УДК 519.218

А. Н. Розенбаум, А. И. Никитин

ПЛАНИРОВАНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ В ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЙ СИСТЕМЕ

A. N. Rozenbaum, A. I. Nikitin

PLANNING OF OBSERVATION IN A MAN-MACHINE SYSTEM

Рассмотрена проблема постановки и решения задачи построения наиболее рационального плана наблюдений параметров состояния человеко-машинных систем с учетом сведений, поступающих в результате контроля.

Ключевые слова: человеко-машинная система, контроль состояния, оптимальный план наблюдений.

The problem of statement and decision of the construction problem of the most rational plan of condition parameters observation of a man-machine system is considered taking into account the data taken as a result of the control.

Key words: man-machine system, control of condition, optimum plan of observation.

Введение

Развитие компьютерной среды привело к тому, что в созданных человеком технических системах люди и техника взаимно дополняют друг друга, образуя единый организм, называемый человеко-машинной системой (ЧМС). Её эксплуатационная эффективность, надежность и управляемость во многом зависят от состояния не только технической составляющей (ТС), но и от физиологического и психологического состояния людей, управляющих техникой.

Сложные системы ответственного назначения, по сути и по содержанию, есть не что иное, как ЧМС, прогнозированию состояния которых на заданный временной интервал уделяется особое внимание, поскольку оценка качества состояния не только ТС, но и человеческой составляющей (ЧС) при подготовке, в процессе и в условиях эксплуатации является необходимым требованием для обеспечения безопасности, исключения аварийных ситуаций и техногенных катастроф.

Задачи планирования наблюдения и планирования управления в динамических системах взаимосвязаны, и нахождение оптимальных решений в первых позволяет находить эффективные решения для вторых.

Контроль состояния многомерных, как правило, стохастических ЧМС осуществляется на базе статистической измерительной информации и относится к задачам планирования наблюдений, при решении которых формируются (прогнозируются) сценарии поведения систем на определенный период. В теории планирования экспериментов можно выделить два основных направления: классическое и оптимальное. Первое основано на использовании регрессионной модели эксперимента, второе – на оптимизации эксперимента в зависимости от факторов различной природы.

Особенностью задачи оптимального планирования процесса наблюдения состояния ЧМС является выбор адекватного одного или нескольких «критериев оптимальности» в условиях неопределенности, сопровождающих процесс наблюдения. На практике к решению подобного рода задач в настоящее время существуют (в целом) два подхода. Первый из них основан на оптимизации гарантированных по вероятности показателей качества, другой – на обобщенном минимаксном подходе.

Другой особенностью наблюдения состояния ЧМС является то, что присутствуют как непрерывные, так и дискретные измерения, при стохастическом, как правило, характере ошибок. Число параметров наблюдения, с целью оптимизации размерности модели системы, редко удается абсолютно минимизировать, не добившись заданной точности описания эволюции во времени этой динамической системы. Выбор «основных параметров» наблюдения служит одной из мер оптимизации размерности моделей ЧМС.

Автоматизация процесса получения измерительной информации о состоянии ТС в настоящее время не является особой технологической проблемой при соотношениях «цель функционирования ТС – точность данных – стоимость измерительной информации». Проблемой остается автоматизация получения информации о физиологическом и психологическом состоянии человека-оператора, т. к. в настоящее время оценка состояния человека проводится экспертным путем, как правило, с привлечением стационарного медицинского оборудования. В условиях автономности функционирования ЧМС непрерывный автоматизированный контроль состояния ЧС в основном отсутствует. Автоматизация процесса получения динамической информации о физиологическом состоянии оператора ТС представляет собой не решенную, в достаточной мере, техническую задачу. Однако попытки создания непрерывно действующих систем функциональной диагностики существуют, и прежде всего в космической и авиационной отраслях [1]. Исходя из того, что состояние человека можно оценить на заданном временном интервале (полагая, что в начальный момент t_0 он здоров) по информации о параметрах кровотока и температуре кожи, в Институте автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН ведутся работы по получению таких данных непрерывно и автоматизированно [2]. Конструктивно средство измерения параметров кровотока (частоты сердечных сокращений, систолического и диастолического давления) и температуры должно стать предметом форменной одежды обслуживающего персонала ТС.

В статье рассматривается задача оптимизации процесса наблюдения состояния ЧМС (в общем случае – контролируемого объекта) по результатам измерений путем выбора активных участков контроля параметров и их необходимого и достаточного количества. Полученное решение должно стать основой для составления оптимального плана измерений. На практике разработка подобных математических алгоритмов применима в ходе испытаний на надежность ЧМС при моделировании условий реальной эксплуатации данной системы.

Предполагается, что данные наблюдения на контролируемом временном интервале регулярно поступают как от элементов ТС, так и от операторов, управляющих этой системой.

Постановка задачи планирования наблюдений

Исходя из условий соответствия требованиям, предъявляемым к нахождению ЧМС в работоспособном состоянии, необходимо построить оптимальный план проведения наблюдений параметров её состояния. В ходе решения задачи наблюдения и анализа данных необходимо разработать алгоритмический процесс, направленный на получение указанного плана из исходного плана (программы) проведения наблюдений, при этом процесс преобразования планов должен происходить в соответствии с заданными критериями, условиями и ограничениями.

Пусть в некоторой ЧМС конечномерный вектор основных контролируемых параметров $\boldsymbol{y} = \{y_j(t)\}_{j=1}^{m}$ характеризует ее состояние. Предположим, что $\boldsymbol{y}$ принадлежит евклидовому пространству, однако не является фазовым вектором всей ЧМС как нелинейной динамической системы, изменяющейся во времени.

В общем случае, на основании априорной информации на определенном интервале эксплуатации T вектор $\boldsymbol{y}$ изменяется как неопределенный процесс $y(t)$, $t \in T$, $\boldsymbol{y} \in Y$ при начальном состоянии, заданном начальным условием $\boldsymbol{y}(t_0) = \boldsymbol{y}_0$. Область работоспособности ЧМС – D при $y(t) \in D$, $\forall t \in T$ представим в виде

$$D = \{y(t) : a_j \le y(t) \le b_j,\ \forall t \in T\}, \tag{1}$$

где a_j, b_j, $j = \overline{1, m}$ – заданные ограничения на компоненты $\boldsymbol{y}$; D – область, ограниченная гиперпараллелепипедом, при этом $D \subset Y$.

Предполагается, что в данной задаче оптимального планирования наблюдения параметров состояния ЧМС в качестве математической модели эволюции системы рассматривается стохастическое дифференциальное уравнение

$$\boldsymbol{y}(t) = A \cdot F(t) + \eta(t),\ t \in T_p \subseteq T, \tag{2}$$

где $A = \|a_{ij}\|_{i=1,\, j=1}^{n,\, m}$ – матрица коэффициентов модели $y(t)$; $F(t) = \{F_j(t)\}_{j=1}^{m}$ – заданный набор непрерывных детерминированных функций времени; $\eta(t)$ – погрешности принятой модели.

Модель (2) можно рассматривать как разложение системы векторов $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{t})$ по некоторому детерминированному базису векторного пространства. Как вариант, движение компонентов

$\boldsymbol{y} = \left\{y_j(t)\right\}_{j=1}^{m}$ к границам области D (1) вследствие износа и естественного старения элементов системы, уменьшения запаса ее работоспособности, можно рассматривать как равноускоренное прямолинейное движение [3].

В процессе наблюдения путем измерений параметров m-мерного вектора $\boldsymbol{y}(\boldsymbol{t})$ возможно присутствие некоторой, предположим, аддитивной ошибки (погрешности измерения). Результаты контроля $\boldsymbol{z} = \left\{z_k(t)\right\}_{k=1}^{p}$ представим в виде модели

$$z(t_k) = y(t) + \varepsilon(t_k),\ t_k \in T_p \subseteq T,\ k = \overline{1, p}. \tag{3}$$

Полагая, что погрешность $\varepsilon(t)$ обладает стохастическими характеристиками, известной можно считать лишь область ее вариаций, т. е.

$$\left|\varepsilon(t)\right| \le \xi(t),\ t \in T_p \subseteq T, \tag{4}$$

где $\xi(t)$ – заданная функция.

Ограничения (4) связаны с характеристиками измерительного оборудования и условиями проведения наблюдения параметров ЧМС. Относительно погрешностей $\eta(t)$ и $\varepsilon(t_k)$ в уравнениях (2) и (3) предполагается, что они статистически независимы между собой.

Преобразуем уравнения (2) и (3) к виду, когда динамика параметров модели представлена линейным разностным уравнением, а измерения – линейные. Рассмотрим подобное преобразование для отдельной компоненты вектора $\boldsymbol{y}(t)$. В силу их независимости такое представление может быть n-кратно повторено. Теперь компоненты матрицы $A(m \times n)$ становятся новым вектором параметров $\left\{x_{ij}(t)\right\}_{i=1, j=1}^{n, m} = \boldsymbol{x}(t)$ (в теле вектора коэффициенты матрицы следуют друг за другом по столбцам). После преобразований получим:

$$\boldsymbol{x}(t+1) = \Phi_1\, x(t) + \Phi_2\eta(t),\quad t \in T_p \subseteq T, \tag{5}$$

$$z(t_k) = \gamma_k H_k \boldsymbol{x}(t) + \varepsilon\,(t_k),\ t_k \in T_p \subseteq T,\ k = \overline{1, p}, \tag{6}$$

где $\Phi_1 = \Phi_2 = E_{mn}$ – единичные матрицы размером $(mn \times mn)$; $H_k(n \times mn) = \varphi^T(t_k) \otimes E_n$ ($\otimes$ – кронекеровское произведение матриц).

Модель (6) определяет все измерения, соответствующие плану наблюдений:

$$\Theta = \left\{\gamma_k, H_k\right\}_{k=1}^{p},$$

где $\left\{\gamma_k\right\}$, $\gamma_k \in \Gamma_k = \{0; 1\}$ – программа измерений (1 – измерение проводится, 0 – измерение не проводится); $\{H_k\}$, $H_k \in \Xi_k$ – последовательность матриц, указывающая на состав измеряемых параметров из потенциального множества Ξ_k.

Ограничения на $\{\eta(t_k)\}$ и $\{\varepsilon(t_k)\}$из (5) и (6), а также на начальные ограничения $x(t_0)$: $\Delta\hat{x}_0 = x(t_0) - \Delta\hat{x}(t_0)$ зададим в виде не связанных эллипсоидов соответствующей размерности:

$$\Omega_{x_0} = \{\, \Delta\hat{x} : \Delta\hat{x}_0^T \hat{K}_0^{-1} \Delta\hat{x}_0 \le k_0^2 \,\}, \tag{7}$$

$$\Omega_{\varepsilon_k} = \{\, \varepsilon_k : \varepsilon_k^T B_{\varepsilon_k}^{-1} \varepsilon_k \le r_{\varepsilon_k}^2 \,\}, \tag{8}$$

$$\Omega_{\eta_k} = \{\, \eta_k : \eta_k^T B_{\eta_k}^{-1} \eta_k \le r_{\eta_k}^2 \,\}, \tag{9}$$

где $\hat{K}_0^{-1}$, $B_{\varepsilon_k}^{-1}$, $B_{\eta_k}^{-1}$ – известные симметрические положительно-определенные матрицы, задающие, соответственно, параметры эллипсоидов погрешности элементов модели, ошибок наблюдения и модели ЧМС, характеризующие размер соответствующих эллипсоидов; k_0^2, $r_{\varepsilon_k}^2$, $r_{\eta_k}^2$ – положительные числа, характеризующие размер эллипсоидов на момент времени $t \in T_p$; $\Omega_\varepsilon = \Omega_{\varepsilon_1} \times \Omega_{\varepsilon_2} \times \ldots \times \Omega_{\varepsilon_p}$, $\Omega_\eta = \Omega_{\eta_1} \times \Omega_{\eta_2} \times \ldots \times \Omega_{\eta_p}$, $\Omega = \Omega_{x_0} \times \Omega_\varepsilon \times \Omega_\eta$, ω – расширенный вектор погрешностей эксперимента размерности $(mn + p(n + mn))$ вида

$$\omega^T = (\,\Delta\hat{x}_0 |\ \varepsilon_1^T |\ \varepsilon_2^T | \ldots |\ \varepsilon_p^T |\ \eta_1^T |\ \eta_2^T | \ldots |\ \eta_p^T\,).$$

Выбор класса эллипсоидов для аппроксимации искомых областей вариации параметров обусловлен тем, что он инвариантен относительно линейных преобразований (по сравнению с классом прямоугольных параллелепипедов). Параметры эллипсоидов (7) и (8) можно получить, описав около заданных параллепипедов эллипсоиды наименьшего объема [4]. Для эллипсоидов (9) необходимо найти $2mn$ решений задачи линейного программирования вида

$$\{\eta_i(t_k)\}_{i=1}^{mn} \to \min \quad \{\eta_i(t_k)\}_{i=1}^{mn} \to \max$$

для $k \geq m$ при ограничениях

$$|\,H_j\,\eta\,(t_k)| \leq \delta(t_j),\ j = \overline{1, k} \tag{10}$$

рассматриваемых покомпонентно: $\delta(t_j) = \left\{\delta_i(t_j)\right\}_{i=1}^{n}$.

Если ранее эллипсоиды (7)–(9) были уже заданы, то процесс аппроксимации возможен уже с первого наблюдения.

Считаем, что общие максимальные затраты на процесс наблюдения определены и составляют сумму затрат на каждое проведенное измерение:

$$P_\Sigma = \sum_{k=1}^{p} \gamma_k \tag{11}$$

на определенном интервале наблюдения $\tilde{T} \subseteq T_p$.

Априорную информацию об ошибке $\Delta\hat{x}_0$ полагаем заданной.

Итак, в процессе наблюдения за ЧМС (5) по результатам измерений (6) необходимо получить оптимальную оценку $\tilde{l}$ скалярного параметра

$$l = a^T x_p,$$

где $a(mn \times 1)$ – заданный вектор; x_p – терминальное состояние, представляющее собой выход параметров за пределы области D (1), т. е. потерю системой работоспособности. Допустимая оценка $\tilde{l}$ имеет вид [5]:

$$\tilde{l} = -\Sigma\,\gamma_k V_k^T z_k \;+\; v^T \hat{x}_0\,, \tag{12}$$

где $\{V_k\}$ – последовательность «весов», определяющая фильтр, вектор размером $(n \times 1)$; v – вектор размером $(mn \times 1)$, выбираемый из условия несмещённости.

Примем критерий оптимальности

$$K = \max_{\omega\in\Omega}\left\|\Delta\bar{l}\right\| \;=\; \max_{\omega\in\Omega}\left\|\Delta\bar{l}\right\| \to \min_{\{\gamma_k,\,H_k\}}\ \min_{\{V_k\}}, \tag{13}$$

что соответствует оптимизации априори наихудшей точности оценивания.

Расчет на наихудший случай (принцип минимакса) позволяет установить гарантированные по достоверности пределы точности оценок относительно заданной исходной совокупности сведений.

Построение оптимального плана наблюдений за состоянием ЧМС

Формирование оптимального плана можно осуществить на основе метода последовательного планирования [5]. Смысл данного метода состоит в последовательном приближении к Θ^{opt} при рассмотрении результатов минимаксной обработки каждого очередного измерения для построения нового Θ. Метод последовательного планирования дает возможность получить Θ^{opt} и сокращает на данной основе количество наблюдений за $\boldsymbol{y}(t)$ без ухудшения точности оценок состояния ЧМС. Алгоритм реализации рассматриваемого метода может быть описан следующим образом.

1. Используя априорную информацию об ошибках модели и наблюдаемых параметров, а также первоначальные значения H^0 и начальные ограничения, определяют первое приближение к оптимальному плану Θ^{opt} : $\Theta_1^{opt} = arg\, K^*$ с учетом (10).

2. Производя, согласно Θ_1^{opt}, очередное наблюдение, уточняют значения оцениваемых параметров H^1 и l^1 с учетом (12).

3. Уточненные H^1 и l^1 служат новой информационной базой для построения следующего приближения к оптимальному плану Θ_2^{opt}.

4. Старый план Θ_1^{opt} заменяется на новый Θ_2^{opt}, а старые оценки – на новые.

5. Переход к п. 2, пока выполняется условие (11).

6. Построен оптимальный, в смысле критерия (13), план $\Theta^{opt} = \Theta^{opt}_{P_\Sigma}$.

Аналогичные результаты можно получить и для ЧС ЧМС при формировании программы наблюдений за ее состоянием.

Гарантированная точность оценки позволяет установить достоверный предел точности при заданной модели эксперимента. Полученный оптимальный план включает только те наблюдения, которые могут пополнять исходную совокупность сведений новыми данными.

Применение алгоритма программы наблюдений для оценки состояния судовых систем

Техническое состояние дизеля 4Н 26/26 можно оценить по измерениям параметров цилиндропоршневой группы, и в частности по износу поршневых колец и натяжению соединительных элементов. Срок службы кольца 4×10^3 ч. Результаты измерений износа $y_1(t)$ и натяжения $y_2(t)$ приведены в табл. 1. Структура оптимальных планов после очередного наблюдения отражена в табл. 2. Изменение размеров области вариации параметров, прогнозируемых на определенный момент времени, изображено на рисунке.

Таблица 1

Результаты измерений износа $y_1(t)$ и натяжения $y_2(t)$

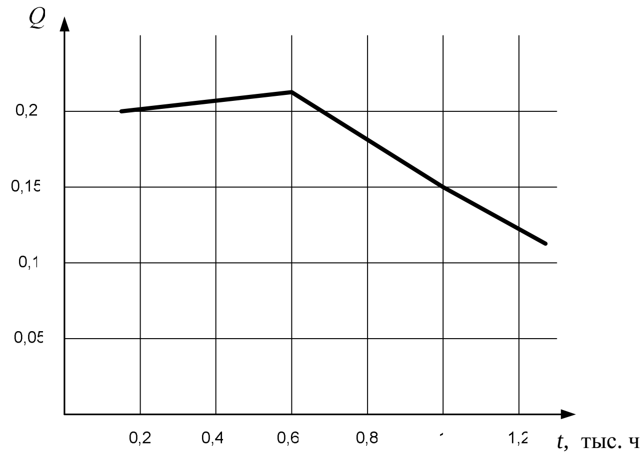
Время измерения $t \times 10^3$, ч	0,15	0,3	0,6	1,0	1,3
Значения $y_1(t)$, мм	0,02	0,03	0,04	0,05	0,062
Значения $y_2(t)$, мм	149,5	149	146	143	138

Таблица 2

Структура оптимальных планов в зависимости от количества наблюдений

	Количество наблюдений					
Оптимальный план	0	1	2	3	4	5
$t_1 = 0{,}15$	1	1	1	1	1	1
$t_2 = 0{,}3$	1	1	1	1	1	1
$t_3 = 0{,}6$	0	0	1	1	1	1
$t_4 = 1$	0	0	0	1	1	1
$t_5 = 1{,}3$	0	0	0	0	0	1
$t_6 = 1{,}48$	1	0	0	0	0	0
$t_7 = 1{,}66$	1	1	1	1	1	1
$t_8 = 1{,}84$	1	1	1	1	1	1
$t_9 = 2{,}02$	1	1	0	0	0	0
$t_{10} = 2{,}2$	1	1	1	0	0	0
$t_{11} = 2{,}38$	0	0	0	0	0	0
$t_{12} = 2{,}56$	0	0	0	0	0	0
$t_{13} = 2{,}74$	0	0	0	0	0	0
$t_{14} = 2{,}92$	0	0	0	0	0	0
$t_{15} = 3{,}1$	0	0	0	0	0	0
$t_{16} = 3{,}28$	1	1	1	1	1	1

В табл. 2 содержится значение индикатора наблюдений $\Theta^{opt} = \{0; 1\}$, где 0 – означает отсутствие наблюдения; 1 – наблюдение проводится.



Изменение размера области оценивания в зависимости от количества наблюдений:
Q – объем области оценивания, пропорциональный следу матрицы B (8),
характеризующей размер эллипсоида

Расчет в указанном примере осуществлялся для квадратичной модели $y(t)$.

$$y(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 \Rightarrow S_j(t) = S_{j0} + V_j t + a_j \frac{t^2}{2}, \; j = \overline{0, m}, \; t \in T,$$

где b_0, b_1, b_2 – оцениваемые коэффициенты по алгоритму эллипсоидального оценивания и построения оптимального плана.

Заключение

Построенный алгоритм дает возможность организовать процесс наблюдения с учетом коррекции первоначального «плана наблюдений» на основе пополнения исходной совокупности сведений данными, получаемыми непосредственно по результатам наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баевский Р. М.* Оценка и прогнозирование состояния здоровья в длительных космических полетах. Современное состояние и перспективы // Клиническая информатика и телемедицина. – Харьков. – 2006. – Т. 3, вып. 4. – С. 47–59.

2. *Способ* неконтактного измерения параметров кровотока, устройство для его осуществления и микроэлектронный магнитный датчик: пат. на изобретение РФ 2378985 / Розенбаум А. Н., Коваль В. Т., Никитин А. И. – 20.01.2010.

3. *Розенбаум А. Н., Никитин А. И.* Определение остаточного эксплуатационного ресурса судовых человеко-машинных систем // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. – 2009. – № 2. – С. 39–44.

4. *Черноусько Ф. Л.* Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. – М.: Наука, 1988. – 320 с.

5. *Малышев В. В., Красильщиков М. Н., Карлов В. И.* Оптимизация наблюдения и управления летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1989. – 312 с.

Статья поступила в редакцию 25.04.2011

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Розенбаум Анатолий Наумович – Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток; д-р техн. наук, профессор; зав. лабораторией прогнозирования состояния и надежности технических систем; тел.: 8 (4232) 310-202.

Rozenbaum Anatoly Naumovich – Institute of Automation and Control Processes of the Fareast Department of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok; Doctor of Technical Science; Professor; Head of the Laboratory of Prediction of State and Reliability of Technical Systems; tel. 8 (4232) 310-202.

Никитин Александр Иванович – Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток; научный сотрудник лаборатории прогнозирования состояния и надежности технических систем; тел.: 8 (4232) 310-202.

Nikitin Alexander Ivanovich – Institute of Automation and Control Processes of the Fareast Department of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok; Researcher of the Laboratory of Prediction of State and Reliability of Technical Systems; tel. 8 (4232) 310-202.