

УДК 621.019

МОДЕЛИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И УСТРОЙСТВ УСТАНОВОК ЭНЕРГБЛОКА

ФАРХАДЗАДЕ Э.М., МУРАДАЛИЕВ А.З., РАФИЕВА Т.К.

АзНИИПИИ Энергетики, г.Баку

Рассмотрены основные существующие стратегии плановых ремонтов – регламентированный ремонт и ремонт по техническому состоянию. Показано, что при увеличении срока службы при регламентированной стратегии число отказов энергоблоков будет монотонно возрастать, а при ремонте по техническому состоянию монотонно уменьшается интервал между плановыми ремонтами.

Разработка моделей долговечности относится к основным проблемам объективного анализа и прогнозирования технического состояния энергоблоков (ЭБ). Вопросы теории и практики оценки показателей долговечности восстанавливаемых систем разработаны недостаточно полно [1]. Под восстанавливаемыми системами понимаются системы, работоспособность которых в процессе эксплуатации восстанавливается в результате планового ремонта отдельных элементов.

Для ЭБ, его установок, в настоящее время наиболее полно исследована модель восстановления, в основе которой находится стратегия регламентированного планового ремонта [2]. Графическая иллюстрация этой модели приведена на рис. 1.

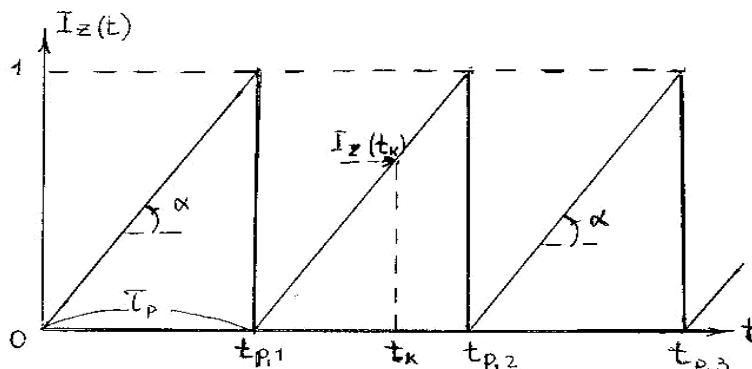


Рис.1 Упрощенная модель восстановления износа при регламентированном плановом ремонте

Каждый элемент ЭБ при этом характеризуется некоторым сроком службы T_{cl} . По истечению этого срока элемент подлежит замене вне зависимости от его технического состояния. Эффективность этой стратегии основана на соответствии реального срока службы элементов T_{cl}^* их нормативному значению T_{cl} .

Опыт эксплуатации показывает, что величина T_{cl}^* зависит от большого числа объективных и субъективных факторов, что приводит к существенному увеличению эксплуатационных затрат, как вследствие аварийных отключений ЭБ, когда $T_{cl}^* < T_{cl}$, так и в результате недоиспользованных возможностей элемента, когда $T_{cl}^* > T_{cl}$.

Наряду с одинаковой продолжительностью межремонтного цикла (интервал времени между смежными капитальными ремонтами), в этой модели предполагается, что:

- в межремонтном цикле восстановление износа не проводится;
- при капитальном ремонте износ полностью восстанавливается;

Не учитывается:

- информация множества диагностических показателей (ДП), отображающих ТС элементов ЭБ. Методология их учета, расчета основных показателей долговечности (износа I_z), остаточного ресурса (Re), остаточного срока службы с учетом случайного характера исходных данных рассмотрена в [3];
- случайный характер изменения скорости износа во времени;
- величина остаточного ресурса и ее достаточность до очередного капитального ремонта.

Учет восстановления износа в интервале межремонтного цикла. Восстановление износа в интервале между смежными капитальными ремонтами проводится при текущем и среднем ремонтах и определяется сроком службы отдельных деталей и узлов оборудования. Если восстановление износа не проводится, возможны отказы оборудования. Графическая иллюстрация этой модели приведена на рис.2.

Восстановление износа при плановом ремонте (ТР) в момент t_{TP} (см.рис.2а)) приводит к уменьшению износа на величину:

$$\Delta I_z(t_{TP}) = [I_z(t_{TP}^H) - I_z(t_{TP}^K)], \quad (1)$$

которая должна удовлетворять условию:

$$\Delta I_z(t_{TP}) \geq I_z(t_{TP}^H) + (t_{P,i+1} - t_{TP}) \cdot tg\alpha - 1 \quad (2)$$

Следовательно, величина износа после восстановления (к) не должна превышать:

$$I_z(t_{TP}^K) \leq 1 - (t_{P,i+1} - t_{TP})tg\alpha \quad (3)$$

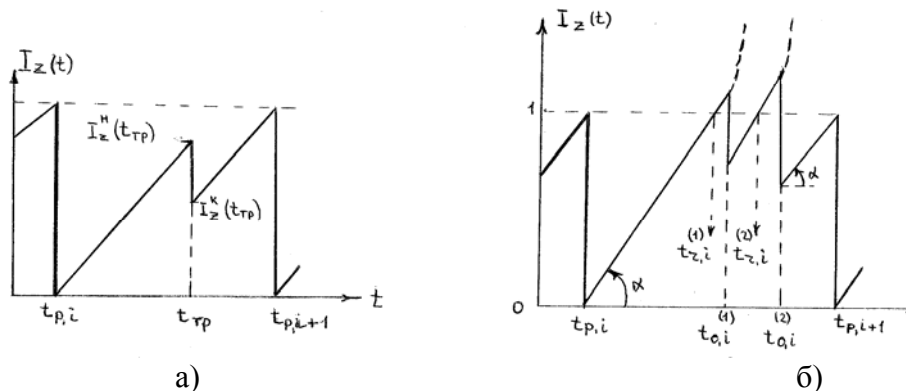


Рис.2. Модель восстановления износа в межремонтном периоде

а) – восстановление износа при ТР; б) – восстановление износа при отказах.

Как следует из рис. 2.(б), первое нарушение работоспособности объекта после i -го планового ремонта ($I_z(t)=1$) возникает в момент $t_{r,i}^{(1)}$. Далее скорость износа начинает нелинейно возрастать и в момент $t_{o,i}^{(1)}$ возникает отказ объекта. Проводится восстановление. Износ объекта при этом уменьшается. Если это изменение невелико, в момент $t_{r,i}^{(2)}$ происходит второй отказ объекта, его восстановление и последующее проведение планового ремонта в момент $t_{P,i+1}$.

Процесс, изображенный на рис.2(б), имеет место в условиях, когда контроль ДП объекта не проводится, или контроль не охватывает все элементы объекта, или все свойства элемента.

Наглядными примерами являются объекты, одним из основных технических показателей которых является протяженность (трубопроводы, кабели и др.), площадь поверхности (поверхности нагрева, изоляция и др.), объем (масло трансформаторов). К этой же группе относятся объекты, состоящие из большого числа однотипных элементов (пакеты трубопроводов поверхностей нагрева котла, конденсатор и др.)

При исследовании этой модели практический интерес представляет два вопроса:

1. Чему равно среднее число отказов объекта в интервале межремонтного цикла?
2. Какова должна быть величина восстановленного износа при аварийном ремонте, чтобы исключить возможность возникновения повторных отказов?

Число отказов на интервале $[t_{0,i}^{(1)}; t_{p,i+1}]$ (см. рис 2.б) есть величина случайная. Однако очевидно, что чем этот интервал больше и чем меньше величина восстанавливаемого износа, тем вероятность повторных отказов объекта будет больше.

Среднее число отказов может быть рассчитано следующим образом. Зададимся величиной предельного износа $Iz_{np} > 1$, при котором вероятность отказа объекта будет близка к единице.

Если иметь в виду, что $Iz_{np} - 1 \cong (0,1 \div 0,15)$, то предположение о неизменности скорости износа до Iz_{np} вполне допустимо. Отказ на интервале $[t_{r,i}^{(1)}, t_{p,i+1}]$, произойдет, если выполняется условие (см.рис.3):

$$\frac{Iz_{np} - 1}{tg\alpha} \leq (t_{p,i+1} - t_{r,i}^{(1)}) \quad (4)$$

Среднее число отказов K^* на интервале $[t_{r,i}^{(1)}, t_{p,i+1}]$ может быть вычислено на основе соотношения:

$$\frac{Iz_{np} - 1}{tg\alpha} + \sum_{j=1}^{K^*} \frac{Iz_{np} - Iz(t_{o,i}^{(j)})}{tg\alpha} \leq (t_{p,i+1} - t_{r,i}^{(1)}) = \tau_{o,i} \quad (5)$$

где $\tau_{o,i}$ - период отказов вследствие износа.

Если принять величину износа объекта после каждого восстановления отказа равной $Iz^K(t_{o,i}) = Iz_\xi$, то формула (5) упрощается и имеет вид:

$$\frac{(Iz_{np} - 1) + (Iz_{np} - Iz_\xi)(K^* - 1)}{tg\alpha} \leq \tau_{o,i} \quad (6)$$

После простых преобразований получим:

$$K^* \leq \frac{\tau_{o,i} \cdot tg\alpha - Iz_\xi + 1}{Iz_{np} - Iz_\xi} = \frac{\tau_{o,i} - Iz_\xi + 1}{\tau_p - \tau_{o,i}} \quad (7)$$

Имея в виду, что

$$\tau_{o,i} = \tau_p - \frac{1}{tg\alpha}; \quad (8)$$

получим:

$$K^* = Int \frac{\tau_p \cdot tg\alpha - Iz_\xi}{Iz_{np} - Iz_\xi} \quad (9)$$

Пример 1. Пусть $\tau_{o,i} = 0,5\tau_p$; $Iz_{np} = 1,1$; $Iz_\xi = 0,9$. При этих данных $K^* = 5$. Если Iz_ξ различны, то оценка K^* проводится для каждого $K^* \geq 2$ до тех пор, пока условие (5) не будет выполнено.

Модели износа, изображенные на рис.2 и рис.3, построены в предположении, что в интервале τ_p оборудование полностью изнашивается и при каждом плановом ремонте полностью восстанавливается путем замены на новый.

Рассмотрим оборудование, износ которого происходит со скоростью, существенно меньшей, чем $\frac{1}{\tau_p}$ (см. рис.4).

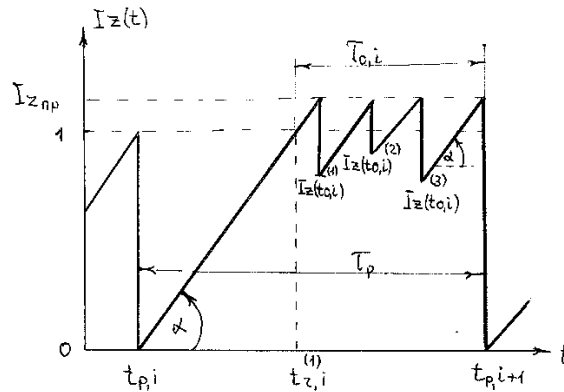


Рис.3. Модель восстановления износа при отказах

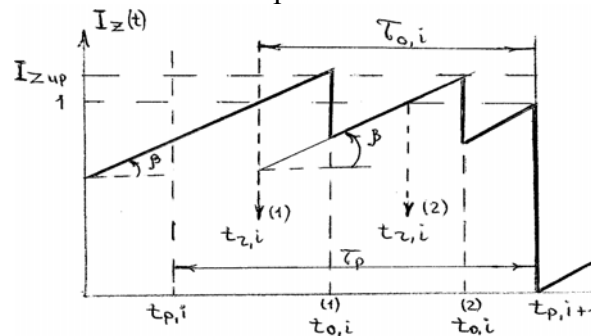


Рис.4. Модель восстановления износа при отказах и $tg\alpha < \frac{1}{\tau_p}$

При неизменности формул (4 - 7), интервал времени $\tau_{o,i}$ может быть вычислен по формуле:

$$\tau_{o,i} = \tau_p - \frac{1 - I_z(t_{p,i})}{tg\alpha} \quad (10)$$

Поскольку $I_z(t_{p,i}) = i \cdot \tau_p \cdot tg\alpha$; (11)

где i - число предшествовавших ремонтов;

то
$$\tau_{o,i} = \frac{(i+1) \cdot \tau_p \cdot tg\alpha - 1}{tg\alpha} \quad (12)$$

Среднее число отказов K^* на интервале времени $\tau_{o,i}$, в предположении $I_{z\xi} = const$ и в соответствии с формулой (9), может быть вычислено по формуле:

$$K^* \leq \frac{(i+1) \cdot \tau_p \cdot tg\alpha - I_{z\xi}}{I_{z_{нр}} - I_{z\xi}} \quad (13)$$

Чтобы предотвратить отказы оборудования в интервале $[t_{p,i}; t_{p,i+1}]$ необходимо в момент $t_{p,i}$ восстановить износ на величину, не меньшую, чем $I_{z\xi,i}$, где

$$I_{z\xi,i} = [(i+1) \cdot \tau_p \cdot tg\alpha - 1] \quad (14)$$

Учет остаточного износа конструктивных материалов. Рассмотренные выше математические модели основывались на предположении, что во время планового ремонта (моменты $t_{p,i}, t_{p,i+1}$) объект заменяется на новый, и проявлялось это предположение в отсутствии износа отремонтированного объекта после завершения планового ремонта.

В реальных условиях имеет место частичное восстановление износа, обусловленное наличием остаточного износа. Остаточный износ это износ, который не может быть устранен при существующей технологии ремонта. В частности, снижение работоспособности ЭБ происходит при забивании гибов труб поверхностей нагрева котла продуктами коррозии, отложении солей на внутренней поверхности трубопроводов, загрязнении поверхности изоляции и др. Эти разновидности износа полностью или частично устраняются в процессе эксплуатации ЭБ. В существенно меньшей степени достигается восстановление износа материала элементов оборудования и устройств (изменение структуры металла, снижение теплопроводности изоляции обмоток, изменение геометрических размеров и др.). Эти изменения обусловлены процессом старения материала и начинают проявляться при превышении срока службы нормативного значения.

На рис.5 в иллюстративных целях показан процесс изменения износа объекта во времени. В целях упрощения принято, что восстановление износа между плановыми ремонтами не проводится. Принята стратегия регламентированных плановых ремонтов.

Выделены два типа износа, первый из которых $Iz_\alpha(t)$ может быть восстановлен, а второй $Iz_\beta(t)$ - не восстанавливается. Восстанавливаемая часть износа изменяется со скоростью $v_\alpha = tg \alpha$. Принято, что периодичность планового ремонта $\tau_p \leq (tg \alpha)^{-1}$.

Невосстанавливаемый износ $Iz_\beta(t)$ возникает в момент $t_{p,i-1}$ и изменяется со скоростью v_β . Для изображенной на рис.5 линейной модели невосстанавливаемого износа скорость износа $v_\beta = tg \beta$.

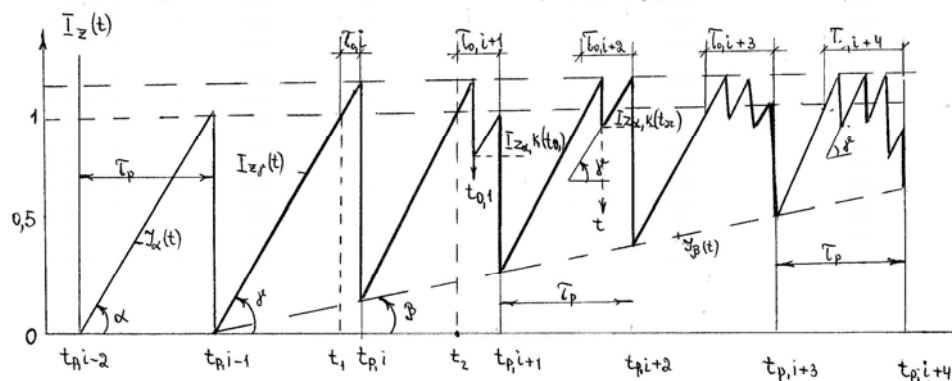


Рис.5 Модель восстановления с учетом остаточного износа

Процесс износа оборудования во времени характеризуется следующими особенностями:

- до момента $t_{p,i-1}$ имеет место лишь восстанавливаемый износ, который устраняется путем проведения соответствующих ремонтных работ;
- с момента $t_{p,i-1}$ в материале оборудования возникают невосстанавливаемые изменения. Скорость износа оборудования возрастает от v_α до $v_\gamma = tg \alpha + tg \beta$. В момент t_1 величина износа $Iz_\gamma(t_1) = 1$, однако, $Iz_\gamma(t_{p,i}) < Iz_{np}$;

- в течение $(i+1)$ -го планового ремонта проводится восстановление оборудования и включение его в работу с остаточным износом $Iz_{\beta}(t_{p,i+1})$. В момент t_2 межремонтного интервала $(t_{p,i+1} - t_{p,i+2})$ величина износа $Iz_{\gamma}(t_o) = 1$, а в момент $t_{o,1} < t_{p,i+2}$ величина износа $Iz_{\gamma}(t_{o,1}) = Iz_{np}$ и по принятому условию происходит отказ оборудования, его аварийный ремонт, в течение которого износ восстанавливается до $Iz_{\xi,k}(t_{o,1})$. Оборудование включается в работу. Износ по-прежнему происходит со скоростью U_{γ} . Последующий отказ оборудования происходит в момент $t_{p,i+1}$ и аварийный ремонт оборудования совмещается с его плановым ремонтом.
- развитие процесса износа происходит аналогично процессу предшествовавшего пункта, с той разницей, что число отказов оборудования возрастает.

Для рассматриваемой модели определим:

1. Относительные изменения интервала $\tau_{o,i+m}$ в зависимости от длительности работы (числа предстоящих плановых ремонтов m).
2. Изменение числа отказов объекта по мере увеличения длительности работы.

Как следует из рис.5, при $tg\alpha \geq \tau_p^{-1}$:

$$\tau_{o,i+1} = \tau_p - \frac{1}{tg\gamma}; \quad \text{где } tg\gamma = tg\alpha + tg\beta. \quad (15)$$

Далее
$$\tau_{o,i+2} = \tau_p - \frac{1 - Iz_{\beta}(t_{p,i+1})}{tg\gamma}; \quad \text{где } Iz_{\beta}(t_{p,i+1}) = \tau_p tg\beta;$$

$$\tau_{o,i+3} = \tau_p - \frac{1 - Iz_{\beta}(t_{p,i+2})}{tg\gamma}; \quad \text{где } Iz_{\beta}(t_{p,i+2}) = 2\tau_p tg\beta;$$

По аналогии
$$\tau_{o,i+m} = \tau_p - \frac{1 - Iz_{\beta}(t_{p,i+m-1})}{tg\gamma}; \quad (16)$$

Где
$$Iz_{\beta}(t_{p,i+m-1}) = (m-1) \cdot \tau_p \cdot tg\beta \quad (17)$$

Отсюда
$$\tau_{o,i+m} = \frac{\tau_p(tg\alpha + m \cdot tg\beta) - 1}{tg\alpha + tg\beta} \quad (18)$$

Если предположить, что $tg\alpha = (a \cdot \tau_p)^{-1}$, а $tg\beta = (b \cdot \tau_p)^{-1}$, то относительное значение интервала $\tau_{o,i+m}$ будет равно:

$$\delta\tau_{o,i+m} = \frac{ma + b - ab}{a + b} = \frac{b(1-a)}{a+b} + \frac{ma}{a+b}; \quad \text{где } m=1,2,3 \quad (19)$$

Таким образом, начиная с момента $t_{p,1}$, с каждым последующим межремонтным сроком интервал времени τ_o возрастает на величину $a(a+b)$.

Количество отказов (K^*) на интервале $\tau_{o,i+m}$ может быть вычислено из условия (см. формулу (6)):

$$\frac{(Iz_{np} - 1) + (Iz_{np} - Iz_{\xi})(K^* - 1)}{tg\gamma} \leq \frac{\tau_p(tg\alpha - m \cdot tg\beta) - 1}{tg\gamma} \quad (20)$$

Преобразуя (20), получим:

$$K^* = Int \left[\frac{\left(\frac{1}{a} + \frac{m}{b} \right) - Iz_{\xi}}{Iz_{np} - Iz_{\xi}} \right] \quad (21)$$

Пример 2. При $I_{z_{np}}=1.1$; $I_{z_{\xi}}=0.9$; $a=0.8$; $b=5$ и $m=2,3$ и 4 ; K^* соответственно равно 3,4,5. Если повысить качество ремонта, т.е. устранить не только явные дефекты, но и часть неявных, при котором $I_{z_{\xi}}=0,7$, число аварийных отключений при $m=2,3$, и 4 будет соответственно равно 2, 2, и 3. Снижение числа аварийных отключений почти в два раза свидетельствует об эффективности этого направления.

Вышеизложенное свидетельствует о том, что применение стратегии регламентированных плановых ремонтов приводит к тому, что с ростом срока службы (старения) число аварийных отключений монотонно возрастает, что полностью соответствует известным интуитивным представлениям.

Рассмотрим теперь стратегию ремонта по техническому состоянию объекта. Эта стратегия предусматривает проведение планового ремонта при достижении ДП своего предельно допустимого значения. Как и ранее, в целях упрощения примем, что восстановление износа в межремонтном периоде отсутствует, а число контролируемых параметров равно одному. Графическая иллюстрация процесса изменения износа объекта и длительности межремонтного периода приведена на рис.6.

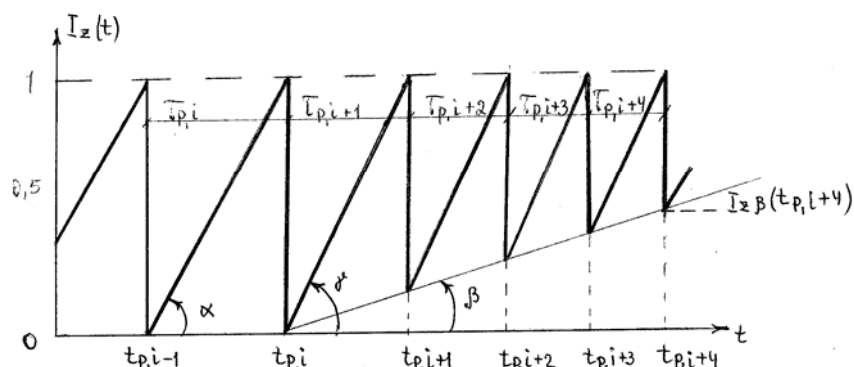


Рис.6 Модель восстановления износа по техническому состоянию объекта

Рис.6 наглядно иллюстрирует снижение длительности межремонтного периода с увеличением срока службы и остаточного износа. Определим величину $\tau_{o,i+m}$. В соответствии с рис.6:

$$\begin{aligned}
 \tau_{o,i} &= t_{p,i} - t_{p,i-1} = \frac{1}{\operatorname{tg}\alpha} = \tau_p ; \\
 \tau_{o,i+m} &= t_{p,i+m} - t_{p,i+m-1} ; \\
 A &= \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta} ; \\
 \tau_{o,i+1} &= \frac{1}{(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)} = \frac{A}{\operatorname{tg}\beta} \\
 \tau_{o,i+2} &= \frac{1 - I_{z_{\beta}}(t_{p,i+1})}{(\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta)} = \tau_{o,i+1}(1 - A) = \frac{A(1 - A)}{\operatorname{tg}\beta} \\
 \tau_{o,i+m} &= \frac{A(1 - A)^{m-1}}{\operatorname{tg}\beta} \quad (22)
 \end{aligned}$$

Относительное изменение межремонтного периода определим как отношение $\tau_{p,i+m}$ к τ_p .

$$\text{При этом} \quad \delta\tau_{o,i+m} = \frac{\operatorname{tg}\alpha A(1 - A)^m}{\operatorname{tg}\beta} . \quad (23)$$

Интервал времени до $(i+m)$ планового ремонта может быть вычислен по формуле

$$t_{p,i+m} = i\tau_p + \frac{A \sum_{v=1}^m (1-A)^{v-1}}{\operatorname{tg}\beta}; \quad (24)$$

Пример 3. Считая по-прежнему (см. пример 2): $a=0.8$; $b=5$ и $i=0$, определим срок службы до пятого планового ремонта:

$$t_{p,5} = \frac{A \sum_{v=1}^5 (1-A)^{v-1}}{\operatorname{tg}\beta};$$

где: $A = \operatorname{tg}\beta / (\operatorname{tg}\alpha + \operatorname{tg}\beta) = 0,13$;

$$t_{p,5} = \tau (0,65 + 0,57 + 0,49 + 0,43 + 0,37) = 2,51\tau_p.$$

Таким образом, при приведении восстановления по техническому состоянию пятый плановый ремонт будет $2,51\tau$ лет, что почти в два раза меньше, чем при проведении восстановления по регламентированным значениям межремонтного периода, равных τ_p . Слагаемые $t_{p,5}$ свидетельствуют о монотонном снижении длительности межремонтного периода.

Учет действительного момента возникновения остаточного износа, возможного отклонения закономерностей изменения износа от линейной зависимости, случайного характера скорости износа и ряда других отмеченных выше факторов, безусловно, уточняют количественные значения длительности межремонтных периодов. Однако, главная особенность рассматриваемого процесса восстановления износа – монотонное уменьшение интервалов межремонтного периода по мере увеличения срока службы при выполнении ремонтов по техническому состоянию – остается неизменной.

1. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. М.: Наука, 1986.
2. «Надежность электроэнергетических систем». Справочник под ред. Розанова Ю.Н., т2, М.: Энергоатомиздат, 2000, 565с.
3. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Рафиева Т.К. Количественная оценка показателей индивидуальной надежности и эффективности работы энергоблоков ГРЭС. Проблемы энергетики № 3, 2005г.

ENERJIBLOKUN QURĞULARININ VƏ AVADANLIQLARININ UZUNÖMÜRLÜK MODELƏRİ.

FƏRHADZADƏ E.M., MURADƏLİYEV A.Z., RƏFİYEVƏ T.K.

Plan təmirlərinin əsas mövcud strategiyaları olan rəqlamentli və texniki vəziyyət üzrə olan təmirlərə baxılır. Göstərilmişdir ki, enerjiblokların rəqlament strategiyası zamanı, xidmət müddətinin artırılması zamanı, imtinaların sayı monoton artacaq, ancaq texniki vəziyyət üzrə təmir zamanı, plan təmirlər arası interval monoton azalır.

MODELS OF DURABILITY OF EQUIPMENT AND DEVICES INSTALLATIONS POWER BLOCK

FARHADZADEH E.M., MURADALIYEV A.Z., RAFIYEVA T.K.

The basic existing strategy of scheduled repairs - regulated repair and repair on a technical condition are considered. It is shown, that at increase of service life at regulated strategy the number of refusals power blocks will monotonously grow, and at repair on a technical condition an interval between scheduled repairs monotonously decreases.