

**В. Н. Спиридонов**, кандидат технических наук,  
доцент кафедры математического моделирования  
и информационных систем в экономике  
Университета таможенного дела и финансов

### **О ДВУХ КЛАССАХ МОДЕЛЕЙ В КОНТУРЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

*Рассмотрены два класса прогнозирующих моделей бортовой аппаратуры КА, предлагаемых для решения различных задач в контуре управления КА. В подсистеме формирования командно-программной информации реализован подход, заключающийся в решении задачи прогноза состояния бортовых систем КА для сформированной программы управления на модели БА. Результаты моделирования предназначены для предоставления полной информации о состояниях бортовых систем операторам сектора управления во время штатного управления КА, передаче управления дежурными сменами, анализе нештатных ситуаций. Используемая модель относится к классу моделей в пространстве состояний системы. В подсистеме обработки телеметрической информации предлагается использовать прогнозирующую модель для решения задачи контроля и диагностики состояния бортовых систем КА. Предлагаемая модель относится к классу моделей в пространстве выходных сигналов системы. Анализ проблем, связанных с их методической и программной реализуемостью, выполнен с использованием теории систем.*

*Ключевые слова: моделирование бортовой аппаратуры КА; задача прогноза состояния системы; классы прогнозирующих моделей; модель в пространстве состояний; модель в пространстве выходных сигналов.*

*In the article two classes of predictive models of spacecraft onboard equipment proposed for solving various tasks in the spacecraft control circuit are considered. In the subsystem of forming of command-program information the approach consisting in the decision of task of spacecraft onboard systems states prognosis for the formed control program on a model is realized. The modeling results are intended for the presentation of complete information about the spacecraft onboard systems states to the operators of control sector during the regular spacecraft control, to the control transfer by duty groups, analysis of non-regular situations. The used model belongs to the class of models in space of the system states. In the subsystem of telemetric information processing it is suggested to use a predictive model for decision of test and diagnostics task of spacecraft onboard systems states. The offered model belongs to the class of models in space of the output signals system. The analysis of the problems related with their methodical and software realization is executed with using of systems theory.*

*Key words: modeling of spacecraft onboard equipment; task of predicting the states of the system; classes predictive models; the model in the space of state; model in the space of output signals.*

© В. Н. Спиридонов, 2015

---

**Постановка проблемы.** Одним из основных направлений развития систем управления космическими аппаратами является повышение уровня автоматизации процесса управления КА. Развитие этого направления должно обеспечить:

- повышение оперативности обработки информации и принятия решений по управлению КА;
- уменьшение объема информации, циркулирующей в контуре управления между бортовым и наземным комплексами управления;
- повышение пропускной способности наземного комплекса управления.

Характерной тенденцией этого направления является применение прогнозирующих моделей бортовой аппаратуры (БА) для решения различных задач в контуре управления КА.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В подсистеме формирования командно-программной информации (КПИ), например в работе [1], обоснован подход, заключающийся в решении задачи прогноза состояния бортовых систем КА для сформированной программы управления на модели БА. Результаты моделирования предназначены для представления полной информации о состояниях бортовых систем операторам сектора управления во время штатного управления КА, передаче управления дежурными сменами, анализе нештатных ситуаций.

В подсистеме обработки телеметрической информации (ТМИ) в работах, приведенных в обзоре [2], предлагается использовать прогнозирующую модель для решения задачи контроля и диагностики состояния бортовых систем КА.

Рассматривая методы решения задач в подсистемах системы управления КА, необходимо отметить, что различаются не только применяемые методы моделирования, но и методические основы, подходы к моделированию, представлению и описанию в модели такого сложного технического объекта, каким является бортовая аппаратура КА. Более того, в разных работах зачастую существенно различаются даже основные понятия, например понятие задачи прогноза состояния системы. Такое положение сложилось из-за того, что “в практике управления космическими аппаратами задача управления разделена на две независимые задачи: задачу наблюдения (оценки состояния объекта по результатам измерений) и собственно задачу управления (расчета и выдачи управляющих воздействий)” [2], что приводит к известным проблемам системного характера. Способ решения указанных проблем известен: при разработке математического обеспечения систем управления перспективных КА необходимо использовать системный подход, а в качестве единого методического аппарата – теорию сложных систем [3].

Кроме того, наличие в контуре управления КА нескольких моделей влечет за собой сложности в разработке математического и программного обеспечения АСУ КА, их высокую стоимость, большие сроки разработки и обучения операторов секторов управления [4]. Следует ожидать, что сокращение количества моделей, а возможно, и применение одной модели бортовой аппаратуры в контуре управления КА позволит в существенной мере решить перечисленные ниже проблемы.

Первым шагом на пути применения модели в контуре управления КА является выбор класса модели, так как именно класс модели определяет возможность создания и применения модели для решения тех или иных задач.

**Цель статьи** – анализ классов моделей, предлагаемых для решения задач в контуре автоматизированного управления КА, и анализ проблем, связанных с их реализацией.

---

**Изложение основного материала.** Бортовая аппаратура космического аппарата, безусловно, является сложной системой. Поэтому для исследования и моделирования этого класса сложных систем естественным решением является использование научного аппарата теории систем и теории моделирования сложных систем.

Теория систем предлагает целостный подход к рассмотрению процесса функционирования динамических систем, сформулированных в [5; 6]:

- 1) система функционирует во времени, в каждый момент времени система находится в одном из возможных состояний;
- 2) на вход системы могут поступать входные сигналы;
- 3) система способна выдавать выходные сигналы;
- 4) состояние системы в данный момент времени определяется предыдущим состоянием и входными сигналами, поступившими в данный момент времени и ранее;
- 5) выходной сигнал в данный момент времени определяется состояниями системы и входными сигналами, относящимися к данному и предшествующему моментам времени.

Первое из перечисленных предположений отражает динамический характер процесса функционирования системы в пространстве и времени, подчеркивает, что процесс функционирования системы протекает как последовательная смена состояний системы под действием внешних и внутренних причин. Второе и третье описывает взаимодействие с внешней средой. Четвертое и пятое предполагает два важных аспекта, связанных с определением реакции систем на внутренние факторы и воздействием внешней среды. С одной стороны, здесь учитывается то обстоятельство, что многим явлениям и процессам свойственно последствие, вследствие которого тенденции, определяющие поведение системы в будущем, зависят не только от того, в каком состоянии находится система в настоящий момент времени. С другой – отражается принцип физической реализуемости: система не реагирует в данный момент времени на “будущие” факторы и воздействия внешней среды.

Одной из классических задач теории систем [5; 6] является задача прогноза состояния системы, базирующаяся на описании функционирования системы в пространстве состояний переходной функцией состояния:

$$F = f : X \times T \times U \times T \rightarrow X , \quad (1)$$

где:  $F$  – переходная функция;

$X$  – множество состояний системы  $x(t)$ ;

$U$  – множество значений входных воздействий  $u(t)$ ;

$T$  – множество моментов времени, причем  $T$  – некоторое упорядоченное подмножество множества вещественных чисел  $R$ , т. е.  $T \subseteq R$ .

Функция  $f$  устанавливает отображение четверок  $t_1, t_0, x(t_0), u$  на множество  $X$ , содержащее элементы  $x$ . Считают, что переходная функция состояния  $f$  определена для всех  $t \geq t_0$ , а при  $t = t_0$  для всех  $t \in T$ ,  $x \in X$  и  $u \in U$  имеет место равенство:

$$f(t_0, t_0, x(t_0), u) = x(t_0) . \quad (2)$$

---

Согласно теории систем считают, что знание состояния системы  $x(t_0)$  в момент времени  $t = t_0$  и входного воздействия  $u$  на отрезке времени  $t_0, t_1$  является необходимым и достаточным условием, позволяющим определить состояние рассматриваемой системы  $x(t_1)$  в момент времени  $t = t_1$ :

$$x(t_1) = f(t_1, t_0, x(t_0), u(t_0, t_1)) . \quad (3)$$

Выходные величины системы  $y(t)$  могут быть определены, если заданы входные воздействия и известна переходная функция состояния системы. Так как состояние системы  $x(t)$  уже включает в себя эффект входного воздействия, то справедливо следующее равенство:

$$y(t) = p(t, x(t)) . \quad (4)$$

При сделанных предположениях рассматриваемую систему считают динамической.

Выражение (3) определяет необходимые и достаточные условия для решения задачи прогноза состояния динамической системы. Подставив выражение (3) в выражение (4), получим в общем виде постановку задачи прогноза выходных величин динамической системы:

$$y(t_1) = p\left[t_1, f(t_1, t_0, x(t_0), u(t_0, t_1))\right] . \quad (5)$$

Если моделирование системы базируется на выражении (3), то модель относится к классу моделей в пространстве состояний, если на выражении (4) или (5), модель относится к классу моделей в пространстве выходных сигналов.

В рамках реализации подхода, изложенного в работе [1], рассматриваются все этапы разработки и применения прогнозирующей модели БА КА класса в пространстве состояний для решения задач в подсистеме формирования КПИ.

В работе [7] для решения задач управления выполнена формализация класса технических объектов, к которому отнесена бортовая аппаратура КА. При сделанных в работе допущениях объект моделирования отнесен к одному из классов сложных систем – к классу дискретных динамических систем с постоянной структурой. Приведенная характеристика объекта моделирования и принятые в работе допущения отражены в постановке задачи моделирования и математической модели. В качестве задачи моделирования рассматривается классическая задача теории систем – задача прогноза состояния системы, базирующаяся на описании функционирования системы в пространстве состояний переходной функцией состояния. Задача сформулирована следующим образом: задано состояние системы в начальный момент времени и множество управляющих воздействий, выдаваемых во времени. Требуется определить состояния системы на выданные управляющие воздействия. Постановка задачи прогноза состояния дискретной динамической системы с постоянной структурой выполнена в терминах теории множеств. Разработанная математическая модель описывает процесс управления системой в пространстве состояний.

---

Для обеспечения полноты решения задачи прогноза состояния системы возникла необходимость представления в модели состояний всех управляемых подсистем и элементов системы, а также команд управления системой, влияющих на управляемые состояния. Это приводит к проблемам размерности модели системы, что исключает возможность использования известных методов моделирования, заключающихся в представлении и описании в модели всех возможных переходов в пространстве состояний системы, которое может достигать астрономических величин. Решение задачи прогноза состояния сложных объектов и систем требует разработки и применения специальных методов моделирования [8].

В работе [8] предложен метод моделирования одного из классов сложных систем – дискретных динамических систем с постоянной структурой. Метод базируется на применении переходных функций для описания переходов в пространстве состояний системы. Математическая модель управления системы с постоянной структурой в пространстве состояний представлена таблицей переходных функций и набором переходных функций, описывающих правила переходов элементов системы в пространстве состояний.

В работе [9] рассмотрена задача моделирования бортовой аппаратуры КА методом переходных функций. В соответствии с задачей исследования выбрано формализованное пространство состояний элементов объекта, представляющее собой совокупность трех видов технического состояния: функционирования, резервирования, работоспособности. Формализация пространства состояний элементов объекта позволила формализовать и переходные функции состояния. Компактно реализуемые в вычислительной среде в виде небольшого комплекта подпрограмм они позволяют существенно снизить размерность модели. Рассмотрены переходные функции объекта моделирования в выбранном пространстве состояний.

Метод прошел апробацию при моделировании бортовой аппаратуры ряда космических аппаратов. Максимальная полученная размерность модели, определяемая размером таблицы переходных функций, составляет 860 при следующих характеристиках: количество команд управления – 120, количество управляемых элементов БА – 99, размерность списка элементов таблицы – 6, количество переходных функций – 5. Пространство состояний моделируемого объекта составляет  $8^{99}$  состояний.

В рамках реализации подхода [1] разработана методика создания модели сложной системы методом переходных функций [10]. Методика позволяет разработчикам работать в ручном и автоматизированном режимах и может быть реализована подсистемой автоматизированной системы проектирования БА КА. Методика использует данные, приведенные в эксплуатационно-технической документации, – инструкции по управлению КА. Рассмотрены также вопросы оценки точности модели БА [11], приведены методики решения задач подсистемы формирования КПИ [12].

В подсистеме обработки ТМИ общей тенденцией работ, представленных в обзоре [2], является применение прогнозирующей модели БА для решения задачи контроля и диагностики состояния бортовых систем КА. Задача прогноза состояния формулируется следующим образом: “прогноз состояния – логические соотношения между управляющими воздействиями (командами и программами управления, алгоритмами работы подсистем, внешними учетными воздействиями) и ТМ-параметрами, характеризующими состояние БА КА, рассчитанные на дискретные моменты времени. Он представляет собой кусочно-постоянную функцию на контролируемом отрезке време-

---

ни (текущие образы состояния). При этом исходим из того, что реакция КА на управляющее воздействие представляет уникальный набор телеметрических параметров, однозначно характеризующих состояния бортовых систем КА”.

Отметим, что данная формулировка задачи прогноза состояния существенно отличается от классической формулировки и предполагает прогноз не состояний системы, а значений выходных сигналов системы, измеряемых ТМ-параметрами. К тому же сделанное в работе допущение противоречит положениям теории систем о динамических системах, рассмотренных ранее. Предлагаемая модель относится к классу моделей в пространстве выходных сигналов. К основным проблемам, которые возникают при разработке модели этого класса, можно отнести существенно возросшую размерность модели и пространства выходных сигналов, представляемых в модели системы, необходимость разработки математической модели и метода моделирования, отсутствие эксплуатационно-технической документации на объект, необходимой для создания модели.

Возможным способом решения данной задачи является применение положений теории систем для динамической системы. Согласно теории сложных систем значения выходных сигналов динамической системы определяются состоянием системы и временем измерения выходного сигнала (4) и зависят от того, каким образом система пришла в данное состояние под действием управляющих воздействий (5). Отсюда следуют два возможных способа решения задачи прогноза выходных сигналов системы. Первый способ предполагает последовательное решение задачи прогноза состояний системы (3) для всех управляющих воздействий, выданных в известном интервале времени, а затем на его основе решение задачи прогноза выходных сигналов (4) в этом интервале. Второй способ предполагает возможность решения задачи прогноза выходных сигналов в одном цикле выдачи управляющего воздействия (5). Отметим, что для обоих возможных способов решения задачи прогноза выходных сигналов решение задачи прогноза состояний системы является необходимым условием.

Очевидно, что первый способ решения задачи прогноза выходных сигналов является более предпочтительным в случае решения задачи прогноза состояния на модели в подсистеме формирования КПИ. При этом достаточно решения задачи прогноза выходных сигналов, базирующегося на выражении (4). Решение этой задачи, представляющее собой преобразование кортежа состояний системы в кортеж значений выходных сигналов системы, представляется более простым, чем для второго способа. Но сразу возникает вопрос о необходимости такого преобразования, так как одной из задач системы контроля и диагностики состояния бортовых систем КА является решение обратной задачи. Ответ на этот вопрос может дать решение задачи сравнения прогнозируемых и фактических состояний бортовых систем КА в комплексе с другими задачами подсистемы, что делает данное направление исследований перспективным.

**Выводы из данного исследования и перспективы дальнейших разведок в данном направлении.** Анализ рассмотренных классов прогнозирующих моделей с позиций теории сложных систем позволяет сделать следующие выводы.

1. Возможно решение задачи прогноза состояния и создание модели класса в пространстве состояний системы для бортовой аппаратуры КА. Данный класс моделей является основой математического и программного обеспечения подсистемы формирования командно-программной информации ряда космических аппаратов, имеет методическое обоснование и практическую апробацию.

---

2. Задача построения модели в пространстве выходных сигналов требует обязательного решения задачи прогноза состояния системы и с позиций теории сложных систем самостоятельного решения не имеет, по крайней мере, для динамических систем.

Развитие направления применения прогнозирующих моделей класса в пространстве состояний бортовой аппаратуры для решения различных задач в контуре управления КА и прежде всего решения задачи контроля и диагностики состояния бортовой аппаратуры КА является перспективным направлением исследований. Решение этой задачи позволит перейти к единой модели бортовой аппаратуры в контуре автоматизированного управления КА.

**Список использованных источников:**

1. Колюхов С. Н. Об одной задаче моделирования полета космического аппарата / С. Н. Колюхов, А. Г. Меланченко, В. Н. Спиридонов // Ракетно-космическая техника. – 1989. – Вып. 2. – Сер. 1. – С. 32–37.
2. Загоруйко А. Н. Методы и модели контроля и диагностики бортовых систем космического аппарата : збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил / А. Н. Загоруйко. – 2009. – Вип. 3 (21).
3. Беляев М. Ю. Научные эксперименты на космических кораблях и орбитальных станциях / Беляев М. Ю. – М. : Машиностроение, 1984. – 264 с.
4. Спиридонов В. Н. К вопросу применения модели в контуре автоматизированного управления сложным техническим объектом / В. Н. Спиридонов, С. А. Разгонов // Вестник Академии таможенной службы Украины. Серия: Технические науки. – 2013. – № 1 (49). – С. 84–87.
5. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем / Бусленко Н. П. – М. : Наука, 1978. – 400 с.
6. Бусленко Н. П. Лекции по теории сложных систем / Бусленко Н. П., Коваленко И. Н., Калашников В. В. – М. : Советское радио, 1973. – 440 с.
7. Спиридонов В. Н. Построение математической модели дискретных динамических систем с постоянной структурой / В. Н. Спиридонов // Вестник Академии таможенной службы Украины. Серия: Технические науки. – 2009. – № 2 (42). – С. 73–79.
8. Спиридонов В. Н. Метод моделирования дискретных динамических систем с постоянной структурой / В. Н. Спиридонов // Проблемы управления и информатики. – 2010. – № 6. – С. 55–62.
9. Спиридонов В. Н. Моделирование сложных технических объектов: состояния и переходные функции / В. Н. Спиридонов // Вестник Академии таможенной службы Украины. Серия: Технические науки. – 2010. – № 1 (43). – С. 119–125.
10. Спиридонов В. Н. Методика создания модели сложной системы методом переходных функций / В. Н. Спиридонов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – № 1 (42). – С. 122–126.
11. Спиридонов В. Н. Методика верификации программ управления космического аппарата на основе прогноза состояния бортовой аппаратуры / В. Н. Спиридонов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 2 (69). – С. 72–78.
12. Спиридонов В. Н. Оценка точности модели бортовой аппаратуры космического аппарата, моделируемой методом переходных функций / В. Н. Спиридонов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 3 (70). – С. 103–106.