© «Вестник ИГЭУ» Вып. 2 2007 г.

УДК 621.039.58

К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕСУРСА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

СЕМЕНОВ В.К., д-р техн. наук, ЩЕБНЕВ В.С., канд. техн. наук,
ДЕРИЙ В.П., СТЕПАНОВ В.Ф., инженеры

На основании уравнения Фокера-Планка и регрессионного анализа результатов наблюдений за состоянием трубчатки парогенераторов предложен метод прогнозирования числа дефектов. Метод позволяет определить не только среднее число дефектов, но и их флуктуации.

Ключевые слова: теплоэнергетическое оборудование, коррозия, механические повреждения, математическая модель прогнозирования старения оборудования.

HEAT ENGINEERING EQUIPMENT OF HEAT AND ATOMIC POWER PLANTS LIFE TIME FORCASTING

V.K. SEMEONOV, Ph.D., V.S. SHCHEBNEV, Ph.D., V.P. DERIY, engineer, V.F. STEPANOV, engineer

This paper is devoted to the method of fault number forecasting, which is based on Focker-Plank's equation and regression observation analysis of steam generator pipe heater condition. The method allows to determine not only the average fault number but their fluctuation as well.

Key words: heat engineering equipment, corrosion, mechanical damages, equipment age hardening forecasting mathematical model.

Ресурс теплоэнергетического оборудования электрических станций определяется количеством дефектов, накапливающихся в нем в ходе эксплуатации. В свете нашего рассмотрения все дефекты разделим на крупные и мелкие. Крупные (внезапные) повреждения оборудования происходят чрезвычайно редко и плохо предсказуемы. Накопление мелких дефектов определяет процесс старения оборудования и, значит, его ресурс. Задача прогноза ресурса оборудования, обусловленного его старением, должна заключаться в определении времени достижения числом дефектов некоторого критического значения [1]. По наступлению названного момента времени устройство должно либо сниматься с эксплуатации, либо подвергаться капитальному ремонту. Старение оборудования определяется целым комплексом внешних условий (тепловым и динамическим режимом работы аппарата, наличием внешних механических воздействий, коррозией и пр.), многие из которых являются неконтролируемыми. В сложившейся ситуации на процесс старения следует смотреть как на стохастический и исходить из вероятностных представлений.

Состояние системы (аппарата) будем характеризовать числом накопившихся в ней дефектов N, которые во времени изменяются непрерывным образом. При формальном (математическом) подходе в качестве дефектов могут выступать коррозионные отложения на трубчатке теплообменных аппаратов, выход из строя отдельных теплообменных трубок и т.п. Причем, если интервал времени мал, то и изменение состояния системы тоже мало, т.е. за малое время наиболее вероятны переходы, в результате которых число накопившихся дефектов N изменяется незначительно, а большие изменения числа N маловероятны. В таких условиях эволюцию системы можно рассматривать как непрерывный стохастический процесс марковского типа [2]. Это означает, что вероятность перехода системы из одного состояния (начального) в другое (конечное) зависит только от начального состояния и не зависит от состояний, которые предшествовали начальному. Последнее предположение является весьма общим и, хотя вначале не может быть доказано, получает обоснование в дальнейшем. Так, будет показано, что уравнения, описывающие кинетику накопления дефектов на детерминированном уровне, являются по существу следствием сделанного допущения. Статистическое описание эволюции системы будем осуществлять заданием функции распределения вероятностей $\rho(N,t)$, причем $\rho(N,t)dN$ представляет собой вероятность того, что данная система имеет N дефектов, лежащих в интервале от N до N+dN.

Как известно, непрерывные марковские процессы подчиняются уравнению Фоккера-Планка [2], которое можно получить следующим образом. Обозначим через $\omega(N,q)dq$ вероятность изменения числа дефектов за единицу времени от величины N до N+q. Здесь q – число элементарных дефектов, возникающих в системе. Минимальное значение q равно 1. Кинетическое уравнение, описывающее эволюцию функции распределения, очевидно, будет иметь следующий вид:

$$\frac{\partial\rho(N,t)}{\partial t}=\int_0^\infty \rho(N-q,t)\omega(N-q,q)dq-$$
$$-\rho(N,t)\int_0^\infty \omega(N,q)dq. \qquad (1)$$

Здесь ради общности записи кинетического уравнения интегрирование ведется по возможному числу дефектов, возникающих в системе. В действительности пределы интегрирования конечны, так как переходная вероятность $\omega(N,q)$ быстро убывает с увеличением q и основную роль в интегралах играют значения q, малые по сравнению с N. В соответствии со сказанным, подынтегральную функцию в первом интеграле разложим в ряд Тейлора, ограничиваясь квадратичным членом разложения

$$\rho(N-q,t)\omega(N-q,q)\approx\rho(N,t)\omega(N,q)-$$
$$q\frac{\partial}{\partial N}[\rho(N,t)\omega(N,q)]+\frac{q^2}{2}\frac{\partial^2}{\partial N^2}[\rho(N,t)\omega(N,q)]. \qquad (2)$$

Подставляя разложение (2) в кинетическое уравнение (1), получим

$$\frac{\partial\rho(N,t)}{\partial t}=-\frac{q}{\partial N}[A(N)\rho(N,t)]+\frac{\partial^2}{\partial N^2}[B(N)\rho(N,t)], \qquad (3)$$

где

$$A(N)=\int_0^\infty q\omega(N,q)dq;$$
$$B(N)=\frac{1}{2}\int_0^\infty q^2\omega(N,q)dq. \qquad (4)$$

Кинетические коэффициенты A(N) и B(N) соответственно представляют собой среднее и среднеквадратичное изменение числа дефектов за единицу времени. Полученное из исходного интегро-дифференциального уравнения дифференциальное уравнение (3) и есть искомое уравнение Фокера-Планка для непрерывного марковского процесса. По внешнему виду это уравнение похоже на уравнение диффузии, в котором первое слагаемое описывает «систематический» поток, а второе – «диффузионный».

Коэффициент (A(N) и B(N) определяются вероятностью перехода $\omega(N,q)$, которая, в свою очередь, зависит от конкретного механизма появления дефектов (коррозия, механические повреждения, радиационные дефекты и пр.). Эта вероятность определяет средний поток дефектов в системе. В самом деле, вероятность появления двух дефектов q за время dt равна $[q\omega(N,q)dt]^2$. Она представляет собой величину второго порядка малости по dt, и ею можно пренебречь. Тем более можно пренебречь вероятностями появления трех и большего числа дефектов за время dt. Таким образом, среднее число дефектов, появляющихся в системе в единицу времени, будет равно

$$1\cdot\int_0^\infty q\omega(N,q)dq+0\cdot[1-\int_0^\infty q\omega(N,q)dq]=$$
$$=\int_0^\infty q\omega(N,q)dq. \qquad (5)$$

Вычисление или экспериментальное определение коэффициентов A(N) и B(N) должны быть проведены для каждого конкретного механизма рождения дефектов.

Как правило, зависимость $\omega(N)$ нелинейна, поэтому решение уравнения Фоккера-Планка можно найти только численными методами при помощи вычислительной техники. Между тем для практики часто достаточно знать, как ведут себя средние числа дефектов и их флуктуации. Для знания этих величин не требуется определения явного вида функции распределения. Сначала найдем уравнение для среднего числа дефектов. С этой целью умножим левую и правую части уравнения (3) на N и проинтегрируем по всевозможным значениям числа дефектов от N_0 до ∞. Имея в виду, что при $N = N_0$ и $N = \infty$ функция распределения $\rho(N,t)=0$, после несложных преобразований получим

$$\left(\frac{d<N>}{dt}\right)_{N_0}=(<A(N)>). \qquad (6)$$

Индекс N_0 означает, что усреднение ведется при фиксированном значении числа начальных дефектов. Под начальным числом дефектов понимается то число дефектов, которое система имела до ввода ее в эксплуатацию. Усредняя по числу начальных дефектов, получим уравнение

$$\frac{d<N>}{dt}=<A(N)>. \qquad (7)$$

Уравнение (7) имеет очевидный физический смысл: скорость изменения физического числа дефектов в системе определяется средним потоком дефектов. Однако для того, чтобы им воспользоваться, нужно перейти от среднего потока к потоку от среднего числа дефектов. Для этого разложим A(N) в ряд Тейлора вблизи $\langle N\rangle$:

$$A(N)»A(<N>)+\frac{1}{2}\frac{dA(<N>)}{dN}(N-бNc)+$$
$$\frac{1}{2}\frac{d^2A(<N>)}{dN^2}(N-<N>)^2. \qquad (8)$$

Усредняя по N, получим

$$A(N)\approx A(<N>)+\frac{1}{2}\frac{d^2A(<N>)}{dN^2}\Delta. \qquad (9)$$

При малой дисперсии распределения $\Delta=<(N-\langle N>)^2\rangle$ вторым слагаемым можно пренебречь:

$$\frac{d<N>}{dt}\approx A(<N>). \qquad (10)$$

На детерминированном уровне описания именно это уравнение должно лежать в основе всех теорий накопления тех или иных дефектов в системе. Заметим, что в случае линейной зависимости A(N) это уравнение становится точным.

Выведем теперь уравнение для дисперсии распределения:

$$\Delta = <(N - \langle N \rangle)^2\rangle = <N^2> - <N>^2. \qquad (11)$$

Из уравнения (7) имеем

$$\frac{d<N>^2}{dt} = 2<N>A(N). \qquad (12)$$

Умножая все члены уравнения (3) на N^2 и интегрируя по N, с учетом (11) и (12) получим

$$\frac{d\Delta}{dt} = 2\left[<NA(N)> - <N><A(N)>\right] + +2<B(N)>. \qquad (13)$$

Раскладывая NA(N) в ряд Тейлора и усредняя по N, найдем

$$<NA(N)> = <N>A<N> + +\frac{1}{2}\frac{d^2}{dN^2}[NA(N)]_{N=<N>}\Delta. \qquad (14)$$

С учетом (9) и (14) уравнение для дисперсии распределения запишется в виде

$$\frac{d\Delta}{dt} = 2\left(\frac{dA}{dN}\right)_{N=<N>}\Delta + 2B(<N>). \qquad (15)$$

Если A(<N>) B(<N>) явно от времени не зависят (или зависят одинаковым образом), то вместо времени t можно ввести новую переменную <N>, разделив уравнение (15) на уравнение (10):

$$\frac{d\Delta}{d<N>} = \Delta\frac{d\Delta}{d<N>}\left[\ln A^2(<N>)\right] + 2\frac{B(<N>)}{A(<N>)}. \qquad (16)$$

Полученное уравнение является линейным и интегрируется в квадратурах

$$\Delta = \frac{A^2(<N>)}{A^2(<N_0>)} \times \left[\Delta_0 + 2A^2(<N_0>)\int_{<N_0>}^{<N>}\frac{B(<N>)}{A^3(<N>)}d<N>\right]. \qquad (17)$$

Аналогичным образом можно найти уравнения для последующих моментов распределения.

Итак, на основании уравнений (10) и (17) находим среднее число дефектов и их флуктуацию $\sqrt{\Delta}$:

$$N(t) = <N(t)> \pm\sqrt{\Delta(t)}. \qquad (18)$$

Приравняв N(t) к предельно допустимому числу дефектов $N_{пр}$, определяем момент снятия аппарата с эксплуатации за счет старения.

Основными макропроцессами деградации теплоэнергетического оборудования станций являются различные виды коррозии, травления и модификации поверхностей, радиационное охрупчивание, образование трещин, потеря твердыми телами первоначальных физических свойств и пр. Ответственными за эти макропроцессы являются соответствующие им микропроцессы: физико-химические процессы на поверхности металлов (гетерогенный катализ, диффузия, адсорбция), изменение структуры материалов под действием тепловых и динамических нагрузок, радиационно-химические процессы и пр. При теоретическом анализе старения каждого конкретного аппарата должен анализироваться тот конкретный механизм, который несет ответственность за данный вид деградации.

Многие, различные по своей природе, процессы деградации, протекающие на поверхности, имеют одну общую закономерность: они обусловлены наличием свободных мест-зародышей или центров активации. Используя это общее свойство поверхностных процессов, можно предложить для них некую формальную (математическую) модель. Будем предполагать, что среднее число занятых на поверхности мест <N > (накопленных дефектов) пропорционально числу свободных мест $\lambda(t)(1-<N>)$. Считая процесс накопления дефектов непрерывным во времени, имеем уравнения баланса дефектов

$$<N(t+dt)> = <N(t)> + \lambda(t)(1-<N>)dt, \qquad (19)$$

где <N> – нормированное на единицу среднее число занятых мест; $\lambda(t)$ – коэффициент пропорциональности, равный вероятности занятия одного свободного места одним дефектом за единицу времени.

Раскладывая левую часть уравнения (19) в ряд Тейлора и ограничиваясь линейным членом разложения, получим

$$\frac{d<N>}{dt} = \lambda(t)(1-<N>). \qquad (20)$$

Таким образом, зависимость числа дефектов от времени определяется экспоненциальным законом

$$<N(t)> = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \qquad (21)$$

Зависимость $\lambda(t)$ можно представить в виде ряда

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \alpha t + \beta t^2 + \ldots \qquad (22)$$

Вначале эксплуатации для малых времен доминирующую роль будет играть первый член разложения, т.е. вероятность рождения дефектов от возраста аппарата зависеть не будет и закон распределения дефектов (21) будет чисто экспоненциальным. С течением времени аппарат стареет, в нем накапливается усталость, и вероятность λ будет зависеть от возраста аппарата. После того как вопрос о скорости рождения дефектов решен, можно определить кинетические коэффициенты уравнения Фоккера-Планка:

$$A(\langle N \rangle) = \lambda(t)(1 - \langle N \rangle);$$
$$B(\langle N \rangle) = \frac{1}{2}\lambda(t)(1 - \langle N \rangle). \qquad (23)$$

Подставляя (23) в уравнение (17), получим выражение для дисперсии распределения $(\Delta_0 = 0)$

$$\frac{\Delta}{N_p} = (1 - \langle N \rangle)^2 \int_0^{\langle N \rangle} \frac{d\langle N \rangle}{(1 - \langle N \rangle)^2}, \qquad (24)$$

которое после вычисления интеграла приводится к виду

$$\frac{\Delta}{N_p} = \langle N \rangle (1 - \langle N \rangle). \qquad (25)$$

Максимум дисперсии имеет место при <N> = $1/2N_p$, а дисперсия в максимуме $\Delta_m = 0{,}25N_p$. Здесь N_p – начальное число «свободных мест» в системе. График зависимости дисперсии распределения от <N> представлен на рис. 1.

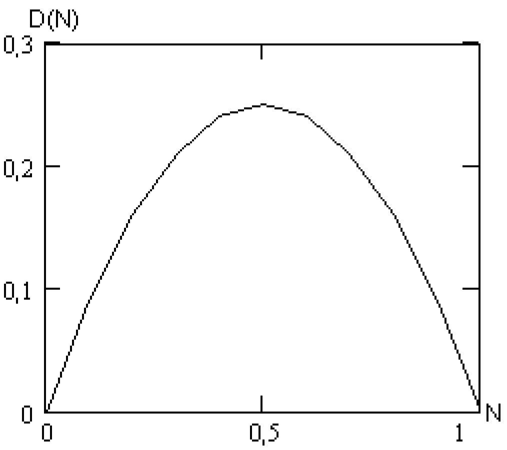

Рис. 1. График зависимости дисперсии распределения Δ / N_p от <N>

Для примера применения предложенной выше математической модели приведем прогноз числа заглушенных теплообменных трубок ПГ-4 3-го блока НВАЭС с ВВЭР-440. Здесь в качестве дефекта выступает поврежденная трубка. Обработка экспериментальной зависимости методом регрессии представлена на рис. 2.

Проведенный анализ с наименьшей квадратичной погрешностью дает следующие значения коэффициентов идентификации:

$\lambda_0 = -2{,}54 \cdot 10^{-3} 1/\text{год};$

$\alpha = 1{,}27 \cdot 10^{-6} 1/\text{год}^2;$

$\beta = 8{,}6 \cdot 10^{-6} 1/\text{год}^3.$

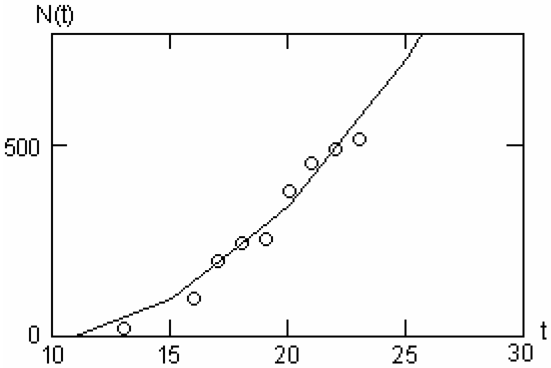

Рис. 2. Зависимость числа заглушенных трубок от времени

Согласно этим данным, число заглушенных трубок составит 830 шт. через 26 лет от начала эксплуатации при относительной погрешности 0,032.

Заключение

Предложенная математическая модель прогнозирования старения теплоэнергетического оборудования электрических станций, наряду со средним числом дефектов, позволяет рассчитать и их флуктуации.

Модель апробирована на примере прогноза числа заглушенных теплообменных труб парогенераторов блока №3 НВАЭС с ВВЭР-440.

Список литературы

1. **Острейковский В.А.** Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994.

2. **Баруча-Рид А.Т.** Элементы теории марковских процессов и их приложения. – М.: Наука, 1969.

Семенов Владимир Константинович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры атомных электростанций,
телефон (4932) 26-99-18
e-mail: npp@aes.ispu.ru

Щебнев Владимир Сергеевич,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой атомных электростанций,
e-mail: npp@aes.ispu.ru

Дерий Владимир Петрович,
ОАО «Атомтехэнерго» (г. Мытищи),
зам. главного инженера,
телефон (4932) 26-99-18,
e-mail: npp@aes.ispu.ru

Степанов Владимир Фёдорович,
ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
начальник отдела разработки АОС кафедры атомных электростанций,
телефон (4932) 26-99-14,
e-mail: step@aes.ispu.ru