УДК 519.218

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННОЙ СИСТЕМЫ

© 2010 А.И. Никитин

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Поступила в редакцию 01.04.2010

Рассматривается задача определения остаточного ресурса человеко-машинной системы по результатам дискретного контроля параметров состояния данной системы в процессе эксплуатации. Предложена модель деградации состояния человеко-машинной системы на основе учета физических законов движения конца вектора параметров состояния указанной системы к границам заданной области (области работоспособности или поля допусков). Построен алгоритм нахождения статистической оценки остаточного эксплуатационного ресурса для рассматриваемой системы. Приведен пример определения данного показателя для технической составляющей человеко-машинной системы.

Ключевые слова: *человеко-машинная система, остаточный ресурс, статистическая оценка*

Человекомашинные системы (ЧМС) составляют значительную часть промышленного и иного оборудования, в частности, объектов транспорта. Обеспечение безотказности функционирования здесь практически всегда связано с обеспечением безопасности человека как важной и неотъемлемой части указанных систем. При этом существует взаимозависимость между техникой и обслуживающим ее персоналом. Нарушение работоспособности человека-оператора может приводить и приводит к негативным последствиям порой и катастрофическим. Соответственно, отказы технической части ЧМС могут подвергать существенному риску для жизни не только обслуживающий персонал, но и не связанных с данной техникой людей. Однако с точки зрения природы нарушений работоспособности и развития таких нарушений как в технической (ТС), так и в человеческой (ЧС) составляющих ЧМС существуют значительные различия. Указанные различия обуславливают возможность выполнения мероприятий по обеспечению безотказности функционирования ЧМС отдельно для человека-оператора и для обслуживаемой им техники. Такой подход является типичным и широко распространенным на практике. Вместе с тем, игнорирование взаимосвязи обеих частей ЧМС может приводить к существенным искажениям при оценке состояния всей ЧМС в целом. Более целесообразным здесь может быть применение подхода, базирующегося на признании человека-оператора и техники равноправными партнерами, вклад каждого из которых в безотказность функционирования зависит от другого. При этом, если исходить из принципа минимакса (расчета на «наихудший» случай), надежность и безотказность всей системы в целом может быть определена как надежность и безотказность части более склонной к отказам на заданном интервале эксплуатации, следовательно, и менее надежной.

Среди различных показателей надежности и безотказности технических систем вообще наиболее общим следует считать показатель вероятности безотказной работы на заданном интервале времени. Указанный показатель является одним из самых распространенных на практике. Однако его вычисление всегда связано с необходимостью сбора значительных объемов данных (априорных и апостериорных). Реалии эксплуатации ЧМС редко позволяют рассчитывать на получение потребной информации как качественном, так и количественном отношениях. Иначе говоря, применение показателя вероятности безотказной работы и других подобных статистического характера (среднего времени безотказной работы, коэффициента готовности и т.п.) на практике затруднено. Более приемлемым здесь могут быть показатели, пригодные для использования в условиях существенной ограниченности и неопределенности исходной информационной базы, в частности, связанные при своем построении с минимаксным подходом. К таким показателям можно отнести

Никитин Александр Иванович, старший инженер-программист. E-mail: anikitin@iacp.dvo.ru

показатель остаточного эксплуатационного ресурса $\widetilde{T}_k$. Указанный показатель был разработан для оценки потенциального временного ресурса безотказного функционирования технических систем с учетом параметрических отказов [1], поэтому, сначала рассмотрим конструкцию $\widetilde{\boldsymbol{T}}$ при использовании его в задаче обеспечения безотказности функционирования ТС ЧМС.

1. Постановка задачи прогнозирования остаточного ресурса технической составляющей ЧМС. Пусть $y = \{y_i\}_{i=1}^{n}$ - вектор параметров, определяющих состояние ТС. Под воздействием дестабилизирующих факторов вектор $\boldsymbol{y}$ изменяется на интервале эксплуатации T как неопределенный процесс $\boldsymbol{y}(t)$, $t \in T$, $\boldsymbol{y} \in \boldsymbol{Y}$. При нахождении $\boldsymbol{y}(t) \in D$, $\forall t \in T$, где D – область работоспособности, ТС функционирует в заданном режиме.

$$D = \{\boldsymbol{y}(t)\colon B \le \boldsymbol{y}(t) \le A,\ \forall t \in T\} \qquad (1)$$

где A, B – заданные ограничения; D – ортогональный параллелепипед.

В результатах измерений $\boldsymbol{z}(t)$ параметров $\boldsymbol{y}(t)$ на интервале $T_p \subset T$ возможно присутствие аддитивной и случайной ошибки $\boldsymbol{e}(t)$

$$\boldsymbol{z}(t_j) = \boldsymbol{y}(t_j) + \boldsymbol{e}(t_j),\ j = \overline{1,p},\ t_j \in T_p \subset T \qquad (2)$$

Относительно ошибки $e(t_j)$, $j = \overline{1,p}$, можно сделать предположение (наиболее распространенное в практике), что

$$\{e_i(t_j)\}_{i,j=1}^{i=n,j=p} \in N_c(0, \sigma_{ij}^2)_{i,j=1}^{n,p}, \qquad (3)$$

т.е. ошибка измерения любой компоненты $\boldsymbol{y}$ и в любом временном сечении на интервале $T_p \subset T$ распределена по нормальному закону с нулевым средним и известной дисперсией. Остаточный ресурс эксплуатируемой ТС опишем как интервал времени

$$\widetilde{\boldsymbol{T}} = [t_n,\ t_b] \subset T,$$

где t_n – момент времени последнего измерения $\boldsymbol{Y}(t)$ на интервале $T_p \subset T$, t_b – первый момент времени достижения $\boldsymbol{y}(t)$ границ области D, т.е. $Pt(D)$.

Рассмотрим решение задачи определения остаточного ресурса технической системы. Для формирования критерия, характеризующего остаточный ресурс ТС, используем критерий «запаса работоспособности» $S = \{S_i\}_{i=1}^{n}$, определяемый по каждой компоненте $\boldsymbol{y}(t)$ как расстояние в текущий момент времени между $\boldsymbol{y}_i(t)$, $i \in \overline{1,n}$ и ближайшей точкой на $Pt(D)$ [2]. При этом оказывается возможным рассматривать изменения S, связанные с изменением $\boldsymbol{y}$ под воздействием дестабилизирующих факторов как равноускоренное прямолинейное движение S, т.е.

$$S_i(t) = S_{i0} + v_i t + a_i \frac{t^2}{2},\ i = \overline{1,n},\ t \in T, \qquad (4)$$

где S_{i0} – значение i-ого запаса работоспособности на начало эксплуатации ТС (соответствует номинальному значению состояния ТС по i-ой компоненте $\boldsymbol{y}$ и задается техническими условиями на эксплуатацию ТС); v_i – скорость изменения i-ого запаса работоспособности в направлении к ближайшей точке на $Pt(D)$, $\forall t \in T$; a_i – ускорение изменения i-ого запаса работоспособности в направлении к ближайшей точке на $Pt(D)$, $\forall t \in T$.

В принципе зависимость (4) можно рассматривать как некоторую аппроксимацию $\boldsymbol{y}_i(t)$, $i \in \overline{0,n}$, найденную из вполне понятных физических соображений. Соответственно, результаты контроля $\boldsymbol{y}(t)$, описываемые соотношением (2) и (3) правомерно считать и результатами контроля $\boldsymbol{S}(t)$. При этом нахождение оценки $\hat{\boldsymbol{S}}(t)$, $t \in T$ будет соответствовать нахождению по результатам контроля оценки $\hat{\boldsymbol{y}}(t)$, $t \in T$, т.е. $\hat{\boldsymbol{S}}(t) \equiv \hat{\boldsymbol{y}}(t)$, $t \in T$. С учетом зависимости (4) поиск $\hat{\boldsymbol{S}}(t)$ практически сводится к поиску по результатам контроля $\boldsymbol{z}(t)$, $t \in T_n \subset T$ оценок $\hat{v}_i$ и $\hat{a}_i$, $i \in \overline{1,n}$. По известным $\hat{\boldsymbol{S}}(t)$ и $Pt(D)$ несложно найти $\widetilde{\boldsymbol{T}}$, причем, по каждой координате $i \in \overline{1,n}$ или $\{\widetilde{T}_i\}_{i=1}^{n}$.

Ограниченность и неопределенность исходных данных в задаче нахождения $\widetilde{\boldsymbol{T}}$ определяет целесообразность использования здесь принципа минимакса [2]. С учетом указанного принципа для ТС в целом остаточный эксплуатационный ресурс можно определить как

$$\widetilde{T} = \min_{i=\overline{1,n}} \{\widetilde{T}_i\}. \qquad (5)$$

В дополнение к зависимости (5) на основе принципа минимакса могут быть найдены гарантированные по достоверности относительно имеющейся совокупности исходных данных и без принятия каких-либо допущений или гипотез по статистическим свойствам указанной совокупности как интервальные, определяемые в виде неравенств

$$\widetilde{T}_i^{min} \le \widetilde{T}_i \le \widetilde{T}_i^{max}, \; i \in \overline{1,n}, \qquad (6)$$

так и точечные оценки $\widetilde{T}_i$, $i \in \overline{1,n}$, определяемые соотношением

$$\widetilde{T}_i = 0,5(\widetilde{T}_i^{max} + \widetilde{T}_i^{min}) (7)$$

Несложно убедиться, что оценка (7) является оптимальной в смысле минимума максимально возможной ошибки оценивания

$$\Delta\widetilde{T}_i = 0,5(\widetilde{T}_i^{max} - \widetilde{T}_i^{min}) \qquad (8)$$

Рассмотрим расширение спектра применений показателя $\widetilde{\boldsymbol{T}}$ на ЧС ЧМС. Ключевым вопросом при построении показателя $\widetilde{\boldsymbol{T}}$ является вопрос о возможности формирования вектора измеряемых параметров ***y***, определяющих состояние ТС и чувствительных к изменениям этого состояния. Для ТС, пусть и достаточно сложных, ответ на такой вопрос несложно найти при анализе технической документации (инструкций) по эксплуатации практически любой технической системы. Для биологических объектов, а, следовательно, и для ЧС ЧМС, формирование вектора ***y*** может составить отдельную и сложную задачу. Указанная задача фактически является задачей функциональной медицинской диагностики, когда по измерениям некоторых определенных параметров необходимо определить наличие или отсутствие той или иной стадии заболевания, связанного с утратой работоспособности человеком. При решении такой задачи можно говорить и о том, что близость или отдаленность значений измерений рассматриваемых параметров от границ допустимых пределов (фактически от *Pt(D)*) позволяет судить и о возможности дальнейшего участия данного персонала (людей) в процессе эксплуатации ЧМС. В большей своей части искомые параметры связаны с контролем сердечнососудистой системы человека как основы обеспечения жизнедеятельности и работоспособности всего человеческого организма в целом [3]. Для измерения указанных параметров существует целая линейка интраскопических приборов, включая дешевые малогабаритные и общедоступные. При этом при осуществлении контроля за состоянием ТС целесообразно выполнять и контроль параметров ЧС ЧМС. Иными словами, задача формирования вектора ***y*** в настоящее время получила достаточное разрешение. Следовательно, существует и очевидная возможность расширения спектра применений показателя $\widetilde{\boldsymbol{T}}$ на ЧС ЧМС. При этом формирование минимаксных оценок (5-8) как для ТС, так и для ЧМС сводится к одинаковым и описанным выше процедурам.

Однотипность процедур формирования минимаксных оценок (5-8) позволяет рассмотреть и один общий алгоритм решения задачи определения остаточного эксплуатационного ресурса ЧМС с учетом функционирования обеих ее частей (ТС и ЧС). Указанный алгоритм может быть представлен следующим образом.

2. Алгоритм определения остаточного ресурса ЧМС. При определении заданного интервала эксплуатации ЧМС как $T = [t_0,t_c]$ можно считать, что модель (4) может быть пригодной для определения остаточного эксплуатационного ресурса ЧМС только при отсутствии экстремумов данной модели на интервале $T = [t_0,t_c]$. Исходя из свойств рассматриваемой модели условия отсутствия данных точек на интервале *T* можно представить как

$$t_0 \le -v_i/a_i \le t_c, \; i \in \overline{1,n}. \qquad (9)$$

С учетом ограничений (9) можно рассматривать задачу определения остаточного эксплуатационного ресурса ЧМС как задачу условной оптимизации. При этом, с учетом качества и количества исходных данных может быть выбран метод максимального правдоподобия с включением с помощью неопределенных множителей Лагранжа логарифмическую функцию правдоподобия ограничений (9). Возможность включения ограничений (9) после логарифмирования функции правдоподобия вытекает из монотонности логарифма и как следствие постоянства положения экстремумов целевой функции после логарифмирования. Для решения рассматриваемой задачи и построения соответствующего алгоритма на избранной основе (метод максимального правдоподобия) необходимо построить функцию правдоподобия, т.е. многомерную функцию распределения, например, ошибок контроля ***y(t)***. Учитывая независимость каналов контроля ***y(t)*** можно строить искомую функцию правдоподобия *F* для каждой компоненты из последовательности (2) раздельно и дальнейшее исследование ограничить рассмотрением только одного i - того канала контроля $y(t)$. Указанная функция F может быть представлена в следующем виде:

$$F=\prod_{j=1}^{p}\frac{1}{\sigma_{ij}\sqrt{2\pi}}\;exp\left[-\frac{1}{2\sigma_{ij}^{2}}\sum_{j=1}^{p}\left(z_j-y_0-v_i t_j-\frac{a_i}{2}t_j^2\right)^2\right] \qquad (10)$$

После логарифмирования зависимость (5) приобретает вид:

$$L=ln F=-p\,ln\sigma_{ij}-p\,ln\sqrt{2\pi}-\frac{1}{2\sigma_{ij}^{2}}\sum_{j=1}^{p}\left(z_j-y_0-v_i t_j-\frac{a_i}{2}t_j^2\right)^2 \qquad (11)$$

В полученную зависимость (11) для учета ограничений необходимо включить через множители Лагранжа (λ_i) соответствующие неравенства. При этом возникает два варианта записи рассматриваемой логарифмической функции правдоподобия, что вызвано возможностью двух вариантов развития процесса приближения к отказу ЧМС, т.е. из-за наличия двухстороннего неравенства (9). В конечном виде логарифмическая функция правдоподобия L и ее максимизация по неизвестным параметрам λ_{1i}, λ_{2i}, a_i, v_i дает возможность получить статистические оценки a и v в виде двух наборов (a^* и v^*) и (a^{**} и v^{**}). После постановки полученных оценок в заданную модель деградации состояния ЧМС (4) несложно найти остаточный эксплуатационных ресурс $\widetilde{T}_k$ как вектор

$$\widetilde{T}=\{\widetilde{T}_k\},\; k=\overline{1,s}, \qquad (12)$$

где s – длина набора (12), т.е. количество решений относительно полученных искомого параметра после подстановки оценок(a^* и v^*) и (a^{**} и v^{**}) в модель (4).

Выбор минимальной $\widetilde{T}_k^{min}$ и максимальной $\widetilde{T}_k^{max}$ компонент из набора (12) дает возможность получить как интервальную оценку $\widetilde{T}_k$ в виде

$$\widetilde{T}_k^{min}\le\widetilde{T}_k\le\widetilde{T}_k^{max}, \qquad (13)$$

так и точечную оценку $\widetilde{T}_i$, определяемую соотношение (7), а так же минимально-максимальную возможную ошибку оценивания $\Delta\widetilde{T}_i$ исходя из выражения (8).

3. Пример использования построенного алгоритма. Поскольку для построенного алгоритма характерны одинаковые процедуры, то можно ограничиться прогнозированием остаточного ресурса технической системы – теплообменного аппарата, применяемого для охлаждения двигателей. Его техническое состояние оценивается по температуре охлаждающей жидкости, измеряемой с погрешностью ±2%. В таблице 1 приведены данные температурного контроля системы охлаждения судового двигателя. Допустимый диапазон изменения рабочей температуры охлаждающей жидкости $t^0C \in [50\div80]^0C$. Срок службы системы охлаждения составляет 10000 часов. Результаты прогнозирования изменений температуры охлаждающей жидкости приведены в таблице 2.

Таблица 1. Результаты измерений температуры

Время измерения, час	1000	1500	2000	4000	5000
Значение t^0C	58,0	59,0	61,0	64,8	67,0

Таблица 2. Результаты прогнозирования остаточного ресурса

Интервал прогноза, тыс. час	**1,5-2,0**	**2,0-4,0**	**4,0-5,0**
Остаточный ресурс $\widetilde{T}_k^{min}$ (тыс.час)	4,4	4,9	5,2
Остаточный ресурс $\widetilde{T}_k^{max}$ (тыс.час)	4,7	5,1	5,4
Среднее значение $\widetilde{T}_k$ (тыс.час)	4,55	5,0	5,3

В соответствии с предлагаемым алгоритмом после проведения расчетов на основе представленных данных было получено значение ресурса для технической системы. Полученная оценка для рассматриваемого в примере агрегата – конкретной ЧМС (судового двигателя), практически совпала с полученной по результатам ремонта указанного корабельного механизма.

Выводы: построенный алгоритм при наличии данных измерений параметров состояния как ЧС, так и ТС дает возможность построить два комплекта оценок (6-8) ТС — $\widetilde{T}_Т$ и ЧС — $\widetilde{T}_Ч$ ЧМС (каждой в отдельности). Учитывая партнерский характер взаимосвязей между рассматриваемыми составляющими (ТС и ЧС) ЧМС и исходя из принципа минимакса, можно найти оценки показателя $\widetilde{T}_0$ для всей ЧМС в целом из следующего выражения:

$$\widetilde{T}_0 = min(\widetilde{T}_Т, \widetilde{T}_Ч). \qquad (14)$$

При этом оценка (14) может рассматриваться как гарантированная по достоверности относительно используемой совокупности исходных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Репин, В.Г.* Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем / *В.Г. Репин, Г.П. Тартаковский*. – М.: Советское радио, 1977. – 432 с.
2. *Абрамов, О.В.* Минимаксный подход в задачах параметрического синтеза аналоговых технических систем / *О.В. Абрамов, А.Н. Розенбаум* // Информатика и системы управления. – 2003. - №2. – С. 67-78.
3. *Анохин, П.К.* Очерки по физиологии функциональных систем. – М.: Медицина. 1975. – 295 с.

DEFINITION OF MAN-MACHINE SYSTEM RESIDUAL RESOURCE

© 2010 A.I. Nikitin

Institute of Automation and Managerial Processes FEB RAS, Vladivostok

The problem of definition of man-machine system residual resource by results of discrete monitoring parameters of condition of the given system while in service is considered. The model of degradation of man-machine system condition on the basis of account the physical laws of driving to the end of parameters condition vector of specified system to boundaries of the set area (area of working capacity or a field of tolerances) is offered. The algorithm of determination statistical estimation of residual operation resource for considered system is constructed. The example of definition of the given index for engineering making man-machine system is brought.

Key words: *man-machine system, residual resource, statistical estimation*

Alexander Nikitin, senior engineer-programmer.
E-mail: anikitin@iacp.dvo.ru