

УДК 621.311.18

А.Н. Назарычев<sup>1</sup>, С.Н. Животягина<sup>2</sup>, Т.А. Жулина<sup>3</sup>**ОЦЕНКА РАСХОДА РЕСУРСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ И УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**Ивановский государственный энергетический университет<sup>1</sup>,  
Ивановский институт ГПС МЧС<sup>2</sup>,  
Проектный центр «Контакт» (г. Иваново)<sup>3</sup>

Поставлена задача необходимости уточнения величины ресурса работы электрооборудования. Проанализированы причины, влияющие на его изменения. Разработана математическая модель оценки расхода ресурса с учетом режимов его работы и влияния температуры окружающей среды, позволяющая получить достоверные показатели его состояния.

*Ключевые слова:* электрооборудование, надежность, ресурс, предельное состояние, эксплуатация.

Согласно [1], технический ресурс – это наработка от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до наступления его предельного состояния. Предельное состояние – состояние, при котором дальнейшая эксплуатация объекта должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого снижения уровня работоспособности, или недопустимого снижения эффективности эксплуатации. Тогда ресурс можно рассматривать как интегральную оценку технического состояния оборудования, измеряемую в единицах наработки. Для разных типов электрооборудования (ЭО) наработка измеряется в различных единицах: для трансформаторов – количество лет, для выключателей – количество коммутаций и т.п.

Причиной изменения величины ресурса является изменение эксплуатационных факторов: режимов и условий работы. В зависимости от их интенсивности, характера условий и режимов работы происходит сработка ресурса на определенную величину. Все эксплуатационные факторы можно разделить на тепловые, механические, электрические, химические, радиационные и др. Для ЭО первые три являются наиболее важными. Действие каждой группы факторов характеризуется соответствующими параметрами: для тепловых – температура; для механических – вибросмещение, виброскорость, частота и т.п.; для электрических – напряженность электромагнитного поля, уровень напряжения. Очевидно, что чем больше отклонение каждого из параметров по всем группам факторов от номинального значения, тем интенсивнее срабатывается ресурс. Тяжесть режима по  $i$ -му параметру оценивается коэффициентом тяжести режима  $k_i$ :

$$k_i = \frac{X_i}{X_i^{ном}}, \quad (1)$$

где  $X_i$  и  $X_i^{ном}$  – текущее и номинальные значения  $i$ -го параметра соответственно.

При увеличении коэффициента  $k_i$  происходит ускорение сработки ресурса. Оборудование работает установленную нормативным документом величину наработки (нормативный ресурс), если выполняется условие (2):

$$k_1 = k_2 = \dots = k_i = \dots = k_N = 1, \quad (2)$$

где  $i = 1 \dots N$  – количество эксплуатационных факторов, действующих на ЭО.

Значение коэффициента  $k_i < 1$  соответствует облегчению режима работы ЭО по  $i$ -му фактору, а  $k_i > 1$  – утяжелению. Текущий режим работы ЭО характеризуется множеством значений  $k_i$  для всех возможных факторов. Отклонение любого фактора способствует пере-

ходу ЭО в новый режим работы, которому соответствует новая скорость сработки ресурса. На каждом из установившихся режимов работы ЭО скорость сработки ресурса постоянна:

$$\frac{dR}{dt} = v = const \Rightarrow R(t) = \int_0^t v dt = vt, \quad (3)$$

где  $v$  - скорость сработки ресурса, постоянная для каждого режима работы ЭО. Зависимости ресурса  $R^*$  в относительных единицах от времени  $t$  для режимов, характеризующихся разными величинами  $v$ , представлены на рис. 1.

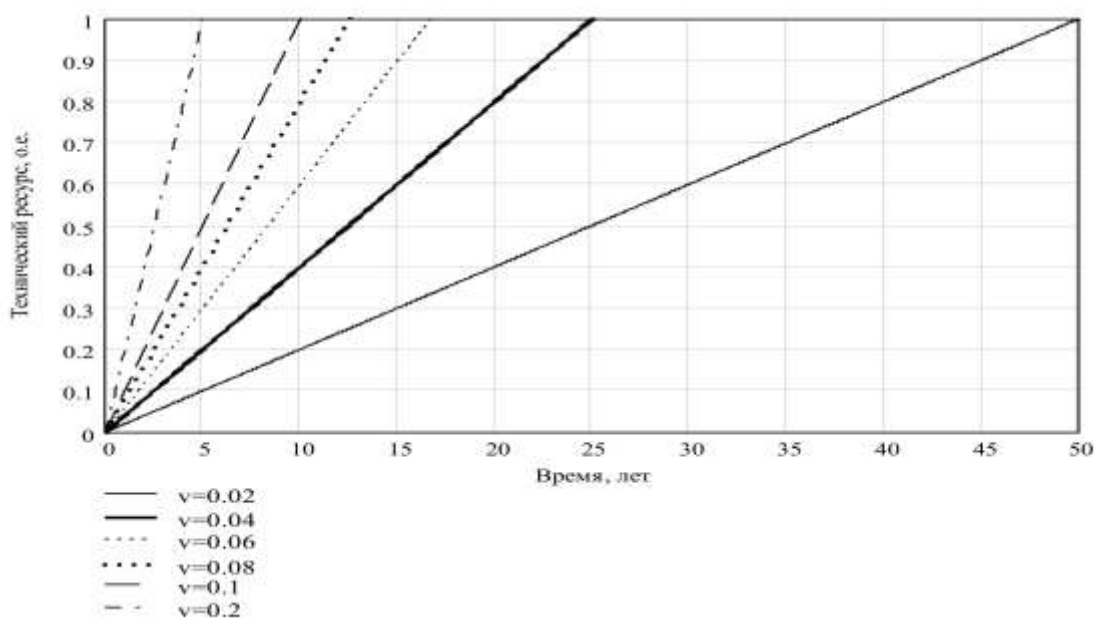


Рис. 1. Зависимость относительного ресурса  $R^*$  от времени  $t$

Предположим, что при изменении коэффициента тяжести режима  $k_i$  на  $d_i$  единиц, ресурс ЭО изменяется в  $e$  раз:

$$R = R_0 e^{\frac{-(k_i-1)}{d_i}}, \quad (4)$$

где  $R_0$  – установленный ресурс. Поделив обе части равенства (4) на  $R_0$ , получим аналогичное выражение в относительных единицах:

$$R^* = e^{\frac{-(k_i-1)}{d_i}}, \quad (5)$$

Зависимость технического ресурса ЭО  $R^*$  от коэффициента тяжести режима  $k_i$  при  $d_i = \{0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10\}$  приведена на рис. 2. Эта зависимость имеет качественный характер и отражает лишь тенденцию изменения ресурса. Для точного определения зависимости (5) необходимо знать значение  $d_i$ , которое, в свою очередь, может быть определено экспертно или статистическим путем для ЭО конкретного типа и класса напряжения.

На рис. 2 показано, какую величину ресурса по отношению к установленному может сработать ЭО при работе в течение всего срока службы с одним и тем же значением  $i$ -го параметра (фактора)  $k_i$  при номинальных значениях остальных параметров.

Для  $N$  воздействующих факторов выражение (5) принимает вид

$$R^* = \prod_{i=1}^N e^{\frac{-(k_i-1)}{d_i}} = e^{\sum_{i=1}^N \frac{-(k_i-1)}{d_i}}. \quad (6)$$

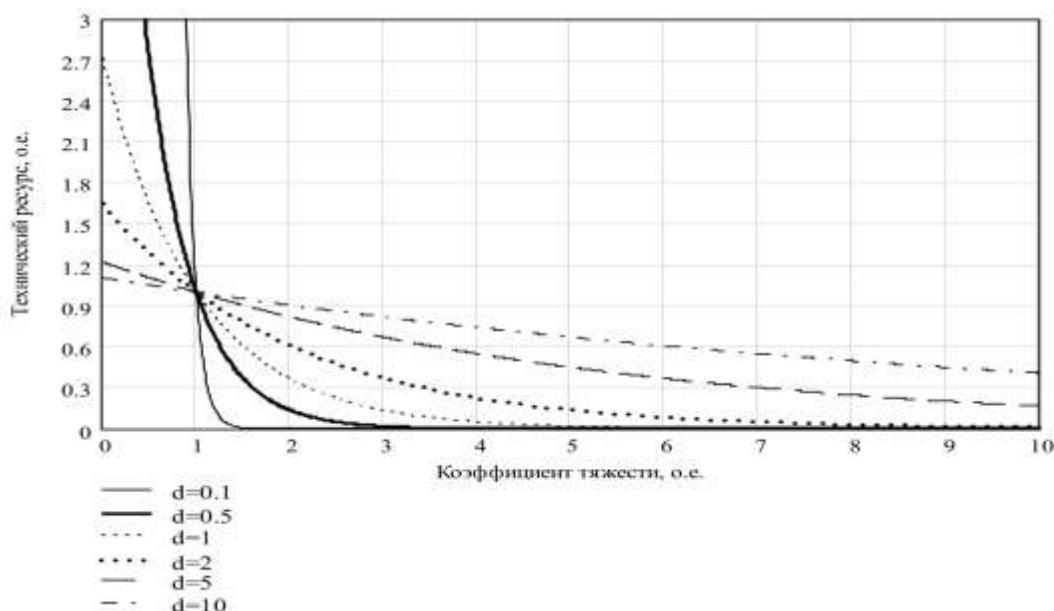


Рис. 2. Зависимость технического ресурса ЭО  $R^*$  от коэффициента тяжести режима  $k_i$

Для трех групп эксплуатационных факторов формулу (6) запишем в виде

$$R^* = e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}}, \quad (7)$$

где  $j_1 = 1 \dots n_1$  – количество электрических факторов;  $j_2 = 1 \dots n_2$  – тепловых;  $j_3 = 1 \dots n_3$  – механических;  $k_{j_1}^{\mathcal{E}}, k_{j_2}^T, k_{j_3}^M$  – кратности  $j_1$ -го электрического,  $j_2$ -го теплового,  $j_3$ -го механического факторов;  $d_{j_1}^{\mathcal{E}}, d_{j_2}^T, d_{j_3}^M$  – относительные отклонения  $j_1$ -го электрического,  $j_2$ -го теплового,  $j_3$ -го механического факторов, при которых ресурс ЭО меняется в  $e$  раз, при этом  $n_1+n_2+n_3=N$ .

В самом общем случае величина  $d_i$  может меняться в зависимости от  $k_i$ :  $d_i = f(k_i)$ . Однако для упрощения дальнейших расчетов примем, что  $d_i = \text{const}$  при любом значении  $k_i$ . Величина  $k_i$  в общем случае также может быть не постоянная и зависеть от величины наработки, а чаще от времени.

Допустим, ЭО работает в режиме, отличном от номинального по одному или нескольким факторам. Действительный сработанный ресурс в единицах наработки определяется по отношению к наработке в номинальных условиях в соответствии с (7):

$$\Delta R = \int_0^{R_p} R^* dR = \int_0^{R_p} e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}} dR, \quad (8)$$

где  $\Delta R$  – реальный сработанный ресурс ЭО;  $R_p$  – реальная наработка ЭО (количество часов, коммутаций и т.п.).

Для пояснения формулы (8) рассмотрим пример. Допустим, единицами наработки для ЭО являются часы, тогда под ресурсом понимается время наработки ЭО до предельного состояния. Формула (8) приобретает вид

$$\Delta T = \int_0^{T_p} e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}} dt, \quad (9)$$

где  $T_p$  – реальное время работы ЭО;  $\Delta T$  – фактическое (эквивалентное) время, которое наработало ЭО в данных условиях за время  $T_p$ .

Если коэффициенты тяжести в выражении (9) зависят от времени, то процесс интегрирования усложняется.

Вернемся к выражению (3). Будем считать, что установленный срок службы ЭО соответствует времени, в течение которого ЭО исчерпает свой ресурс. Если единицами наработки являются единицы времени, то понятия установленного срока службы и установленного ресурса эквивалентны. Тогда скорость сработки ресурса определяется выражением

$$v = R_y / T_y, \quad (10)$$

где  $T_y$  – установленный срок службы.

Если расчет ведется в относительных единицах, то  $R_y = 1$ . Отметим, что величина  $R_y$  устанавливается для номинального режима работы ЭО, т.е. когда выполняется условие (2). Если ЭО работает в условиях, отличных от номинальных, то скорость сработки ресурса на интервале времени  $T_p$  увеличивается и определяется по выражению

$$v = \Delta R / T_p. \quad (11)$$

Подставив (8) в (11), получим

$$v = \frac{1}{T_p} \int_0^{R_p} e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}} dR. \quad (12)$$

Единица измерения величины  $v$  зависит от единицы измерения наработки, характерной для данного типа ЭО. Если единицами наработки являются единицы времени, то величина скорости сработки ресурса  $v$  на отрезке  $[0, T_p]$  в относительных единицах определяется по выражению

$$v = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}} dt. \quad (13)$$

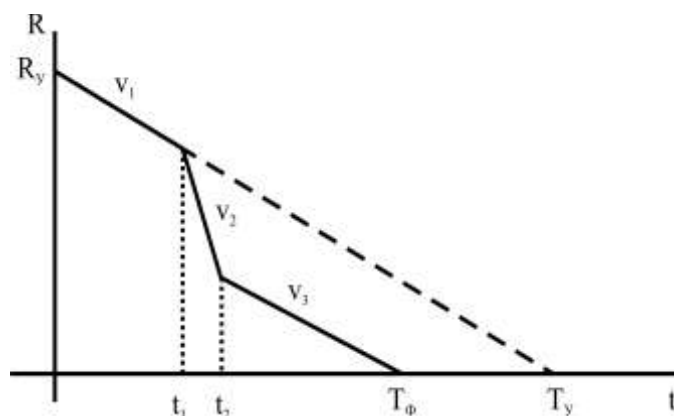


Рис. 3. Качественная зависимость ресурса от времени

Подставляя значения скоростей в выражение (3), получим зависимость ресурса от времени на данном временном интервале. Исходя из этого, общая зависимость ресурса от времени представляет собой ломаную линию. При достижении ею прямой, задаваемой уравнением  $R = 1$ , наступает окончание установленного срока службы ЭО. Качественная зависимость ресурса от времени представлена на рис. 3.

Остаточный ресурс при этом определится по выражению

$$R_{ост} = 1 - R. \quad (14)$$

Рассмотрим пример для трансформатора типа ТД-80000/220. Известно, что в течение суток он работал 16 ч с нагрузкой 78 МВА ( $S^* = 0,975$ ), 7,5 ч – 72 МВА ( $S^* = 0,9$ ) и 0,5 ч – 85 МВА ( $S^* = 1,063$ ). В данном режиме трансформатор проработал все 25 лет своего нормативного срока службы  $R_0$ . Произведем расчет ресурса трансформатора при изменении  $\vartheta_{окр\ ном}$  от 15 до 55 °С.

Для данного трансформатора принимаем  $x = 0,9$ ;  $y = 1,6$ ;  $\Delta\vartheta_{м.ном} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (60 К) или  $\Delta\vartheta_{м.ном}^* = 0,612$  (0,162 о.е);  $\Delta\vartheta_{ННТ.ном} = 98-35-60 = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$  или  $\Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* = 0,031$  о.е. (0,003 о.е.). Найдем коэффициент  $d = 315/79 = 3,987$ .

Рассчитаем фактический сработанный ресурс  $R^*$  по формуле (15) из [2]:

$$R^*(\vartheta_{окр}^*) = R_0^* + \sum_{j=1}^K R_j^* \cdot (e^{\frac{\vartheta_{окр}^* + \Delta\vartheta_{м.ном}^* \left[ \frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x + \Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* (S^*)^y - 1}{\Delta\vartheta^*}} - 1) \quad (15)$$

Если данный трансформатор имеет изоляцию класса А, то величина  $\Delta X_{\vartheta} = -1,053 \text{ 1/К}$ . Тогда  $\Delta X_{\vartheta}^* = \Delta X_{\vartheta} / (1/371) = 1,053 \cdot 371 = 390,663$  о.е. По выражению (16) рассчитаем фактический сработанный ресурс  $R^*$  трансформатора при тех же условиях эксплуатации [2]:

$$R^*(\vartheta_{окр}^*) = R_0^* + \sum_{j=1}^K R_j^* \cdot (e^{\frac{0,264 - \vartheta_{окр}^* - \Delta\vartheta_{м.ном}^* \left[ \frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x - \Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* (S^*)^y}{\Delta X_{\vartheta}^* \left[ 0,736 + \vartheta_{окр}^* + \Delta\vartheta_{м.ном}^* \left[ \frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x + \Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* (S^*)^y \right]} - 1} - 1) \quad (16)$$

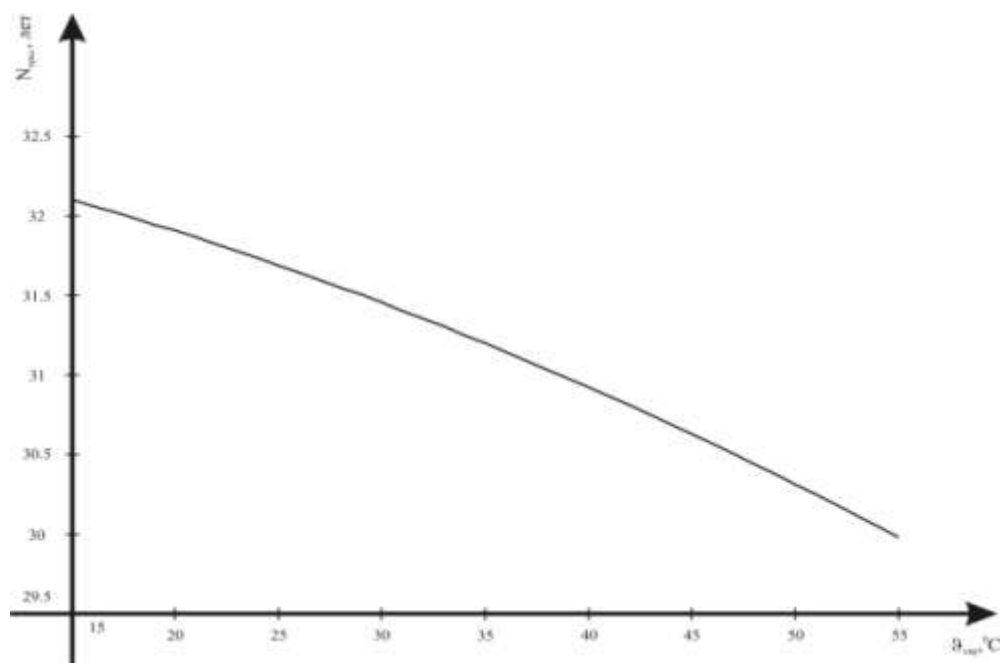
В именованных единицах фактический сработанный ресурс будет равен  $R = 0,745 \cdot 25 = 18,625$  лет и  $R = 1,00031 \cdot 25 = 25,008$  лет. Нормативный остаточный ресурс  $R_{0.ост}^* = 1 - 0,745 = 0,255$  о.е или  $R_{ост} = 25 - 18,625 = 6,375$  лет. Это справедливо, если далее трансформатор в течение суток будет работать с номинальной нагрузкой (80 МВА) температурой ННТ ( $98 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Предположим, что такой режим работы трансформатора сохранится и далее. Тогда фактический остаточный ресурс рассчитаем по формуле (17) [2]:

$$R_{ост}^*(\vartheta_{окр}^*) = R_{0.ост}^* - \sum_{j=1}^K R_j^* \cdot (e^{\frac{\vartheta_{окр}^* + \Delta\vartheta_{м.ном}^* \left[ \frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x + \Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* (S^*)^y - 1}{\Delta\vartheta^*}} - 1) \quad (17)$$

Таким образом, при условии, что трансформатор в течение суток всегда будет работать с нагрузками, указанными в данном примере, и температурой окружающей среды от  $15$  до  $55 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , то его полная наработка до предельного состояния будет определяться из выражения

$$N_{пред}(\vartheta_{окр}) = R_{ост}^*(\vartheta_{окр}^*) \cdot 25 + R^*(\vartheta_{окр}^*) \cdot 25 \quad (18)$$

На рис. 4 приведена зависимость наработки трансформатора до предельного состояния  $N_{пред}$  от температуры окружающей среды  $\vartheta_{окр}$ .



**Рис. 4. Зависимость наработки до предельного состояния  $N_{\text{пред}}$  от температуры окружающей среды  $\theta_{\text{окр}}$**

Из рис. 4 следует, что срок службы трансформатора в районах с повышенной температурой для приведенного примера снижается в среднем на 2,5% при увеличении температуры на  $10^{\circ}\text{C}$ .

#### Выводы

1. Разработанная математическая модель оценки ресурса ЭО с учетом условий эксплуатации позволяет рассчитать фактический сработанный ресурс с учетом влияния температуры окружающей среды и нагрузки.

2. Результаты расчета показали, что в районах с повышенной температурой ресурс их работы снижается в среднем на 2,5% при увеличении температуры на  $10^{\circ}\text{C}$ .

#### Библиографический список

1. Надежность систем энергетики. Терминология. – М.: Наука, 1980. Вып. 95. – 43 с.
2. **Назарычев, А.Н.** Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2005. – 224 с.

Дата поступления  
в редакцию 12.03.2010

**A.N. Nazarychev, S.N. Zhivotyaguina, T.A. Zhulina**

#### ESTIMATION OF ELECTRIC POWER EQUIPMENT LIFE TIME CONSUMPTION CONSIDERING ITS WORKING MODES AND ENVIRONMENT

The article states a problem of electrical power equipment lifetime specification. It analyzes reasons impacting lifetime. Authors describe mathematical model for lifetime consumption estimate considering working modes of the equipment and influence of ambient temperature. This model allows obtaining reliable indicators of lifetime consumption.

*Key words:* electric power equipment, reliability, life time, operating limit state, operation, maintenance.