УДК 65.012.122

© 2017 г. **О.В. Абрамов**, д-р техн. наук
(Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток)

ПЛАНИРОВАНИЕ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ КОРРЕКЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

Рассматривается задача планирования эксплуатации технических устройств и систем. Предложены формальные постановки основных модификаций этой задачи и исследован один из возможных методов решения задачи оптимального планирования профилактических коррекций параметров неконтролируемых технических систем.

Ключевые слова: параметр, техническая система, случайный процесс, прогноз, область работоспособности, метод.

DOI: 10.22250/isu.2017.53.55-66

Введение

Одним из основных путей управления параметрической надежностью и эффективностью технических объектов является профилактическая коррекция их параметров. В процессе профилактик производится регулировка (настройка) параметров или замена элементов (блоков, узлов), параметры которых достигли значений, близких к границам области допустимых отклонений. Необходимо решить вопрос о выборе стратегии профилактик, т.е. определить моменты времени, в которые следует осуществлять коррекцию, и рассчитать наилучшие значения корректируемых параметров.

Задача оптимального планирования профилактик относится к важному для практики и перспективному научному направлению – теории эксплуатации. Задачами эксплуатации технических объектов являются организация и проведение различных мероприятий, обеспечивающих использование их по назначению, подготовку к использованию, поддержание исправного или работоспособного состояния и продление ресурса. В состав работ по техническому обслуживанию входят мероприятия, направленные не только на предупреждение отказов, но и на приведение технических объектов в работоспособное состояние после возникновения отказов. Естественно, что необходимость выполнения ремонтных работ во многом зависит от результатов профилактик. Поэтому в комплексе работ по техническому обслуживанию профилактики занимают исключительно важное место. Выполнение основной задачи технического обслуживания – сохранения заданного качества функционирования технического объекта – обеспечивается прежде всего, с помощью профилактических мероприятий.

Задача оптимальной организации профилактического обслуживания сложная и многоплановая. Наиболее исследованы здесь вопросы организации обслуживания и профилактик с учетом внезапных отказов (на основе статистики отказов). Значительно меньше результатов получено по оптимальному планированию профилактик с учетом постепенных изменений параметров и закономерностей процессов приближения к отказам. Проводимые в этом направлении исследования в зависимости от принятой модели процессов изменения параметров объекта можно разделить на две группы.

Первая группа включает подавляющее большинство известных работ. В их основе лежит допущение о том, что процессы изменения параметров относятся к классу марковских (или полумарковских). При этом искомая стратегия профилактик также оказывается марковской и чаще всего однородной [1, 2].

Гипотеза о марковских свойствах процессов дрейфа параметров во многих случаях позволяет значительно упростить поиск оптимальной стратегии технического обслуживания. По существу, здесь отпадает необходимость решения задачи прогноза. При записи критерия оптимальности в аддитивной или мультипликативной форме марковская стратегия профилактик может быть найдена в результате решения рекуррентных уравнений Р. Беллмана. В некоторых случаях оптимальный алгоритм эксплуатации удается получить в явном аналитическом виде.

Группа задач, в которых используются немарковские модели процессов дрейфа параметров, в основе своей содержит методы и алгоритмы прогнозирования технического состояния, надежности и эффективности [3, 4].

Программа эксплуатации может определяться на основе только априорных, полученных до начала эксплуатации объекта, сведений либо с учетом дополнительной информации о состоянии объекта, которая становится известной при измерении его параметров в процессе эксплуатации.

Различают систему эксплуатации по ресурсу, при которой продолжительность эксплуатации до профилактики, ремонта или списания не зависит от фактического состояния каждого конкретного объекта, и систему эксплуатации по состоянию, при которой решение о профилактических и восстановительных работах принимается в зависимости от фактического состояния каждого объекта. Методы решения задач планирования эксплуатации во многом зависят от полноты и достоверности исходной информации. В понятие полноты описания входит наличие априорных статистических характеристик закономерностей изменения параметров, характеристик, позволяющих учесть влияние управляющих воздействий на процессы эксплуатационных изменений. С точки зрения приложений наибольший интерес представляют методы, позволяющие получать решения в условиях ограниченности исходных данных.

Формальные постановки задач оптимального планирования эксплуатации

В соответствии с методологией функционально-параметрического направления теории надежности [4, 5] стратегия профилактик определяется на основе прогнозирования случайных процессов дрейфа параметров, требований к надежности или эффективности и с учетом заданных ограничений на ресурсы. В зависимости от выбранного (или заданного) критерия оптимальности, а также исходной информации о процессах изменения параметров можно выделить следующие классы задач оптимизации стратегии профилактических коррекций.

1. По выбранному критерию оптимальности:

а) выбор стратегии, обеспечивающей требуемую параметрическую надежность при минимальных эксплуатационных затратах;

б) выбор стратегии, максимизирующей параметрическую надежность при заданных ограничениях на эксплуатационные затраты;

в) нахождение стратегии, максимизирующей эффективность работы объекта в течение заданного времени.

2. По исходной информации:

а) задача априорного планирования профилактик (планирование профилактик неконтролируемых объектов);

б) задача апостериорного планирования профилактик (планирование профилактик контролируемых объектов).

В общем виде задачи синтеза оптимальной стратегии профилактических коррекций параметров можно сформулировать следующим образом.

Априорное планирование профилактик по критерию надежности.

При известных характеристиках априорного случайного процесса изменения параметров $\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_r}(t) = \{Y_1^{\mathrm{P}_r}(t),\ Y_2^{\mathrm{P}_r}(t), \dots, Y_n^{\mathrm{P}_r}(t)\}$, заданной области допустимых значений параметров D и времени эксплуатации T найти такую неслучайную функцию $\mathbf{e}(t) = \{e_1(t), e_2(t), \dots, e_n(t)\}$, при которой вероятность безотказной работы в течение заданного времени эксплуатации будет максимальной при условии, что эксплуатационные затраты не превысят заданной величины:

$$P\{(\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_r}(t) + \mathbf{e}(t)) \in D,\ t \in [0, T]\} = \max, \quad C_1(T) \le C_0,$$

где $C_1(T)=\int\limits_0^T C_1(e(t))\,dt$ – затраты, связанные с проведением коррекций параметров (профилактическим обслуживанием); C_0 – допустимый уровень затрат.

Апостериорное (индивидуальное) планирование профилактик по критерию надежности.

При известных характеристиках апостериорного (условного) случайного процесса $\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_s}(t)$, получаемого из априорного с учетом результатов контроля, заданных D и T, найти такую функцию $\mathbf{e}(t)$, при которой

$$P\{(\boldsymbol{Y}^{\mathrm{P}_s}(t)+\boldsymbol{e}(t))\in D,\ t\in[0,T]\}=\max,\quad C_2(T)\le C_0,$$

где $C_2(T)$ – затраты, связанные с проведением контроля и коррекций параметров.

Априорное планирование профилактик по критерию минимума затрат.

При заданных $\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_r}(t)$, D и T найти $\mathbf{e}(t)$, при которой

$$C_1(T)=\min,\ P\{(\boldsymbol{Y}^{\mathrm{P}_r}(t)+\boldsymbol{e}(t))\in D,\ t\in[0,T]\}\ge P_{\text{тр}},$$

где $P_{\text{тр}}$ – требуемый уровень параметрической надежности.

Апостериорное планирование профилактик по критерию минимума затрат.

Известны $\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_s}(t)$, D, T. Найти такую функцию $\mathbf{e}(t)$, при которой

$$C_2(T)=\min,\ P\{(\boldsymbol{Y}^{\mathrm{P}_s}(t)+\boldsymbol{e}(t))\in D,\ t\in[0,T]\}\ge P_{\text{тр}}.$$

Априорное планирование профилактик по критерию эффективности.

При известных $\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_r}(t)$, времени эксплуатации T и некоторой функции $H(Y)$, характеризующей удельную эффективность (прибыль, получаемую в единицу времени при эксплуатации объекта с параметрами Y), найти такую неслучайную функцию $\boldsymbol{e}(t)$, при которой достигает максимума эффективность (средний доход) эксплуатации объекта:

$$Э(T)=\int\limits_0^T\{H(\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_r}(t)+\mathbf{e}(t))-C_1(\mathbf{e}(t))\}\,dt=\max.$$

Апостериорное планирование профилактик по критерию эффективности.

При известных $\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_s}(t)$, T, $H(Y)$ найти $\mathbf{e}(t)$, при которой

$$Э(T)=\int\limits_0^T\{H(\mathbf{Y}^{\mathrm{P}_s}(T)+\mathbf{e}(t))-C_r(\mathbf{e}(t))\}\,dt=\max.$$

Приведенные постановки задач планирования профилактических коррекций параметров являются достаточно общими и при соответствующем задании критерия оценки качества обслуживания (функции потерь или функции эффективности) в принципе могут быть использованы и для описания более широкого круга задач планирования эксплуатации. Наиболее общие среди рассмотренных – задачи планирования профилактик по критерию эффективности. Средний доход от эксплуатации служит некоторым интегральным критерием, позволяющим объединить в едином показателе как эффект от применения объекта по назначению, так и возникающие при этом потери на его обслуживание. Вместе с тем использование такого критерия в ряде случаев затруднительно, так как часто важнейшие показатели объекта не имеют стоимостного эквивалента, а ряд составляющих функции выигрыша чрезвычайно трудно определить на практике. Поэтому во многих случаях целесообразно ввести совокупность критериев, которые можно разделить на оперативно-тактические и экономические. Примером такого разделения могут служить рассмотренные выше задачи оптимального планирования профилактик по критериям надежности или затрат.

Общая формулировка задач планирования профилактической коррекции, естественно, еще не дает гарантии получения их общего решения. Можно только сказать, что они относятся к классу задач стохастической оптимизации и их решение (за исключением некоторых частных случаев) следует искать алгоритмическими методами на основе компьютерного моделирования.

Далее остановимся на задачах априорного планирования профилактик.

Априорное планирование профилактик

Рассмотрим одну из наиболее распространенных модификаций задачи планирования профилактик неконтролируемых объектов (априорного планирования профилактик).

Пусть $Y(t)$ – случайный (в общем случае векторный) процесс эксплуатационных изменений некоторого выходного параметра технического объекта, статистические характеристики которого полагаются известными. Задана область допустимых изменений этого параметра и требуемое время эксплуатаций T. Необходимо назначить моменты проведения профилактических изменений (коррекций) параметров таким образом, чтобы вероятность $P(t)$ невыхода $Y(t)$ за допустимые пределы в течение времени эксплуатации (параметрическая надежность) была не меньше требуемой $P_{\text{тр}}$. Будем также считать, что начальное (номинальное) значение параметра $y_{\text{н}}$ задано.

Время эксплуатации до момента проведения профилактики $t_{\text{п}}$ находится как решение уравнения

$$P(t_{\text{п}}) = \int_{t_{\text{п}}}^{\infty} q(t)\, dt = P_{\text{тр}} ,$$

где $q(t)$ – плотность распределения времени нахождения параметра в допустимых пределах.

Если считать, что в процессе профилактик каждый раз устанавливается значение параметра, равное $y_н$, и процесс профилактик не влияет на статистические характеристики $Y(t)$, то полученное время $t_п$ определит периодичность проведения профилактических работ. Для обеспечения требуемой надежности в течение всего времени эксплуатации технического устройства T необходимо осуществить $l=[T/t_п]$ профилактических коррекций параметра y. При такой постановке задачи остается открытым вопрос о выборе номинального значения параметра $y_н$, устанавливаемого в начале эксплуатации и в процессе профилактик. Если номинальное значение параметра выбрано неудачно, то это приведет к тому, что профилактики будут проводиться чаще, чем это необходимо для обеспечения требуемой надежности. Существует, очевидно, некоторое оптимальное значение номинала параметра $y_н^0$, при котором требуемая надежность обеспечивается минимальным числом профилактик. Таким образом, выбор стратегий профилактик сводится к определению моментов времени, в которые следует осуществлять профилактическую коррекцию параметров, и наилучших значений корректируемых параметров. Пару взаимосвязанных значений ($y_н^0$, $t_п^0=\max t_п$) назовем оптимальной стратегией профилактик. Заметим, что эта стратегия позволяет обеспечить заданную параметрическую надежность при минимальных затратах на проведение профилактик (эксплуатационных затратах), если функция затрат аддитивная и затраты, связанные с проведением любой из профилактик, одинаковы.

Задача нахождения оптимальной стратегии профилактик в рассматриваемом случае будет иметь вид

$$t_п^0=\max_{y_н\in\Omega_y} t_п(y_н), \tag{1}$$

при условии

$$P(y_н,t_п(y_н))=P_{тр}, \tag{2}$$

где $\mathbf{\Omega}_y$ – множество допустимых значений $y_н$.

Справедливость рассмотрения $t_п$ как функции от $y_н$ следует из теоремы о существовании неявной функции. Дифференцируя (2) по $y_н$, получим

$$\partial P/\partial y_н+(\partial P/\partial t_п)(dt_п/d\,y_н)=0.$$

В точке, где $t_п(y_н)$ достигает экстремума, $dt_п/d\,y_н=0$. Следовательно, для этого значения $y_н$ справедливы соотношения

$$P(y_н,t_п)=P_{тр},\quad \partial P(y_н,t_п)/\partial y_н=0,\quad y_н\in\Omega_y. \tag{3}$$

Таким образом, пара $(y_н^0,t_п^0)$ должна быть решением системы уравнений (3). Можно показать, что это решение существует и оно единственное. Действительно, пусть $y_н(t_1)$ и $y_н(t_2)$ – номинальные значения параметра, доставляющие максимум вероятности безотказной работы в течение времени t_1 и t_2 соответственно. Если $t_2 > t_1$, справедливы следующие неравенства:

$$P(y_н(t_1), t_1) > P(y_н(t_2), t_1) > P(y_н(t_2), t_2), \text{ т.е.}$$

$$P(y_н(t_2), t_2) < P(y_н(t_1), t_1). \tag{4}$$

Таким образом, решение системы (3) сводится к нахождению точки пересечения монотонно убывающей (это следует из последнего неравенства) функции одной переменной $P(y_н(t_п), t_п)$ с прямой $P_{тр}=const$. Следовательно, если решение существует, то оно единственное.

Необходимое и достаточное условие существования решения системы уравнений (3) можно записать в виде $P_{тр} \le P(y_н^*, 0)$, где оптимальное номинальное значение параметра $Y(t)$, удовлетворяющее условию $P(y_н^*, 0) = \max\limits_{y_н \in \Omega_y} P(y_н, 0)$.

Здесь $P(y_н,0)$ – вероятность невыхода $Y(t)$ за допустимые пределы при $t = 0$. Доказательство этого утверждения не вызывает затруднений и приведено в работе [6].

Рассмотрим некоторые частные случаи решения поставленной задачи, воспользовавшись результатами, приведенными в [7, 8].

I. Пусть $Y(t)$ – линейный равномерный процесс: $Y(t)=Y_0+\nu t$, где Y_0 – случайное начальное значение параметра с плотностью распределения $f(y_0)$; ν – неслучайная скорость изменения параметра.

Найдем номинальное значение параметра $y_н^0$, при котором вероятность $P(y_н^0, t_п^0)$ того, что линейная случайная функция $Y(t)$ в интервале времени $[0, t_п^0]$ не выйдет за пределы допустимых значений $[a, b]$, достигает максимума.

Условия нахождения $Y(t)$ в допустимых пределах в течение времени $t_п^0$ в соответствии с методом критических сечений [8] будут иметь вид

$$a \le Y_0 \le b, \tag{5}$$

$$a \le Y_0 + \nu\, t_п^0 \le b. \tag{6}$$

Неравенство (6) перепишем в виде $a - \nu t_п^0 \le Y_0 \le b - \nu t_п^0$, тогда при $\nu < 0$ получим $a - \nu t_п^0 \le Y_0 \le b$. Вероятность невыхода $Y(t)$ за время $t_п^0$ из области $[a, b]$ можно записать в виде

$$P(t_п^0) = \int\limits_{a-\nu T}^{b} f(y_0)dy_0, \tag{7}$$

где $f(y_0)$ – плотность распределения случайной величины Y_0.

Представим выражение (7) как функцию величины e, на которую необходимо изменить исходное номинальное значение параметра (или сдвинуть диапазон допустимых изменений параметра) и обеспечить максимум вероятности (7):

$$P(t_{\text{п}}^0, e) = \int\limits_{a-vT}^{b} f(y_0 - e)dy_0 = \int\limits_{a+e-vT}^{b+e} f(y_0)dy_0 \,.$$

Если $f(y_0)$ – непрерывная функция аргумента y_0, то $P(t,e)$ непрерывно дифференцируема по e. Тогда, учитывая, что $P(t,-\infty) = P(t,\infty) = 0$ и $P(t,e) \geq 0$, при $e \in (-\infty, \infty)$ обязательно найдутся на $(-\infty, \infty)$ точки (одна или несколько) гладкого максимума. Следовательно, величину e, при которой вероятность $P(t, e)$ достигает максимального значения, можно найти из уравнения

$$\frac{\partial}{\partial e} \int\limits_{a+e-vT}^{b+e} f(y_0)dy_0 = 0 \,.$$

После дифференцирования получим

$$f(b+e) = f(a+e-vt) \,. \tag{8}$$

Зная e, найдем оптимальное значение номинала параметра:

$$y_{\text{н}}^0 = y_{\text{н}} - e \,, \tag{9}$$

где $y_{\text{н}}$ – исходное (неоптимальное) номинальное значение параметра.

Условие (8) было получено в предположении, что скорость изменения параметра отрицательна. Если со временем значение параметра увеличивается (скорость изменения параметра $v > 0$), то для нахождения оптимальной коррекции номинала следует пользоваться соотношением $f(b+e-vt) = f(a+e)$.

Используя соотношения (7) – (9), систему уравнений (3) для поиска оптимальной стратегии профилактик можно представить в виде

$$P(y_{\text{н}}^0, t_{\text{п}}^0) = P_{\text{тр}} \,, \tag{10}$$

$$f(b,\, y_{\text{н}}^0 + v\, t_{\text{п}}^0) = f(a,\, y_{\text{н}}^0) \,, \tag{11}$$

$$\begin{aligned} &a \leq y_{\text{н}} \leq 0{,}5(a+b) \quad \text{при} \quad v > 0, \\ &0{,}5(a+b) < y_{\text{н}} \leq b \quad \text{при} \quad v \leq 0, \end{aligned} \tag{12}$$

где a, b $(b > a \geq 0)$ – границы допуска на параметр $Y(t)$;

$$P(y_{\text{н}}^0,\, t_{\text{п}}^0) = \begin{cases} \int\limits_{a}^{b - v\, t_{\text{п}}} f(y_0,\, y_{\text{н}}^0) dy_0 & \text{при} \quad v > 0, \\ \int\limits_{a - v\, t_{\text{п}}}^{b} f(y_0, y_{\text{н}}^0) dy_0 & \text{при} \quad v \leq 0. \end{cases} \tag{13}$$

Если случайная величина Y_0 распределена по нормальному закону с параметрами $m_{y_0} = y_{\text{н}}$ и σ_{y_0}, то из уравнения (11) находим

$$y_{\text{н}}^0 = 0{,}5(a + b - v\, t_{\text{п}}^0) \,. \tag{14}$$

Подставляя (14) в уравнение (10) и решая его относительно $t_п^0$, получим

$$t_п^0 = (b - a - 2\lambda_1 \sigma_{y_0}) |\nu|^{-1}, \tag{15}$$

где λ_1 есть решение уравнения

$$\Phi(\lambda_1) = 0{,}5 P_{тр}. \tag{16}$$

Здесь $\Phi(\lambda_1)$ – функция Лапласа-Гаусса.

Подставляя (15) в (14), найдем $y_н^0 = \begin{cases} a + \lambda_1 \sigma_{y_0} & \text{при} \quad \nu > 0, \\ b - \lambda_1 \sigma_{y_0} & \text{при} \quad \nu \le 0. \end{cases}$

II. Для линейного случайного процесса $Y(t)$, у которого случайна лишь скорость изменения V (веерного процесса), система уравнений (3) примет вид

$$\begin{gathered} P(y_н^0, t_п^0) = \int_A^B \varphi(\nu)\, d\upsilon = P_{тр}, \\ \varphi(B) - \varphi(A) = 0, \quad a \le y_н^0 \le b, \end{gathered} \tag{17}$$

где $\varphi(\cdot)$ – плотность распределения скорости изменения параметра V; a, b – границы допуска на параметр $Y(t)$; $A = (a - y_0)/t_п^0$; $B = (b - y_0)/t_п^0$; $y_0 = M[Y(0)] = y_н$. Решая систему уравнений (17), найдем оптимальные значения $y_н^0$, $t_п^0$.

Если случайная величина V распределена по нормальному закону с параметрами m_ν и σ_ν, то

$$y_н^0 = 0{,}5(a = b - 2m_\nu t_п^0), \tag{18}$$

$$t_п^0 = (b - a)/2\lambda_1 \sigma_\nu, \tag{19}$$

где λ_1 – решение уравнения (16).

III. Для линейного случайного процесса $Y(t)$ общего вида (случайными являются начальное значение Y_0 и скорость изменения параметра V) система уравнений (3) будет:

$$\begin{gathered} \int_{a+e}^{b+e} dy_0 \int_{A_1}^{B_1} g(y_0, \nu)\, d\nu = P_{тр}, \\ (1/t_п^0) \int_{a+e}^{b+e} [g(y_0, B_1) - g(y_0, A_1)]\, dy_0 - \\ - \int_{-A_2}^{0} g(b + e, \nu)\, d\nu - \int_0^{A_2} g(a + e, \nu)\, d\nu = 0, \quad a \le y_н \le b, \end{gathered} \tag{20}$$

где $g(y_0, \nu)$ – совместная плотность распределения начального значения и скорости изменения параметра $Y(t)$; $e = y_н^0 - y_н$; $A_1 = (a + e - y_0)/t_п^0$; $B_1 = (b + e - y_0)/t_п$; $A_2 = (b - a)/t_п^0$.

IV. Если процесс изменения параметра $Y(t)$ монотонный, с известной тенденцией изменения, то систему уравнений (3) можно записать в следующем виде:

а) при $y'(t)>0$,

$$\int_{a+e}^{\infty} f_0(y)dy - \int_{b+e}^{\infty} f_{t_п}(y)dy = P_{тр}, \ f_0(a+e) - f_{t_п}(b+e) = 0;$$

б) при $y'(t)<0$,

$$\int_{a+e}^{\infty} f_{t_п}(y)dy - \int_{b+e}^{\infty} f_0(y)dy = P_{тр}, \ f_0(b+e) = f_{t_п}(a+e) = 0,$$

где $f_0(y)$ и $f_{t_п}(y)$ – плотности распределения случайных величин $Y(0)$ и $Y(t_п)$.

Приведенные выше частные решения задачи оптимального планирования профилактик получены для случаев, когда в качестве модели процессов изменения параметров приняты линейные или нелинейные монотонные случайные функции. Такие модели достаточно часто применяются на практике, – например, для описания процессов износа и старения, однако возможны ситуации, когда модель процесса имеет более сложный характер. Для таких случаев можно предложить следующий алгоритм поиска оптимальных значений $y_н^0$ и $t_п^0$.

При фиксированном значении t_ν (на первом шаге можно, например, принять $t_1 = T$) находим номинальное значение параметра $y_{н\nu}$, обеспечивающее максимум вероятности безотказной работы за время t_ν. Если полученная при этом вероятность $P_\nu = P(y_{н\nu}, t_\nu) < P_{тр}$, то вычисляем $t_{\nu+1} = t_\nu - k\left|t_\nu - t_{\nu-1}\right|$, в противном случае $t_{\nu+1} = t_\nu + k\left|t_\nu - t_{\nu-1}\right|$. Здесь k – параметр (например, $k = 0,5$), который определяет скорость сходимости алгоритма.

Далее процедура повторяется. Вычисляется $y_{н\nu+1}, P_{\nu+1} = P(y_{н\nu+1}, t_{\nu+1})$ и т.д. Вычисления продолжаются до тех пор, пока не будет выполнено условие $\left|P_\nu - P_{тр}\right| \le \delta$, где δ – заданная величина, определяющая точность получаемого решения.

Если параметров, по которым планируются профилактические коррекции, несколько, то определяется периодичность профилактик по каждому из них. Близкие значения $t_п$ группируются. Период профилактик определяется по минимальному времени профилактик в группе. Таким подходом можно воспользоваться, если известны независимые допуски на каждый параметр.

Сложнее ситуация, когда не удается задать пределы допустимого изменения каждого из параметров $y_1, y_2, \ldots, y_m$ (известна лишь область их возможных вариаций). Эта задача обычно возникает при планировании профилактических коррекций в пространстве внутренних параметров. Для ее решения можно использовать возможности компьютерной системы нахождения и использования многомерных областей работоспособности СНИОР [9,10].

Заключение

Следует заметить, что при расчетах стратегии профилактик мы исходили из закономерностей изменения параметров всего ансамбля объектов рассматриваемого типа и не учитывали индивидуальных особенностей отдельного объекта, а поэтому полученные результаты носят «групповой» характер. Рассчитанная таким образом стратегия профилактик может быть рекомендована для всех объектов данного типа, независимо от того, насколько каждый из них отличается от среднестатистического. Вследствие этого априорное планирование профилактик будет наиболее оправданным в тех случаях, когда эксплуатируемые объекты статистически однородны (имеют небольшой разброс индивидуальных характеристик качества), а их отказы не приводят к катастрофическим последствиям. Кроме того, для получения необходимой исходной информации немаловажно наличие достаточно представительного ансамбля образцов таких объектов, что позволяет рекомендовать рассмотренный выше подход для изделий, выпускаемых в процессе серийного (массового) производства.

Задача индивидуального планирования профилактик в своей основе близка к рассмотренной выше задаче априорного планирования профилактических коррекций. Основное различие состоит в том, что при индивидуальном подходе моменты профилактик и значения корректируемых параметров выбираются по апостериорному, т.е. условному относительно результатов контроля, процессу изменения параметров. Следовательно, нахождение индивидуальной стратегии профилактических коррекций связано с необходимостью преобразования случайного процесса $Y(t)$ с учетом данных контроля. Это преобразование состоит в определении апостериорных (условных) статистических характеристик процесса дрейфа параметров и при достаточно полных вероятностных характеристиках $Y(t)$ и ошибок измерения может быть выполнено на основе классических методов теории вероятностей и математической статистики [11].

Имея сведения о характеристиках апостериорного случайного процесса $Y^{P_s}(t)$, можно воспользоваться системой уравнений (3) и найти начальное значение корректируемого параметра $y_{\text{н}}^0$ и промежуток времени $t_{\text{п}}^0$, в течение которого параметр с заданной вероятностью будет находиться в области допустимых значений. Тем самым будет определен момент времени, в который следует провести очередной контроль (измерение) или профилактическую коррекцию параметра.

Построение апостериорных (условных) случайных процессов связано с существенными трудностями. Более простым представляется подход, основанный на прогнозировании технического состояния объектов контроля [12, 13]. Теоретической основой прогнозирования технического состояния служат классические методы экстраполяции и оптимального оценивания, а результатом прогноза – точечная оценка контролируемого параметра (наблюдаемой реализации случайного процесса) в некоторый будущий момент времени. Решение задачи оптимального планирования профилактик связано при этом с нахождением момента первого выхода указанной оценки за пределы области допустимых значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Дедков В.К., Северцев Н.А.* Основные вопросы эксплуатации сложных систем. – М.: Высшая школа, 1976.
2. *Барзилович Е.Ю*. Вопросы математической теории надежности / Е.Ю. Барзилович, Ю.К. Беляев, В.А. Каштанов и др., под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Радио и связь, 1983.
3. *Васильев Б.В.* Прогнозирование надежности и эффективности радиоэлектронных устройств. – М.: Сов. радио, 1970.
4. *Абрамов О.В.* Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. – 2014. – № 4. – С.53-66.
5. *Абрамов О.В.* Функционально-параметрический подход в задачах обеспечения надежности технических систем // Надежность и контроль качества. – 1999.– № 5. – С.34-45.
6. *Абрамов О.В., Супоня А.А.* Учет нелинейных изменений параметров при проектировании технических устройств // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 2. – С.144-152.
7. *Abramov O.V.* Choosing optimal values of tuning parameters for technical devices and systems // Automation and Remote Control. – 2016. – Vol. 77, №4. – P.594-603.
8. *Абрамов О.В., Катуева Я.В.* Параллельные алгоритмы анализа и оптимизации параметрической надежности // Надежность. – 2005. – №4. – С.19-26.
9. *Абрамов О.В., Назаров Д.А.* Программно-алгоритмический комплекс построения, анализа и использования областей работоспособности // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2015. – № 2. – С.16-26.
10. *Назаров Д.А.* Использование областей работоспособности для оптимального выбора номиналов параметров // Информатика и системы управления. – 2011. – № 2. – С.59-69.
11. *Кудрицкий В.Д.* Прогнозирующий контроль радиоэлектронных устройств. – Киев: Техника, 1982.
12. *Абрамов О.В.* Анализ и прогнозирование техногенных рисков // Информатика и системы управления. – 2012. – № 3. – С.97-105.
13. *Абрамов О.В.* К проблеме предотвращения аварий технических объектов ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С.11-16.

E-mail:
Абрамов Олег Васильевич – abramov@iacp.dvo.ru.