

УДК 621.039.56

## Модель функционирования бортовых систем космического аппарата в комплексе с реакторной установкой на основе сетей Петри

С.А. Качур, Е.Н. Давиденко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur\_62@mail.ru

Статья поступила 24.06.2021 г.; после доработки 25.06.2021 г.

### Аннотация

Предложена быстродействующая компактная модель функционирования космического аппарата с реакторной установкой с использованием циклограмм работы бортовых систем на основе сетей Петри.

**Ключевые слова:** космический аппарат, реакторная установка, сети Петри, модель, циклограмма.

## Model of the functioning of the onboard systems of the spacecraft in combination with a reactor installation based on Petri nets

S.A. Kachur, E.N. Davidenko

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur\_62@mail.ru

Received 24.06.2021 y.; received in final form 25.06.2021 y.

### Abstract

A high-speed compact model of the functioning of a spacecraft with a reactor installation using cyclograms of the operation of onboard systems based on Petri nets is proposed.

**Keywords:** spacecraft, reactor plant, Petri nets, model, cyclogram.

### Введение

В статьях, посвященных управлению космическими или летательными аппаратами, обычно в качестве модели ОУ принимается математическая модель движения аппарата без учета особенностей функционирования РУ [1, 2]. Ведутся разработки алгоритмов оптимального управления, позволяющих эффективно решать задачи управления движением, прогнозирования траектории движения космического аппарата (КА), рассматриваются различные подходы к управлению полетом КА [3].

Однако управление полетом КА требует целостного рассмотрения функционирования всего комплекса бортовых систем и представляет собой управление параметрами его состояния с учетом

РУ [4]. Одной из проблем управления современными КА и КА будущего является повышение автономности их полета. В этом случае управление параметрами состояния КА выполняет бортовой комплекс автоматического управления. Целенаправленное изменение некоторых параметров состояния КА возможно только выполнением достаточно сложных операций.

Изменение состояния КА описывается обычно на двух уровнях в виде:

- 1) циклограмм изменения режимов функционирования бортовых систем при выполнении операций;
- 2) циклограмм изменения работы отдельных блоков. Управляющее воздействие в случае автономного полета представляет собой команды, выдаваемые комплексом средств ав-

томатического управления, и команды от других бортовых систем.

Основные методы решения задачи оптимального управления могут быть с успехом использованы для систем со случайными изменениями структуры. Однако если процесс смены структур является немарковским и множество структур недетерминировано, и система функционирует в условиях неопределенности, то необходимо, приняв рассмотренные методы за базис, модифицировать их с учетом модели процесса. Кроме того, рассмотренные методы целесообразно рассматривать совместно с моделями СП. В статье показана необходимость такого синтеза на примере упрощенного описания функционирования космического аппарата (КА), одним из блоков которого является реакторная установка.

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является создания быстродействующей компактной модели функционирования космического аппарата с реакторной установкой с использованием циклограмм работы бортовых систем на основе сетей Петри.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) анализ возможностей алгоритмов адаптивного управления динамическими объектами в условиях неопределенности;
- 2) определение особенностей построения систем управления реакторной установкой;
- 3) разработка принципов построения модели функционирования бортовых систем космического аппарата в комплексе с реакторной установкой на основе сетей Петри.

### **Адаптивное управление динамическими объектами в условиях неопределенности**

Проблеме управления объектами математические, модели которых известны с точностью до параметров, когда для этих параметров предполагаются заданными лишь какие-то их достаточно грубые априорные оценки, посвящено большое количество публикаций. Но в этих публикациях рассматривались лишь модели объектов, линейных по параметрам. Причины такой избирательности, по-видимому, лежат не только в том, что этот класс объектов встречается чаще, но и в том, что для таких объектов задачи построения гарантированных оценок, основанные на использовании процедур пересечения мно-

жеств, решаются существенно проще, чем для класса объектов, нелинейных по параметрам.

Главное отличие адаптивного управления состоит в том, что параллельно с процессом управления реализуется процесс оценивания параметров объекта, причем полученные оценки непосредственно используются для определения управления. Конечный момент метода синтеза адаптивного управления, который базируется на множественном подходе, — предположение о том, что для вектора параметров объекта управления, вектора состояния системы, векторов неконтролируемых возмущений и погрешностей измерений известны некоторые априорные оценки в виде заданных множеств в соответствующих пространствах. Эта априорная информация используется в процедурах множественной фильтрации и множественной идентификации. Получаемые в дальнейшем множественные апостериорные оценки также используются при расчете по следующим управляющим воздействиям. Важнейшие ранние результаты в этой области обобщены в [5].

Большинство существующих методов синтеза управления в системах, математическая модель которых неизвестна, разделяется на два этапа. Сначала на объекте управления проводятся эксперименты, по результатам которых идентифицируется модель системы, а затем на основе полученной модели проектируется управление. Если по ряду причин построить точную модель не представляется возможным и сохраняется немоделируемая часть динамики системы, т.е. неопределенность, то построенное таким образом управление может оказаться неэффективным из-за ошибок моделирования. Поэтому в последние годы развиваются альтернативные подходы, в которых комплексно и взаимосогласованно рассматриваются все этапы проектирования, включая идентификацию или уточнение модели, синтез обратной связи и оценивание состояния, если используется описание в пространстве состояний

Предлагается для разработки описания систем управления (нелинейных с недетерминированным поведением) в условиях неопределенности использовать методы построения моделей стохастических систем со случайной структурой и модели иерархических адаптивных субоптимальных САУ.

Обеспечение безопасности эксплуатации РУ предполагает в качестве основного направления исследования объекта, описанного предложенной моделью, рассмотрение его управляемости. Во многих практических задачах аналитические

и структурные подходы анализа управляемости оказываются неприемлемыми по причине чрезмерной громоздкости или недостаточной разработки. В этих случаях прибегают к численному эмпирическому изучению управляемости путем моделирования. Сложность объектов управления породила необходимость в разработке новых методов, подходов и моделей управления. Поэтому разработки методов анализа управляемости таких систем актуальны.

Структура адаптивных оптимальных САУ (АОСАУ) в значительной степени определяется принципами разделения. Согласно этим принципам оптимальная (в линейно-квадратичной задаче) или субоптимальная (в нелинейной задаче) система состоит из оптимальной (субоптимальной) системы оценивания и идентификации и системы оптимального управления, построенной для условий точного измерения вектора состояния и вектора параметров, но использующей оценки этих величин (выходные сигналы системы оценивания и идентификации).

В неоптимальных вариантах (когда идентификатор соединяется с системами регулирования традиционных типов) соответствующие структуры имеют эвристическое происхождение. Однако структура АОСАУ, как следует из принципа разделения, имеет достаточно общее и строгое обоснование. Эта процедура в общем виде представлена на рис. 1.



Рис.1. Общая структура АОСАУ с полной моделью.

Создание АО САУ на базе СП позволяет синтезировать достоинства двух рассмотренных выше типов САУ, и, следовательно, даст возможность повысить эффективность управления РУ.

### Особенности построения систем управления реакторной установкой

Решение проблемы безопасности эксплуатации РУ и объектов, использующих в качестве энергоблоков РУ, неразрывно связано с рассмотрением задач контроля параметров, их оптимизации, выбора оптимальной структуры системы в процессе функционирования. Формализация методов и алгоритмов оптимизации является базой для разработки соответствующих нормативных документов, регламентирующих процесс эксплуатации РУ, и систем контроля и управления.

В соответствии с определением, динамическая система случай структуры в каждый момент времени  $t$  может иметь одну из  $s$  детерминированных структур. Обычно рассматривается случай, когда номер структуры определяется случайным марковским процессом, характеристики которого зависят от внешних условий, от значений фазовых координат системы или от ее надежности в помехозащищенности. Наличие мультиструктуры со случайными переходами вносит особенность в задачу оптимизации таких систем. Эта особенность состоит в том, что в процессе оптимизации необходимо оценивать структуру, в которой находится система. Основной задачей оптимизации является определение оптимальных условий или оператора управления в присутствии помех при заданной информации об объекте управления в виде уравнений, характеризующих его состояние и эволюцию с учетом измерений фазовых координат.

Выбор критерия оптимальности должен производиться, исходя из смысла решаемой задачи. При этом следует иметь в виду, что от вида критерия, используемого объема априорной информации, а также возможностей простой реализации зависит практическая эффективность алгоритмов оптимального управления.

При применении терминальных и нетерминальных критериев для определения оптимального управления без учета ограничений на управление применяются классические вариационные методы, а с учетом ограничений — принцип максимума, динамическое программирование.

Основные методы решения задачи оптимального управления могут быть с успехом ис-

пользованы для систем со случайными изменениями структуры. Однако если процесс смены структур является немарковским и множество структур недетерминировано, и система функционирует в условиях неопределенности, то необходимо, приняв рассмотренные методы за базис, модифицировать их с учетом модели процесса.

Задачи синтеза оптимального управления в мультиструктурных системах составляют основную проблематику статистической теории оптимальных решений. Для исследования широко применяется математическое описание процессов и динамических систем в фазовом пространстве состояний и теоретико-вероятностные методы оптимальных статистических решений. Однако наличие случайной структуры сигналов и систем приводит к усложнению задач управления и требует дополнительного развития методов исследования. Поскольку для повышения быстродействия процесса управления РУ в работе предложено использовать описание стохастических систем и их соединений на основе расширения СП, то существующие методы оптимального управления рассмотрены совместно с моделями СП. Такой подход к оптимизации параметров и структуры объекта в отличие от существующих (аналитических, теоретико-вероятностных, статистических и др.) можно назвать сетевым, поскольку управляющие воздействия определяются в процессе моделирования сети Петри.

Кроме того, специфика управления РУ связана с назначением объекта управления. РУ являются не только энергоблоками АЭС, но и используются в качестве двигателей космических аппаратов, морских подводных и надводных судов. Основные проблемы безопасности транспортных РУ совпадают с проблемами эксплуатации энергоблоков АЭС. Однако для транспортных РУ необходимо рассмотрение их функционирования в комплексе с основными блоками объекта управления. На примере космического аппарата (КА), одним из блоков которого является реакторная установка, покажем разработку упрощенного описания такого объекта управления.

### **Принципы построения модели функционирования бортовых систем космического аппарата в комплексе с реакторной установкой на основе сетей Петри**

Предложенное в работе [6] расширение сетей Петри (СП) может служить инструментарием для описания работы КА с РУ, как на струк-

турном, так и функциональном уровне. Применение такой сетевой модели позволяет:

- 1) снизить объем описания (следовательно, его сложность) КА;
- 2) рассматривать асинхронные процессы функционирования различных бортовых систем КА;
- 3) учитывать причинно-следственные зависимости: а) структурно – между бортовыми системами, б) функционально – при выполнении команд;
- 4) естественным образом моделировать параллельность работы бортовых систем КА;
- 5) рассматривать КА в целом, не выделяя отдельные бортовые системы при наличии потока событий (изменения внешних воздействий и/или приходе множества команд).

Сетевая модель КА с РУ — это синтез на базе СП циклограмм изменения состояния КА, описания структуры бортового комплекса и набора команд КА, позволяющий организовать оперативное реагирование на внешние воздействия за счет снижения сложности описания и его самообучаемости (т.е. изменения вероятностей связей между бортовыми системами и формирования сдерживающих событийных гипердуг) без нарушения целостности функционирования КА.

Такая модель может служить основой адаптивной САУ на базе СП, в качестве объекта управления которой выступают бортовые системы КА.

Моделирующие возможности предлагаемой модели определяются возможностями математического аппарата СП, в частности его расширения [6]. В основу данного расширения СП положены стохастические и функциональные СП. Это позволяет описывать стохастические процессы, определять условия их преобразования, организовывать память и задавать любые функции, сопоставляя их переходам СП.

При разработке модели будем использовать следующие представления:

- 1) команда ( $K_i$ ) — совокупность операций, описываемая СП (операция сопоставлена переходу СП), предназначенная для установки параметра  $x_i$  в значение  $a_i$ ;
- 2) операция ( $OP_j$ ) — последовательность действий (в виде функций, систем уравнений, программ), в результате которых определяется вектор управляющих сигналов, подаваемый на бортовые системы;
- 3) бортовая система ( $BC_k$ ) — стохастическая система, описываемая системой дифференциальных уравнений первого порядка; в результате ее работы могут вырабатываться сигналами

лы, определяющие код команды, которая либо непосредственно передается на другие бортовые системы, либо передается на бортовой комплекс автоматизированного управления.

Сетевая модель КА с РУ состоит из двух взаимосвязанных частей: функциональной и структурной. Функциональная часть модели содержит описание всего множества команд в виде единой, безизбыточной относительно операций СП. Сдерживающие событийные гипердуги отражают совместимость операций. Структурная модель включает СП, переходам которой сопо-

ставлены бортовые системы, а дугам — связи между этими системами. Обобщенная схема модели приведена на рис. 2(а), а вид СП ее структурной и функциональной частей соответственно на рис. 2(б) и 2(в). Помимо условий, связанных с логикой функционирования систем, переходам первой части модели сопоставлено условие подключения БС при определенных операциях, а переходам второй части модели — условие выполнения операции при определенных командах.

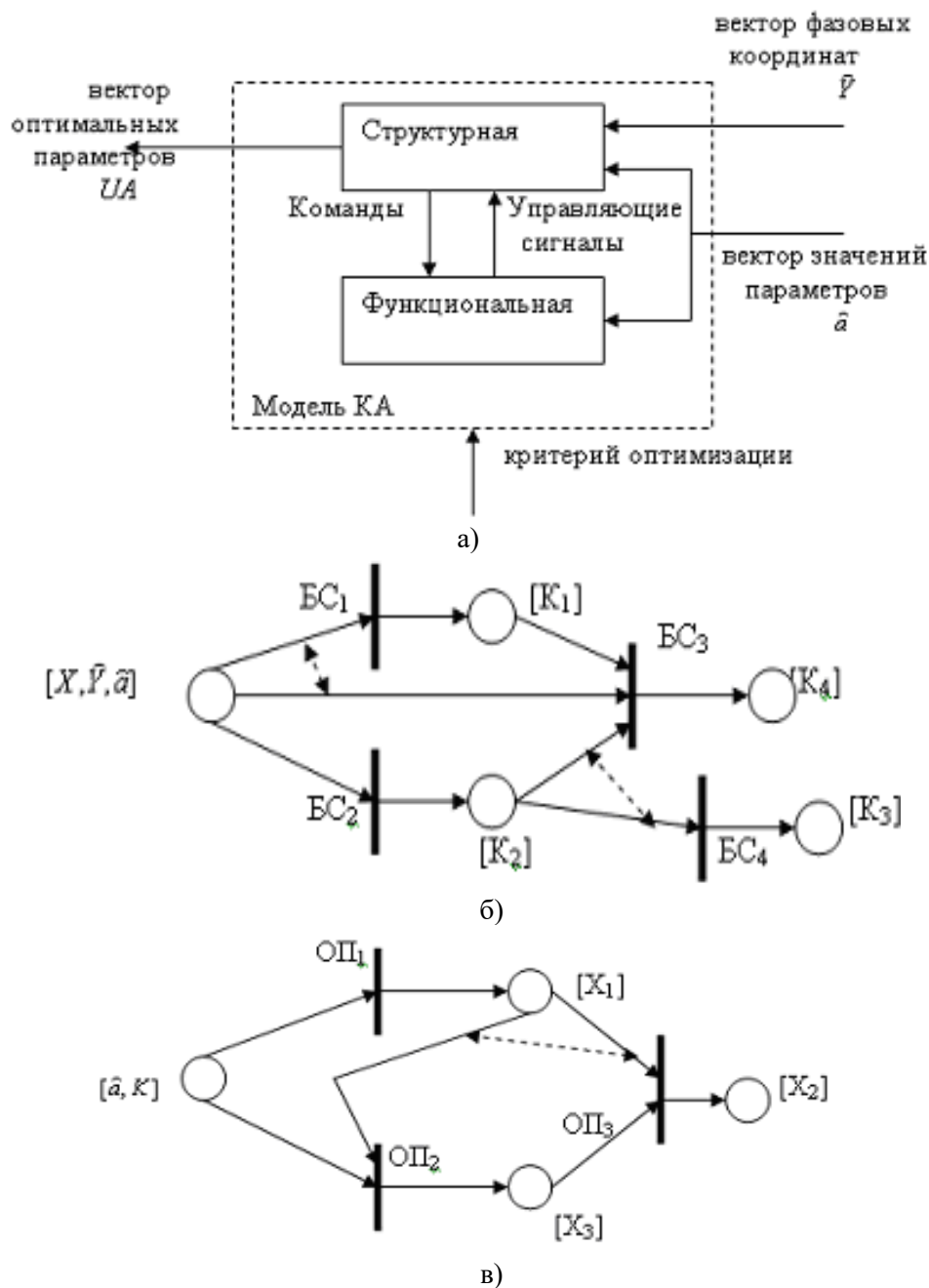


Рис. 2. Схема сетевой модели КА с РУ

Для наглядности представления связи между двумя частями модели КА управляющие сигналы  $(\hat{a}, \hat{Y}, X = \bigcup_i x_i, K = \bigcup_i K_i)$  подаются на один переход и алгоритмы их формирования не детализируются. Кроме того, дугам сопоставлены вероятности передачи сигналов.

Для определения вектора  $UA$  оптимальных параметров без управления структурой КА, необходимо разработать алгоритм оптимизации параметров, ориентированный на специфику описания объекта сетями Петри. Моделирование СП первой и второй части модели не имеет принципиальных различий. Отличие заключается в действиях, сопоставленных переходам.

Сложность предлагаемой модели КА значительно ниже сложности описания КА в виде циклограмм изменения работы двух уровней. Причем, снижение сложности модели не приводит к снижению точности отображения реальных процессов.

### Заключение

Рассмотрено возможное решение проблемы безопасности эксплуатации РУ и объектов, использующих в качестве энергоблоков РУ, неразрывно связано с рассмотрением задач контроля параметров, их оптимизации, выбора оптимальной структуры системы в процессе функционирования.

Предложены научно-технические основы создания систем управления, применимые к различным типам высокотехнологичных объектов, в структуру которых входят РУ. В качестве примера дано описание работы высокотехнологичного объекта КА как на структурном, так и на функциональном уровне в терминах СП

### Список литературы

1. Левский М.В. Оптимальное управление пространственным разворотом космического аппарата // Космические исследования. – 1995. – 33, №5. – С.498 -502.
2. Морозов Л.В. Нелинейное адаптивное терминальное управление наведением малоразмерного планирующего космического аппарата // Космические исследования. – 1996. – 34, №2. – С.197-206.
3. Туник А.А., Абрамович Е.А. Многомодельный подход к параметрической робастной оптимизации цифровых систем управления полетом // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 2. – С.32-43.
4. Кравец В.Г., Любинский В.Е. Основы управления космическими полетами – М.: Машино-

строение, 1983. – 224с.

5. Красовский А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами – М.: Наука, 1977. — 271с.
6. Качур С.А. Модель стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №1. – С.93-98.

### References

1. Levskij M.V. Optimal control of the spatial rotation of the spacecraft. *Kosmicheskie issledovaniya*, 1995, v. 33, No.5, pp.498 -502.
2. Morozov L.V. Nonlinear adaptive terminal guidance control of a small-sized gliding spacecraft *Kosmicheskie issledovaniya*, 1996, v. 34, No.2, pp. 197-206.
3. Tunik A.A., Abramovich E.A. A multi-model approach to parametric robust optimization of digital flight control systems *Problemy upravleniya i informatiki*, 2004, No. 2, pp. 32-43.
4. Kravec V.G, Lyubinskij V.E. *Osnovy upravleniya kosmicheskimi polyotami* [Fundamentals of space flight management]. Moscow, Mashinostroenie, 1983, 224p.
5. Krasovskij A.A. *Universal'nye algoritmy optimal'nogo upravleniya nepreryvnymi processami* [Universal algorithms for optimal control of continuous processes] Moscow, Nauka, 1977, 271p.
6. Kachur S.A. Model of the stochastic systems and their combination on the basis of the Petry nets. *Problemy upravleniya i informatiki*, 2002, No.1, pp. 93-98.