определить постоянные коэффициенты уравнения (а, П(0), t_0) традиционным методом «ожидания» результатов износа, как правило, невозможно, а априорная информация об износе отсутствует.

Часто полезным может оказаться следующий подход [2]. Выбираем две группы однотипных невосстанавливаемых элементов (НЭ), работающих в сходных условиях (обозначим их через ОНЭ). Срок службы ОНЭ в каждой группе должен быть одинаковым, а сроки службы в группах t_1 и t_2, где $t_2>t_1$, существенно различаться ($\Delta t=t_2-t_1$, должен быть таким, чтобы изменение износа было намного больше погрешности его измерения). Выполнив измерение износа в каждой групп ОНЭ, вычислим оценки математического ожидания $M^*(П,t_1)$ и $M^*(П,t_2)$ (индекс «*» обозначает оценку), оценки дисперсии $D^*(П,t_1)$ и $D^*(П,t_2)$, построим статистические функции распределения $F^*(П,t_1)$ и $F^*(П,t_2)$ и установим их аналитический закон изменения $F(П,t_1)$ и $F(П,t_2)$. На основе (4) составим два уравнения

$$M^*(\Pi,t_1)=a_{1,1}(1-e^{-t_1})+M^*(\Pi,0)$$

$$M^*(\Pi,t_2)=a_{1,1}(1-e^{-t_2})+M^*(\Pi,0) \tag{10}$$

и решим их относительно коэффициентов «а» и $M^*(П,0)$

$$a_{1,1}=\frac{M^*(\Pi,t_2)-M^*(\Pi,t_1)}{e^{-t_1}-e^{-t_2}}=\frac{\Delta M^*(\Pi,\Delta t)}{e^{-t_1}-e^{-t_2}} \tag{11}$$

$$M^*(\Pi,0)=M^*(\Pi,t_1)-\Delta M^*(\Pi,\Delta t)\frac{1-e^{-t_1}}{e^{-t_1}-e^{-t_2}} \tag{12}$$

Отсюда

$$M^*(\Pi,t)=M^*(\Pi,t)+a(e^{-t_1}-e^{-t_2}) \tag{13}$$

Поскольку информация о начальном качестве ОНЭ отсутствует, при расчете $M^*(П,0)$ может оказаться, что $M^*(П,0)<0$. Это означает, что имеет место, так называемый, «порог чувствительности», когда процесс износа наблюдается не с момента ввода в работу (t_0), а через некоторый интервал времени $t_{0,1}$, среднее значение которого равно $M^*(t_{0,1})$. Наглядным пример тому является износ поверхности при наличии защитного покрытия, предотвращающего значимое воздействие внешних факторов на некотором интервале времени $t_{0,1}$.

Поскольку в момент $M^*(t_{0,1})$ величина $M^*(П,t_{0,1})=0$, определим $M^*(t_{0,1})$ из уравнения (13).

$$M^*(t_{0,1})=-\ln\left[a_{1,1}^{-1}\cdot M^*(\Pi,t_1)+e^{-t_1}\right] \tag{14}$$

Справедливость (14) может быть подтверждена, если составить и решить систему уравнений, исходя из (7) для моментов t_1 и t_2.

$$\left.\begin{aligned}M^*(\Pi,t_1)&=a_{2,1}(1-e^{(t_1-M^*(t_0))}\\ M^*(\Pi,t_2)&=a_{2,1}(1-e^{-(t_2-M^*(t_{0,1}))}\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

Разделив второе уравнение на первое, получим

$$\frac{M^*(\Pi,t_2)}{M^*(\Pi,t_1)}=\frac{e^{-M^*(\Pi,t_{0,1})}-e^{-t_2}}{e^{-M^*(\Pi,t_{0,1})}-e^{-t_1}}$$

Отсюда, проведя ряд преобразований, получим

$$e^{-M^*(t_{0,1})}=\frac{\dfrac{M^*(\Pi,t_2)}{M^*(\Pi,t_1)}e^{-t_1}-e^{-t_2}}{\dfrac{M^*(\Pi,t_2)}{M^*(\Pi,t_1)}-1}=A$$

$$M^*(t_{0,1})=-\ln A \tag{16}$$

В свою очередь, если в (14) подставить (11) и провести ряд преобразований, то получим

$$\frac{M^*(\Pi,t_1)}{\dfrac{M^*(\Pi,t_2)-M^*(\Pi,t_1)}{e^{-t_1}-e^{-t_2}}}+e^{-t_1}=\frac{\dfrac{M^*(\Pi,t_2)}{M^*(\Pi,t_1)}e^{-t_1}-e^{-t_2}}{\dfrac{M^*(\Pi,t_2)}{M^*(\Pi,t_1)}-1}=A$$

Иначе говоря, формула (16) объективно отражает среднюю величину «порога чувствительности». Последовательность оценки постоянных коэффициентов уравнений 5, 6, 8 и 9 аналогична вышеизложенному.

Формулы для расчета ПД приводим для случая, когда П(0)≠0, т.е. для уравнения износа (4).

1. ПД износа

1.1. Среднее значение в соответствии с (13) и (11)

$$M^*(\Pi,t)=M^*(\Pi,t_1)+\frac{M^*(\Pi,t_2)-M^*(\Pi,t_1)}{e^{-t_1}-e^{-t_2}}(e^{-t_1}-e^{-t}) \qquad (17)$$

1.2. Нижнее и верхнее граничные значения доверительного интервала с уровнем значимости ν и вероятностью R=1-ν/2 равны

$$\underline{\Pi}_{(1-R)}(t)=\underline{\Pi}_{(1-R)}(t_1)+\frac{\underline{\Pi}_{(1-R)}(t_2)-\underline{\Pi}_{(1-R)}(t_1)}{e^{-t_1}-e^{-t_2}}(e^{-t_1}-e^{-t}) \qquad (18)$$

$$\overline{\Pi}_R(t)=\overline{\Pi}_R(t_1)+\frac{\overline{\Pi}_R(t_2)-\overline{\Pi}_R(t_1)}{e^{-t_1}-e^{-t_2}}(e^{-t_1}-e^{-t}) \qquad (19)$$

где $\underline{\Pi}_{(1-R)},\overline{\Pi}_R$ - соответственно нижние и верхние граничные значения доверительного интервала в момент t_i, где i=1,2.

1.3. Функция распределения износа. Согласно исходным условиям

$$F(\Pi,t)=F(\Pi,t_1)=F(\Pi,t_2) \qquad (20)$$

2. ПД остаточного ресурса (r). Вычисляются исходя из условия $\Pi_r=\Pi_{ДОП}-\Pi(t)$, где $\Pi_{ДОП}$ – допустимое значение износа

$$M^*(\Pi_r,t)=\Pi_{ДОП}-M^*(\Pi,t) \qquad (21)$$

$$\underline{\Pi}_{r,(1-R)}(t)=\overline{\Pi}_R(t) \qquad (22)$$

$$\overline{\Pi}_{r,R}(t)=\underline{\Pi}_R(t) \qquad (23)$$

$$F(\Pi_r,t)=1-F(\Pi,t) \qquad (24)$$

3. ПД предельного срока службы (T_d) вычисляются из условия, что при $t=T_d$ величина $\Pi_r(t)=0$, а $\Pi(T_d)=\Pi_{ДОП}$.

3.1. Среднее значение. Из уравнения (17) имеем

$$\Pi_{ДОП}=M^*(\Pi,t_1)+\frac{M^*(\Pi,t_2)-M^*(\Pi,t_1)}{e^{-t_1}-e^{-t_2}}(e^{-t_1}-e^{-M^*(T_d)})$$

Отсюда

$$M^*(T_d)=-\ln\left[e^{-t_1}-\frac{\Pi_{ДОП}-M^*(\Pi,t_1)}{a_{1,1}}\right] \qquad (25)$$

3.2. Нижнее и верхнее граничные значения доверительного интервала.

$$\underline{T}_{d,(1-R)}=-\ln\left[e^{-t_1}-\frac{\Pi_{ДОП}-\overline{\Pi}_R(t_1)}{\overline{a}_{1,1,R}}\right] \qquad (26)$$

где $$\overline{a}_{1,1,R}=\frac{\overline{\Pi}_R(t_2)-\overline{\Pi}_R(t_1)}{e^{-t_1}-e^{-t_2}}$$

$$\overline{T}_{d,R} = -\ln\left[e^{-t_1} - \frac{\Pi_{ДОП} - \underline{\Pi}_{(1-R)}(t_1)}{\underline{a}_{1,1,(1-R)}}\right], \tag{27}$$

где $$\underline{a}_{1,1,(1-R)} = \frac{\underline{\Pi}_{(1-R)}(t_2) - \underline{\Pi}_{(1-R)}(t_1)}{e^{-t_1} - e^{-t_2}}$$

3.3. Тип функции распределения $F(T_d)$ рассмотрим для случая, когда $F(\Pi,t)$ соответствует нормальному закону

$$F(\Pi,t) = \Phi\left[\frac{\Pi(t) - M(\Pi,t)}{\sigma(\Pi,t)}\right], \tag{28}$$

где Ф[.] – функция Лапласа. Поскольку при $t=T_d$ величины $\Pi_r(t)=0$, $F(\Pi_r,t)=1-F(\Pi,t)$, а $F(\Pi_r,T_d)=F(0,T_d)=F(T_d)$,то

$$F(T_d) = 1 - \Phi\left[\frac{e^{-M^*(T_d)} - e^{-T_d}}{a^{-1}\sigma(\Pi)}\right] = \Phi\left[\frac{e^{-T_d} - e^{-M^*(T_d)}}{a^{-1}\sigma(\Pi)}\right]. \tag{29}$$

Таким образом, случайная величина T_d имеет распределение вероятностей, аналогичное $F(\Pi_r,t)$ с той разницей, что T_d и $M^*(T_d)$ подвергнуты экспоненциальному преобразованию. Нетрудно заметить, что это заключение не зависит от типа $F(\Pi,t)$.

4. ПД остаточного срока службы (ΔT_d) вычисляются, исходя из условия $\Delta T_d=T_d-t_i$, где t_i – срок службы элемента.

$$M^*(\Delta T_d) = M^*(T_d) - t_i$$

$$\Delta\underline{T}_{d,(1-R)} = \underline{T}_{d,(1-R)} - t_i$$

$$\Delta\overline{T}_{d,R} = \overline{T}_{d,R} - t_i$$

$$F(\Delta T_d) = F(\Delta T_d + t_i) = F(T_d)$$

Заключение.

Получены формулы для расчета оценок ПД ОЭ с $dV_\Pi(t)/dt<0$, $\rho(t)=1$ и различными начальными условиями.

---

1. *Герцбах И.Б., Кордонский Х.Б.* Модели отказов. М., Сов. радио, 1966.
2. *Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Никджой А.Д.* Методы оценки долговечности невосстанавливаемых элементов. Проблемы энергетики №2, 2001.

ELEKTRİK QURĞULARININ ELEMENTLƏRİNİN AZALMAQ SÜRƏTLƏ AŞINMASI ZAMANI ONLARIN ETİBARLIĞI.

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

Elektrik qurğularının elementlərinin aşınmasının vaxtında təyin edilməsi istehsalatda əsas praktiki məsələlərdən biridir. Elektrik qurğularının elementlərinin azalmaq sürətlə aşinması zamanı onların etibarlığının qiymətləndirilməsinin metod və alqoritminə baxılmışdır.

DEFINITION OF RESIDUAL SERVICE LIFE ELEMENTS OF ELECTROINSTALLATIONS AT DECREASING SPEEDS THEIR DETERIORATION.

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

The important practical task of operation is the duly revealing of the worn out elements of electroinstallations. Are considered a method and algorithm of an estimation of reliability of elements of electroinstallations at decreasing speed of deterioration.