

## Методика прогнозирования технического состояния космического аппарата в процессе летной эксплуатации

А.В. Кошель, М.Н. Кукушкин

В статье представлена методика прогнозирования технического состояния КА в процессе летной эксплуатации. В основу методики положен анализ поведения параметров ТС многомерном фазовом пространстве с последующим выделением и моделированием поведения параметров в сечениях Пуанкаре и выделения обобщенных факторов, влияющих на техническое состояние КА. Разработан алгоритм подготовки исходных данных при использовании данной методики на достижение конкретных результатов по повышению готовности КА. Проведен анализ влияния показателей качества методики прогнозирования готовности КА.

В процессе прогнозирования КА на орбите изменяется его техническое состояние с законами, заложенными в системы КА и законами взаимодействия КА и внешней среды. Результаты наблюдений изменения параметров ТС были представлены в виде многомерного временного ряда:

$$\bar{X}(t_i) = [x_1(t_i), x_2(t_i), x_3(t_i), \dots, x_{N_0}(t_i)]^T, \quad (1)$$

где  $x_j(t)$ ,  $j = 1, 2, \dots, N_0$  - параметр технического состояния;

$t_i$  - момент времени, в который измеряют параметр ТС;

$i = 1, 2, \dots, N$  - номер момента времени.

Для рассматриваемых КА и их систем в результате исследования была выявлена достаточно высокая степень корреляционной связи между параметрами ТС, что имеет существенное значение при сжатии информации о техническом состоянии КА. В настоящее время, как правило, пользуются экспертными оценками для выявления наиболее существенных параметров ТС, однако, это вносит дополнительную неопределенность в результаты оценивания и прогнозирования технического состояния КА [1].

Поэтому было предложено исследовать поведение вектора технического состояния КА в многомерном фазовом пространстве, воспользовавшись методом теории нелинейных динамических систем. Это, с одной стороны, позволило сжать пространство параметров для дальнейшего

анализа и прогноза технического состояния, а с другой - наиболее полно учесть различные виды взаимосвязи между параметрами ТС и тем самым снизить неопределенность, вносимую экспертным выбором определяющих параметров ТС.

В результате применения разработанного подхода получена методика прогнозирования технического состояния КА в процессе летной эксплуатации, схема которой представлена на рис. 1. В блоках 1 и 2 осуществляется сбор и предварительная обработка информации о техническом состоянии КА в процессе летной эксплуатации; в блоке 3 осуществляется выбор соответствующих моделей идентификации параметров ТС КА; в блоке 4 проверяется условие адекватности моделей интерполяции реальному процессу; в блоках 5 и 6 подбираются математические модели прогноза технического состояния на базе допустимого класса моделей и проверяется условие адекватности; в блоках 7 и 8 осуществляется настройка методики и проверка достижения цели прогнозирования; в блоке 9 рассчитываются прогнозные значения параметров технического состояния КА. В блоках 10 - 13 представлены соответствующие классы математических моделей цели прогнозирования, модели обработки данных и модели идентификации и прогнозирования значений параметров ТС КА. Важным моментом в методике является процесс предварительной обработки данных, который заключается в расчете размерности фазового портрета отображения Пуанкаре в многомерном фазовом пространстве и выявлении особенностей такого отображения, что позволяет существенно снизить размерность пространства параметров ТС КА и подобрать небольшое количество математических моделей поведения этих параметров. Размерность сжатого многомерного пространства параметров ТС определяется следующим образом [3]:

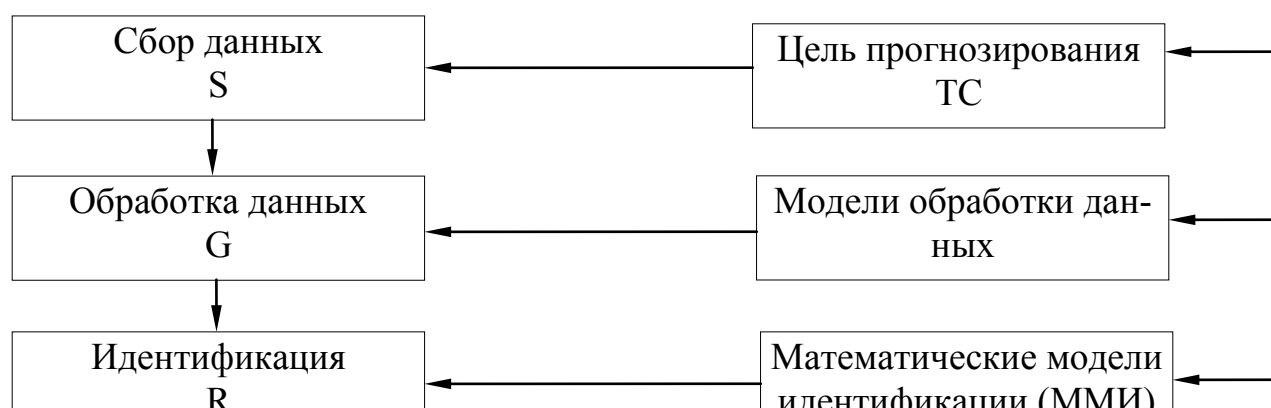
$$d = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln C(r)}{\ln r}, \quad (2)$$

где  $C(r)$  вычислялось, описав в фазовом пространстве сферу радиуса  $r$  вокруг каждой точки  $x_j$  и подсчитав число точек в каждой сфере, т. е.

$$C(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N H(r - [x_i - x_j]), \quad (3)$$

где  $N$  - общее число точек фазового портрета;

$H(s)$  - функция Хевисайда ( $H(s) = 1$  при  $s > 0$  и  $H(s) = 0$  при  $s < 0$ ).



Получив отображение Пуанкаре и пользуясь этой размерностью, получаем пространство определяющих параметров ТС КА, для которых подбираются соответствующие математические модели изменения и прогнози-

вания технического состояния, характеризуемые вектором параметров методики  $\mathbf{t}$ , и вектором показателя качества  $\mathbf{F}$  для которых заданы соответствующие области допустимых значений  $\Xi$  и  $\Phi$  [2]:

$$\bar{\mathbf{t}} = (\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_r)^T \quad \bar{\mathbf{t}} \in \Xi, \quad (4)$$

$$\bar{\mathbf{F}} = (\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_r)^T \quad \bar{\mathbf{F}} \in \Phi. \quad (5)$$

Понятно, что не любой выбор  $\mathbf{t}$  из  $\Xi$  будет удовлетворять поставленной задаче. Поэтому был разработан алгоритм настройки методики на соответствующие временные ряды параметров ТС и цели повышения готовности КА. На основе математической модели достижения требуемой цели проводится анализ влияния вектора показателя качества методики на готовность КА. Для проведения такого анализа необходимо прежде всего ограничить область допустимых значений показателей качества методики, исключив неэффективные в смысле Парето векторы  $\mathbf{F}$  из  $\Phi$ :

$$\{\bar{\mathbf{F}}^*\} = \underset{\mathbf{t} \in \Xi}{\text{opt}} \mathbf{F}(\bar{\mathbf{z}}), \quad (6)$$

где  $\bar{\mathbf{F}}$  - вектор показателей качества методики из ограниченной области  $\Phi$ ;

$\bar{\mathbf{F}}^*$  - вектор показателей качества методики из области Парето  $\Phi_{\Pi}$ ;

$\bar{\mathbf{t}}$  - вектор параметров методики из ограниченной области допустимых значений  $\mathbf{t}$  из  $\Xi$ .

В результате решения такой задачи получена область Парето для векторов показателей качества методики  $\Phi_{\Pi} = \{\bar{\mathbf{F}}^*\}$ . Теперь в этой области, воспользовавшись выявленной функциональной зависимостью готовности от показателей качества методики, а также критерием (4), получаем  $\mathbf{F}^{**}$ , которые позволяют повысить готовность КА:

$$\mathbf{K}_r(\bar{\mathbf{F}}^*)_{\bar{\mathbf{F}}^* \in \Phi_{\Pi}} > \mathbf{K}_{r0} \Rightarrow \bar{\mathbf{F}}^{**} \Leftrightarrow \bar{\mathbf{t}}^{**},$$

где  $\Phi_{\Pi}$  - область Парето показателей качества методики;

$\mathbf{K}_{r0}$  - показатель готовности, полученный при существующих методиках;

$\bar{\mathbf{t}}^{**}$  - параметры методики, которые позволяют получить выигрыш в  $\mathbf{K}_r$  при ее использовании. Показателям качества  $\mathbf{F}^{**}$  соответствуют свои параметры методики  $\bar{\mathbf{t}}^{**}$ , а, следовательно, и математические модели прогноза технического состояния КА.

Таким образом данная методика позволяет повысить коэффициент готовности применения КА.

### **Литература**

1. Ефимов В.М., Галактионов Ю.К., Шушинянова Н.Ф. Анализ и прогноз временных рядов методом главных компонент. Новосибирск.: Наука, СО, 1988.
2. Мун Ф. Хаотические колебания. Пер. С англ. М.: Мир, 1990.
3. Сухорученков В.И. Математические модели и методы анализа характеристик летательных аппаратов. МО СССР, 1989. - 340 с.