ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 517.98:519.2:621.039
doi:10.21685/2307-4205-2022-3-1

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ В РАЗВИТИИ КОНЦЕПЦИИ УРОВНЕЙ ОПИСАНИЯ СТАРЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

В. А. Острейковский[1], А. В. Сорочкин[2]

[1, 2] Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
[1] academicostr@yandex.ru, [2] sorochkin_av@surgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проблема старения в оценке и анализе долговечности любых, как живых, так и технических, систем всегда была и остается животрепещущей, и медицина и техника в любом обозримом прошлом пытались найти пути и способы ее решения. Однако серьезных успехов получить пока не удалось. Самым главным в решении проблемы долговечности структурно и функционально сложных технических систем (СФСТС) всегда считалось найти теоретические и экспериментальные методы борьбы со старением. Так, для СФСТС в XX в. успешно зарекомендовали себя методы теории длительной прочности. Усилиями таких выдающихся ученых нашей страны, как А. С. Проников, В. С. Иванова, К. В. Фролов, Н. Л. Махутов, В. Н. Чувельдиев и других, были достигнуты большие успехи в развитии подходов к описанию различных уровней старения конструкционных материалов СФСТС. Достижения в этой области получили реализацию в большом количестве теоретических методик и государственных стандартов. Однако количество дефектов и отказов в СФСТС на различных этапах их жизненного цикла не уменьшается. Это часто происходит даже в таких критически важных системах, как космические, авиационные, транспортные, нефтегазовые магистральные трубопроводы. Но были и приятные неожиданности: развитие динамики и термодинамики в XIX и XX вв. в трудах Р. Ю. Клаузиуса, Д. У. Гиббса, Л. Больцмана, А. М. Ляпунова, В. И. Вернадского, А. Н. Колмогорова, И. Р. Пригожина. Были предложены новые идеи, позволяющие существенно повысить достоверность расчета показателей долговечности (ресурса, срока службы и их остаточных значений) СФСТС. В этом плане нельзя не обратить внимание на то, что в нашей стране регулярно (с периодом приблизительно 10–15 лет) выпускаются новые государственные стандарты по надежности сложных систем. Целью данной статьи являются решение задач комплексной оценки и анализ старения в теории долговечности конструкционных материалов элементов оборудования СФСТС с применением методов и моделей современной статистической теории надежности. *Материалы и методы*. Теория операторов функционального анализа и статистическая теория надежности. *Результаты и выводы.* На основе современных достижений статистических методов теории надежности были предложены новые подходы к описанию уровней старения конструкционных элементов оборудования СФСТС. В итоге разработан комплекс методик оценки и анализа влияния старения на показатели долговечности, приведенный в виде развернутой блок-схемы.

Ключевые слова: статистическая теория надежности, математическое моделирование, необратимость, долговечность, ресурс

Для цитирования: Острейковский В. А., Сорочкин А. В. Модели и методы статистической теории надежности в развитие концепции уровней описания старения оборудования сложных систем с длительными сроками активного существования // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 5–15. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-1

© Острейковский В. А., Сорочкин А. В., 2022. Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License / This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

MODELS AND METHODS OF STATISTICAL RELIABILITY THEORY IN THE DEVELOPMENT OF LEVELS OF DESCRIPTION CONCEPT FOR EQUIPMENT AGING OF COMPLEX SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE

V.A. Ostreykovskiy[1], A.V. Sorochkin[2]

[1, 2] Surgut State University, Surgut, Russia
[1] academicostr@yandex.ru, [2] sorochkin_av@surgu.ru

Abstract. *Background*. The problem of aging in assessing and analyzing the durability of any living and technical systems has always been and remains a burning one, and medicine and technology in any foreseeable past have tried to find ways and means of solving it. However, no significant progress has yet been made. The most important thing in solving the problem of durability of structurally and functionally complex technical systems (SFTSS) has always been considered to find theoretical and experimental methods for combating aging. So, for SFSTS in the XX century, the methods of the theory of long-term strength have successfully proven themselves. Through the efforts of such outstanding scientists of our country as A. S. Pronikov, V. S. Ivanova, K. V. Frolov, N. L. Makhutov, V.N. Chuveldiev and others, great success has been achieved in the development of approaches to the description of various levels of aging of SFSTS structural materials. Achievements in this area have been implemented in a large number of theoretical methods and state standards. However, the number of defects and failures in SFSTS at various stages of their life cycle continues to be high. This often happens even in such critical systems as space, aviation, transport, oil and gas main pipelines. But there were also pleasant surprises: the development of dynamics and thermodynamics in the 19th and 20th centuries in the works of R. Yu. Clausius, D. W. Gibbs, L. Boltzmann, A. M. Lyapunova, V. I. Vernadsky, A. N. Kolmogorova, I.R. Prigozhin, new ideas were proposed to significantly increase the reliability of calculating the durability indicators (resource, service life and their residual values) of the SFSTS. In this regard, it is impossible not to pay attention to the fact that in our country regularly (with a period of approximately 10–15 years) new state standards for the reliability of complex systems are issued. The purpose of this article is to solve the problems of a comprehensive assessment and analysis of aging in the theory of durability of structural materials of SFSTS equipment elements using methods and models of modern statistical theory of reliability. *Materials and methods.* Functional Analysis Operator Theory and Statistical Reliability Theory. *Results and conclusions*. On the basis of modern achievements of statistical methods of the theory of reliability, moreover, new approaches were proposed to describe the levels of aging of structural elements of SFSTS equipment. As a result, a set of methods for assessing and analyzing the effect of aging on durability indicators has been developed, presented in the form of a detailed block diagram.

Keywords: statistical theory of reliability, mathematical modeling, irreversibility, durability, resource

For citation: Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V. Models and methods of statistical reliability theory in the development of levels of description concept for equipment aging of complex systems with long periods of active existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):5–15. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-1

Введение

За последние 50 лет XX в. и начало XXI в. в оценке свойств долговечности появились новые подходы, позволяющие существенно повысить достоверность статистических оценок в теории надежности[1]. К ним относятся следующие разделы:

1. Математические модели безотказности по значениям интенсивностей дефектов и отказов как функций времени.
2. Математические модели «нагрузка–несущая способность».
3. Модели долговечности класса «физики отказов».
4. Математические модели оценки индивидуального прогнозирования остаточного ресурса элементов оборудования сложных систем.
5. Комплексные оценки и анализ показателей долговечности оборудования СФСС с применением современных моделей статистической теории надежности.

[1] ГОСТ 27.002–2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения ; ГОСТ Р.56626–2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Требования надежности и безотказности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (малочисленного) изготовления с длительными сроками активного существования.

Закон Н. М. Седякина в статистической формулировке долговечности сложных систем

Памятная историческая дата – 1 апреля 1965 г., когда на научном семинаре в Ленинградской военно-воздушной инженерной академия имени А. Ф. Можайского был зачитан доклад Н. М. Седякина «Об одном физическом принципе теории надежности и его применениях». Изложеные в докладе принципы Академией наук СССР были признаны как закон. Н. М. Седякин доказал следующее утверждение [1]: в известном выражении для вероятности безотказной работы объекта

$$P_t = \exp\left(-\int_0^t \lambda(z)\,dz\right) \tag{1}$$

правую часть можно принять в качестве меры одного из основных показателей долговечности ресурса

$$r_t = \int_0^t \lambda(z)\,dz, \tag{2}$$

где $\lambda(t)$ – функция интенсивности отказов объекта за время t.

Естественно, что при времени $t = 0$ выработанный ресурс $r(t) = 0$. А если объект при $t \to \infty$ не имеет отказов и функция $\lambda(z)$ есть неубывающая функция, то и значение ресурса $z(t) \to \infty$.

В этом случае, действительно, объект работает конечное время $\tau^x = \tau$ и его ресурс составляет

$$r(\tau) = \int_0^\tau \lambda(z)\,dz, \tag{3}$$

где τ – время (наработка) безотказной работы объекта.

В предложенном Н. М. Седякиным понятии ресурса закон надежности формулируется следующим образом: «Надежность объекта зависит от значения выработанного им ресурса в прошлом и не зависит от того, как этот ресурс вырабатывается», а именно:

$$p\left(t/r\right) = p^{(1)}\left(t/t_1\right) = p^{(2)}\left(t/t_2\right), \tag{4}$$

где интервалы времени t_1 и t_2 должны удовлетворять интервальному соотношению

$$r(\tau) = \int_0^{t_1} \lambda(z,\varepsilon_1)\,dz = \int_0^{t_2} \lambda(z,\varepsilon_2)\,dz. \tag{5}$$

При этом индексы (1) и (2) соответствуют: случай (1) – объект работал в прошлом времени t_1 в условиях ε_1, а во втором (2) – время t_2 и условиях ε_2.

И это очень важно и понадобится нам для других случаев: под условиями работы объекта будем понимать степень его надежности

$$\varepsilon = S/S_0,$$

где S и S_0 – действующая и расчетная номинальные нагрузки объекта соответственно [1, 2].

Математические модели «нагрузка – несущая способность» в теории долговечности систем

Сущность модели: проводится анализ соотношения двух векторов случайных процессов:

а) $S(t)$ – нагрузки, действующей на объект в виде механических, радиационных, химических, тепловых и других нагрузок, вызывающих обратимые и необратимые процессы в конструкционных материалах структуры оборудования;

б) $R(t)$ – старения (коррозия, эрозия, износ и т.д). Комплексы процессов $R(t)$ получили название несущей способности объекта.

Соответственно, если функция работоспособности объекта

$$\Psi(R,S,t)=R(t)-s(t)\geq 0, \tag{7}$$

будет удовлетворять (7), то такая модель именуются «нагрузка – несущая способность» (ННС). Если условие (7) не выполняется, то вероятность отказа для модели ННС равна

$$q(t)=P\left\{\left[R(t),S(t)\right]\in W\right\}=\iint\limits_{W} f_{R,S}(r,s)\,dr(t)\,ds(t), \tag{8}$$

где $f_{R,S}(r,s)$ – совместная плотность распределения факторов, определяющих нагрузку и несущую способность объекта; W – область интегрирования с границами

$$W=\begin{cases} 0\leq r(t)<\infty, \\ 0\leq r(t)\leq s(t)<\infty. \end{cases} \tag{9}$$

В работах [1–3] детально исследованы методы оценки показателей безотказности и долговечности для различных случаев соотношения нагрузки и несущей способности объектов оборудования сложных систем. Оказалось, что так как у реальных объектов сложных систем (СС) размерность векторов R и S большая и коррелируемые связи между составляющими этих векторов различны, то непосредственное получение достоверных показателей долговечности из выражения (9) напрямую затруднительно из-за информационных и вычислительных трудностей. Поэтому предложена следующая модель ННС: «нагрузка – стационарный случайный процесс» с параметрами

$$m_s(t)=m_{s_0}=\text{const} \text{ и } \sigma_S(t)=\sigma_{s_0}=\text{const},$$

а несущая способность – нестационарный случайный процесс с монотонно убывающим математическим ожиданием

$$R(t)=R_0\,\varphi(t), \tag{10}$$

где R_0 – случайная величина; $\varphi(t)$ – неслучайная функция усталости объекта.

Фактически вид функции $\varphi(t)$ и значения математического ожидания $m_R(t)$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_{R^{(t)}}$ определяют время безотказной работы объекта при известных значениях m_{s_0} и σ_{s_0}. Естественно, что модель $\varphi(t)$ зависит от характера процессов старения конструкционных материалов элементов оборудования объектов СС под воздействием эксплуатационных нагрузок. Именно поэтому очень важно иметь значения параметров функций $\varphi(t)$, что позволяет с большой достоверностью прогнозировать ресурс оборудования СС.

Как правило считается, что функция усталости является монотонно убывающей функцией, определенной при всех $t\geq 0$ и $\varphi(t=0)=1$; $\lim\limits_{t\to\infty}\varphi(t)=0$. Также этим условиям удовлетворяет, в частности, непрерывно убывающая показательная функция

$$\varphi(t)=\exp(-Rt), \text{ при } t\geq 0, \tag{11}$$

где коэффициент R зависит от характера процессов старения конструкционных материалов объекта.

В работах [4, 5] показано, что при независимых между собой R и S выражение (8) имеет вид

$$q(t)=\iint_W f_R(r)\,f_S(s)\,dr\,ds=\int\limits_0^{\infty} f_R(r)\left[\int\limits_{\varphi(t)r}^{\infty} f_S(s)\,ds\right]dr, \tag{12}$$

при

$$W:\begin{cases} 0<r<\infty, \\ r\varphi(t)\leq S<\infty, \end{cases} \tag{13}$$

где $f_R(r)$ и $f_S(s)$ – плотность распределения несущей способности и нагрузки соответственно.

Теперь на основе общих дальнейших аналитических преобразований можно в общем виде сформулировать методику оценки ресурса объекта с помощью модели надежности НСС:

1) расчет характеристики несущей способности объекта методами статистической динамики, теории упругости и механики разрушения твердых тел;

2) анализ внешних и внутренних нагрузок, действующих на объекты оборудования СС;

3) расчет статистических характеристик несущей способности конструкционных материалов объекта и эксплуатационных нагрузок;

4) расчет характеристик показателей долговечности объекта по выбранной модели ННС;

5) рекомендации допустимых значений долговечности в соответствии с требованиями безотказности и эффективности системы;

6) сравнение рассчитанных значений показателей долговечности с требованиями по остаточным ресурсам и срокам службы [3, 4].

Математические модели долговечности класса «физики отказов»

Научное направление в теории надежности под названием «физика отказов» исторически получило широкое распространение ввиду чрезвычайно важного понимания зависимости интенсивности старения от изменения физико-химических процессов в конструкционных материалах объектов оборудования под действием эксплуатационных факторов. Это имеет особое значение для уникальных и малосерийных систем. Именно поэтому исследования закономерностей свойств и состояний конструкционных материалов изучаются на субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом уровнях, так как процессы диффузии, химические реакции, распад твердых тел в конце концов приводят к износу, тепловому старению, усталости, износу и ползучести и другим дефектам и отказам оборудования сложных систем.

В существующей литературе по физике отказов [1–3] приводится много примеров аналитических зависимостей влияния физико-химических процессов на время до разрушения конструкционных материалов оборудования СС[1]. Приведем несколько наиболее распространенных методов. Первым является использование формулы Журкова.

Использование формулы Журкова

$$t_p = t_{p_0} \exp\left(\frac{E_a}{RT^0}\right) = t_{p_0} \exp\left(\frac{U_0 - \sigma_m \nabla}{RT^0}\right), \tag{14}$$

где t_p – время от момента приложения механической нагрузки до разрушения материала образца при растяжении; t_{p_0} – постоянная величина, равная приблизительно периоду тепловых колебаний атомов в твердом теле, равная 10^{-12}; E_a – энергия активации процесса разрушения; U_0 – энергия, близкая к энергии сублимации материала; σ_m – напряжение, приложенное к образцу; ∇ – активационный объем материала; $R = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К – постоянная Больцмана; T^0 – абсолютная температура.

В работах [2, 3] доказано, что разрушение конструкционного материала элементов оборудования СС с точки зрения механики разрушения рассматривается как термоактивационный процесс, развивающийся в механически напряженном материале во времени с момента приложения к нему нагрузки, в том числе меньше критической. Причем скорость роста усталостной трещины есть некоторый функционал от коэффициента интенсивности напряженности (КИН):

$$\frac{dl}{dN} = f\left(k_{1\max}, k_{1\min}\right), \tag{15}$$

где $k_{1\max}, k_{1\min}$ – наибольшее и наименьшее значение КИН за цикл нагружения; $2l$ – длина трещины; N – число циклов нагружения.

[1] ГОСТ 27.002–2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения ; ГОСТ Р.56626–2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Требования надежности и безотказности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (малочисленного) изготовления с длительными сроками активного существования.

Наиболее полно экспериментально изучена зависимость скорости роста трещин $\frac{dl}{dN}, \frac{dl}{dt}$ и размах КЭН в форме модели формулы Пэриса, которая в простейшем виде имеет вид [1]

$$\frac{dl}{dN} = C\Delta K_1^n, \tag{16}$$

где C, n – постоянные конструкционного материала, а ΔK_1 – размах КИН.

В заключение данного раздела необходимо подчеркнуть две важные мысли:

а) физико-химические детерминированные и статистические закономерности должны быть тесно увязаны в единой динамической модели и дополнять друг друга, а не противопоставляться;

б) научное направление «физика отказов», связанное с физико-статистическими исследованиями уникальных СС, имеет первостепенное значение.

Математические модели оценки индивидуального прогнозирования остаточного ресурса элементов оборудования сложных систем

Для эффективного использования широкого класса сложных систем с длительными сроками активного существования чрезвычайно важным вопросом является знание значений остаточного ресурса элементов оборудования. Особое внимание в этой проблематике уделяется системам критически важных направлений [4–6]. Для подобных систем процесс прогнозирования остаточного ресурса состоит из следующих этапов:

- сбор и подготовка исходных статистических данных (ИСД);
- выбор и обоснование прогнозируемой функции (ПФ) объекта;
- обработка исходных и дополнительных данных (ДИД) для оценивания неизвестных параметров ПФ,
- собственно, вычисление прогнозных значений ресурса объекта в данный момент времени.

Выбор прогнозирующей функции

В работах [2, 3] приведена типовая схема прогнозирования следующего вида (рис. 1).

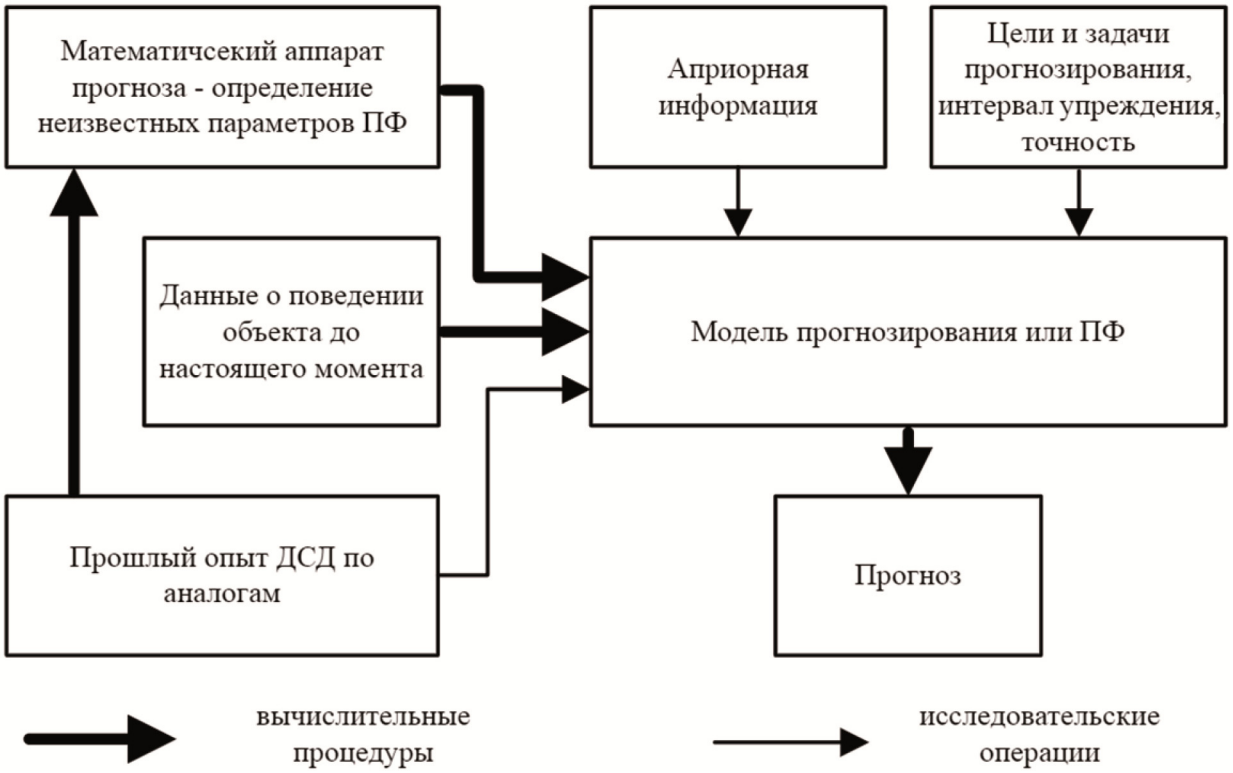

Рис. 1. Схема прогнозирования

ИСД представляют выборку $Y(t_1), Y(t_2), \ldots, Y(t_K)$, а дополнительные – $Y^j(t_1), Y^j(t_2), \ldots, Y^j(t_K)$. Таким образом, выбор ПФ является центральным пунктом индивидуального прогнозирования долговечности объекта. Основными факторами выбора ПФ являются:

- характер протекания анализируемого процесса $Y(t)$;
- вид функций тренда;
- степень изученности тренда (математического процесса);
- прошлый опыт, позволяющий определить класс функций для описания ПФ;
- наличие неопределенных систем, влияющих на поведение процесса $Y(t)$, связанных с неконтролируемыми внешними факторами;
- погрешности исследования и др.

Математические методы для индивидуального прогнозирования процессов в теории долговечности систем

Для моделей этого класса обычного используются следующие методы:

- метод линейной фильтрации;
- метод канонических разложений случайных функций $Y(t)$;
- фильтр Калмана;
- методы, основанные на экстраполяции аппроксимирующих зависимостей.

Метод линейной фильтрации

Этот метод основан на вычислении взвешенной суммы исходных наблюдений за период времени $T_н$.

При этом ИСД объекта

$$Y_{K+1} = \sum_{i=1}^{k} Y_i W_i, \tag{17}$$

где W_i – вес, приписываемый *i*-му наблюдению над объектом.

Если $W_i = \frac{1}{R}$ – используется метод скользящего среднего, а если $W_1 = a, W_2 = a(1-a), \ldots, W_R = a(1-a)^K$ – метод экспоненциального сглаживания.

При использовании авторегрессией схемы значения W_i оцениваются методом наименьших квадратов по ИСД на участке $(t_i, t_R) \in T_н$. Корректировка весов W_i производится на основе анализа ошибки прогноза при поступлении новых данных, которая оценивается по выражению

$$e_{R+1}^2 = (Y_{R+1} - Y_R)^2 = \min. \tag{18}$$

Метод канонических разложений случайной функции $Y(t)$ прогноза

Здесь функция $Y(t)$ представляется в виде

$$Y(t) = m(t) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \phi_n(t), \tag{19}$$

где $m(t)$ – математические ожидание $Y(t)$; A_n – некоррелированные случайные величины с нулевым математическим ожиданием; $\phi_n(t)$ – некоторые (случайные) функции.

И задача сводится к определению ϕ_n на участке $T_н$ и вычислению коэффициентов A_n канонического разложения той реализации, которую требуется прогнозировать.

Фильтр Калмана

Позволяет исследовать физический смысл внешних воздействий на изменение внутренних процессов $Y(t)$ объекта во времени в соответствии с моделью вида

$$\frac{dY}{dt} = F(t)Y(t) + G(t)U(t), \tag{20}$$

где $F(t)$ – характеризует динамические свойства Y; $G(t)$ – ограничения на входной сигнал; $U(t)$ – внешние воздействия.

При этом наблюдатель оценивает значения Y, который искажен помехой

$$Z(t) = H(t)Y(t) + v(t), \tag{21}$$

где $H(t)$ – учитывает связь между Y и Z, а $v(t)$ – помеха.

Методы, основанные на экстраполяции апроксимирующих зависимостей

В этих методах прогнозирование будущего $Y(t)$ осуществляется путем применения регрессионного анализа тренда $\eta(t) = \{Y'(t)\}$ методами наименьших квадратов на будущие моменты $Y(t + \Delta t)$.

Для случайных линейных оценок $\eta(t)$ как прогнозирующей функции коэффициентов

$$\eta(\bar{\alpha}, t) = \sum_{t=0}^{n} \alpha_i C_i \tag{22}$$

аналитически не представляет трудностей вычисление оценок α и дисперсии $D(Y)$ и получит точечный и интервальный прогноз. А для нелинейных случаев процесса $Y(t)$ задачи прогнозирования решаются численными методами на ЭВМ.

Практические трудности применения описанного метода имеют место, когда аналитический вид тренда неизвестен априори. Поэтому предварительно необходим этап по выбору наилучшего для прогноза вида тренда.

С этой целью обычно используются условное математическое ожидание

$$M_Y = \left\{ \frac{Y(t)}{Y_1, Y_2, \ldots, Y_N} \right\}$$

и дисперсия

$$\sigma_Y = \left\{ \frac{Y(t)}{Y_1, Y_2, \ldots, Y_N} \right\},$$

отображающие процесс изменения состояния объекта во времени. Для этой цели достаточно одной единственной реализации $Y(t)$ и его измерений в дискретные моменты времени $\{\tau_i\}$, $i = (1, N)$ в интервале наблюдения анализируемого процесса $T_н \in (t_1, t_N)$ с последующей экстраполяцией функции на будущие моменты времени $t_{N+1}, t_{N+2}, \ldots$

Естественно, что реализация приведенной процедуры прогнозирования процессов требует априорных знаний о предположенных структурных и статистических характеристиках исследуемых процессов.

Гипотетическая модель в общем виде такова

$$M_j \in M,\ j = 1, R,$$

$$M_j = \left\{ \Omega_j, W_v^j(t, b_v),\ v = 1, Z_j \right\}, \tag{23}$$

где Ω_j – оператор преобразования, учитывающий связи составляющих модели; $W_v^j(t, b_v)$ – составляющая модели, которая отображает одну частную сторону предполагаемого физического процесса; b_v – вектор параметров составляющей $W_v^j(t, b_v)$; Z_j – число составляющих, используемых для описания модели.

Структура модели, как правило, состоит из двух составляющих: полезной и вредной (помехой измерения). Обычно помехи отражаются процессами изменения технического состояния прогнозируемого объекта и мешающими факторами. Каждая из составляющих может иметь сложную структуру. Так, полезная составляющая обычно имеет до семи возможных элементов, из которых четыре характеризуют изменения во времени математического ожидания, дисперсии, асимметрии и эксцесса прогнозируемого процесса, и другие три – скачки, выбросы и случайно обратимые изменения прогнозируемого процесса. А помеха измерений содержит две составляющие: стационарный шум измерения и аномальные измерения. Часть этих вариантов можно сократить в результате предварительного анализа технического состояния прогнозируемого объекта [2, 3].

Практика использования описываемого метода свидетельствует о возможном сокращении числа вариантов до семи даже для таких сложных и высоко ответственных систем, как, например, ядерные энергетические установки [4–6]. В результате исследований сотрудников научных школ Обнинского института атомной энергетики и Сургутского государственного университета был теоретически обоснован ряд методов, которые приведены на рис. 2.

Рис. 2. Блок-схема комплексной оценки и анализа показателей долговечности оборудования структурно и функционально сложных систем с применением современных моделей и методов статистической теории надежности

Заключение

1. XX в. подарил нам хорошо развитую теорию надежности объектов [1–5] как совокупность свойств безотказности, долговечности, готовности и ремонтопригодности и их сохраняемости.

Свойства надежности, такие как безопасность, эффективность и качество, имеют одну важную особенность: их характерные показатели – суть функции времени комплексных свойств сложных систем.

После начальных этапов своего рождения, в начале XX в., теория надежности бурно развивается и далее – в первой половине XXI в. По следующим направлениям:

1) статистические исследования появления дефектов и отказов;
2) исследование моделей «нагрузка – несущая способность»;
3) разработка методов «физики отказов»;

4) разработка статистических методов прогнозирования состояния объекта на различных стадиях жизненного цикла;

5) исследование полученных в конце XX в. новых статистических моделей с учетом асимметрии внутреннего времени оборудования сложных систем.

2. Из приведенных выше научных направлений одним из первых было направление исследований надежности с помощью закона Н. М. Седякина (1965 г.), центральным постулатом которого было утверждение о соотношении будущего ресурса объектов в зависимости от выработанного в прошлом ресурса и его значения в будущем с учетом независимости того, как этот ресурс вырабатывался в прошлом.

3. Большая роль в статистических исследованиях надежности в модели «нагрузка – несущая способность», в которой оценивается будущий остаточный ресурс объекта на основе статистических оценок процессов старения конструкционных материалов элементов оборудования СФСС.

4. Понимание важности зависимости интенсивности старения от изменения физико-химических процессов в конструкционных материалах элементов оборудования СФСС под действием фактов внешней среды привело к необходимости комплексного изучения закономерностей свойств и состояний конструкционных материалов на трех уровнях: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом с учетом детерминированных и статистических закономерностей по формуле Журкова и Пэриса. Это способствовало развитию нового научного направления «физики отказов» сложных критически важных, высоко ответственных систем и комплексов, часто изготавливаемых малыми партиями, а иногда вообще уникальных.

5. В развитии п. 4 в статистической теории надежности получило научное направление под названием «математические методы и модели оценки индивидуального прогнозирования остаточного ресурса».

Основным содержанием этого направления является:

- сбор и подготовка исходных статистических данных об объекте;
- выбор прогнозирующей функции объекта;
- обработка исходных и дополнительных данных;
- разработка и исследование математических моделей индивидуального прогнозирования остаточного ресурса объектов;
- вычисление прогнозирующих значений индивидуального ресурса объекта;
- оценка полученных результатов индивидуального прогнозирования ресурса объекта.

6. Математические методы и модели индивидуального прогнозирования ресурса объектов СФСС:

- метод линейной фильтрации;
- метод канонических разложений случайной функции;
- фильтр Калмана;
- методы, основанные на экстраполяции аппроксимирующих зависимостей.

7. Разработка блок-схемы комплексной оценки анализа показателей долговечности оборудования СФСС с применением современных статистических методов теории надежности.

8. Недостатком представленных в статье подходов и моделей является отсутствие в них будущего научного раздела об учете асимметрии внутреннего времени в теории долговечности сложных систем.

9. Этот недостаток будет учтен с выходом в свет в 2022 г. монографии В. А. Острейковского «Фундаментальные основы феномена асимметрии внутреннего времени в теории долговечности СФСС с длительными сроками активного существования».

Список литературы

1. Седякин Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности и его применениях // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1966. Т. 3. С. 80–87.
2. Острейковский В. А. Теория надежности : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 2003. С. 463.
3. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования атомной станции (на примере энергоблоков Смоленской АЭС). М. : Инновационное машиностроение, 2017. 536 с.
4. Острейковский В. А. Строение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М. : Энергоатомиздат, 1994. 288 с.

5. Антонов А. В., Никулин М. С., Никулин А. М., Чепурко В. А. Теория надежности. Статистические модели : учеб. пособие. М. : Инфра-М, 2015. 576 с.
6. Острейковский В. А., Лысенкова С. А. Концепция современного подхода к уровням описания процессов старения структурно и функционально сложных критически важных систем с длительными сроками аквтиного существования // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 5–12.

References

1. Sedyakin N.M. On one physical principle of reliability theory and its applications. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*. 1966;3:80–87. (In Russ.)
2. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti: uchebnik dlya vuzov = Theory of reliability : textbook for universities*. Moscow: Vyssh. shk., 2003:463. (In Russ.)
3. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya atomnoy stantsii (na primere energoblokov Smolenskoy AES) = Resource and service life of nuclear power plant equipment (on the example of power units of the Smolensk NPP).* Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017:536. (In Russ.)
4. Ostreykovskiy V.A. *Stroenie i prognozirovanie resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy = Structure and forecasting of the resource of nuclear power plant equipment*. Moscow: Energoatomizdat, 1994:288. (In Russ.)
5. Antonov A.V., Nikulin M.S., Nikulin A.M., Chepurko V.A. *Teoriya nadezhnosti. Statisticheskie modeli: ucheb. posobie = Theory of reliability. Statistical models : textbook*. Moscow: Infra-M, 2015:576. (In Russ.)
6. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A. The concept of a modern approach to the levels of description of aging processes of structurally and functionally complex critical systems with long periods of aquatine existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):5–12. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Алексеевич Острейковский
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатики
и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, просп. Ленина, 1)
E-mail: academicostr@yandex.ru

Vladislav A. Ostreykovskiy
Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of information theory
and computer technology,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Андрей Викторович Сорочкин
аспирант,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, просп. Ленина, 1)
E-mail: sorochkin_av@surgu.ru

Andrey V. Sorochkin
Postgraduate student,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021
Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022
Принята к публикации/Accepted 15.02.2022