

Оптимизация алгоритма расчета моделей, разработанных с использованием метода, основанного на трехстадийной декомпозиции

© Д.В. Павлов, Д.С. Петров

ОАО РКК «Энергия», г. Королёв Московской обл., 141070, Россия

Рассмотрены вопросы разработки компьютерных моделей служебных бортовых систем космических аппаратов. Приведены существующие подходы к компьютерному моделированию и особенности их применения для технических систем рассматриваемого класса. Предложен оригинальный подход, позволяющий рассматривать различные физические взаимодействия, происходящие в исследуемой системе, и структурировать ее модель, представляемую в виде совокупности единообразных элементов. Разработан алгоритм, позволяющий построить программное представление вектора состояния и расчетных функций исследуемой системы на основе формального описания ее модели, выполненного в соответствии с предлагаемым подходом к моделированию. На базе алгоритма разработана компьютерная программа. Оценены ее быстродействие и возможность применения оригинального подхода к моделированию служебных бортовых систем космических аппаратов для информационного обеспечения управления полетом. Предложены меры по дальнейшему улучшению производительности вычислений.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, имитационное моделирование, язык моделирования, космический аппарат, система терморегулирования, трехстадийная декомпозиция, настраиваемая модель.

Введение. Модель бортового контура управления (БКУ) космического аппарата (КА) используется для отработки алгоритмов бортовых вычислительных средств (БВС) и информационного обеспечения управления полетом КА: валидации и верификации программы полета, проверки и отработки методик управления, проведения тренировок персонала управления, а также сопровождения летных испытаний КА [1, 2]. В состав модели БКУ входят модели служебных бортовых систем (СБС) КА, имитирующие реакцию СБС на управляющие воздействия, поступающие от системы управления.

Примерами моделей БКУ могут служить комплексный моделирующий стенд (КМС) космических кораблей «Союз ТМА-М» и «Прогресс М-М» [2] и наземный комплекс отладки (НКО) КА Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королёва [3]. Модели, используемые в составе НКО, используются в основном для отработки алгоритмов БВС создаваемых КА, КМС применяется как для отработки алгоритмов БВС, так и для информационного обеспечения управления полетом КА.

В составе КМС и НКО используются математические модели СБС КА, которые представляют собой программное обеспечение (ПО), имитирующее реакцию СБС КА на поступающие управляющие воздействия. ПО моделей СБС КА исполняется на компьютерах с аппаратными интерфейсами, обеспечивающими прием управляющих воздействий как от БВС, так и от другой аппаратуры через устройства двусторонней передачи дискретных и аналоговых сигналов.

Далее под математической моделью будем понимать именно компьютерную программу, обеспечивающую расчет параметров исследуемой системы (ИС).

Математические модели СБС КА разрабатывают настолько детально, насколько этого требует решаемая задача. Так, на НКО используются математические модели, выполняющие расчет всех существенных параметров, используемых БВС моделируемого КА, в состав КМС входят математические модели, выполняющие дополнительно расчет всех существенных телеметрируемых параметров КА.

Математические модели, используемые как на НКО, так и на КМС, разрабатываются с приближением сосредоточенных параметров [4]. При таком моделировании декларируется несущественность пространственной протяженности объектов, что позволяет представить вектор состояния (ВС) ИС в виде конечного набора числовых величин, а математическое описание ИС — в виде набора алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений.

Несмотря на то, что приближение сосредоточенных параметров является не столь детальным, как, например, метод конечных элементов (МКЭ), активно применяемый при проектировании и разработке ракетно-космической техники [5–7], его использование оправдано при проектировании КА, отработке алгоритмов БВС, испытаниях КА, для информационного обеспечения управления полетом КА, включая отработку методик управления и идентификацию СБС КА. Наиболее значительно преимущества приближения с сосредоточенными параметрами проявляются при решении оптимизационных задач — определении проектного облика и идентификации СБС КА, поиске оптимального управления КА, — когда применение МКЭ невозможно вследствие недостатка исходных данных.

Приближение сосредоточенных параметров подразумевает описание физических взаимодействий (ФВ), существенных для работы ИС, способом, удобным для разработчика модели при решении конкретной задачи. В связи с этим проблема формализации процесса такого моделирования является сложной: для ее решения необходимо изобрести универсальный подход, применение которого окажется удобным для широкого спектра задач, моделирования с сосредоточенными параметрами. В то же время отсутствие формаль-

ного подхода или неверно выбранный подход приводит к существенному росту затрат как на разработку, так и на сопровождение модели, а также к понижению адекватности моделей.

В настоящее время существует несколько подходов, использующих приближение сосредоточенных параметров, однако области их применения ограничены. Ниже приведены наиболее распространенные универсальные подходы, известные авторам.

При разработке моделей систем управления активно применяется подход функциональных преобразователей (ФП), подразумевающий разделение ИС на составные части, каждая из которых представляется в виде динамической системы, имеющей детерминированные управляющие, входные и выходные сигналы. Применение такого подхода возможно лишь в том случае, когда не рассматриваются двусторонние связи между составными частями ИС.

Разработан и используется метод эквивалентных схем, в основе которого лежит замена оригинальной модели на модель электрической схемы, состоящей из резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, описываемой теми же самыми уравнениями, что и исходная система [4]. Такой подход позволяет моделировать ФВ, которые могут быть представлены в виде линейных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений. Подход можно использовать, когда нелинейные явления в рассматриваемой ИС являются несущественными и разработчик модели обладает знаниями в области электротехники.

Существует оригинальная методология Bondgraph [8, 9] моделирования обмена энергией различной физической природы между составными частями ИС через специальные связи (*bonds*). Эта методология позволяет моделировать линеаризованные физические взаимодействия: электрическое, магнитное, гидравлическое, механическое и тепловое. Однако модели, разработанные с использованием этой методологии, слабо поддаются структуризации, в связи с чем подход применим для не слишком сложных моделей, в которых не требуется рассмотрение нелинейных явлений.

Авторами ранее был предложен новый подход, позволяющий формализовать создание математических моделей СБС КА; он основан на оригинальном трехстадийном алгоритме декомпозиции модели ИС [10, 11]. С помощью этого подхода можно моделировать различные физические взаимодействия, как линейные, так и нелинейные, в том числе течение электрического тока, теплообмен, течение жидкостей и газов по трубопроводам, передачу команд и сигналов. Преимуществами разработанного метода являются:

- универсальное представление различных физических взаимодействий и связей между ними;
- ориентированность на структуризацию модели;

- изоморфизм структуры ИС и ее модели.

Модель, разработанная с помощью этого подхода, является декларативной, т. е. содержит в себе только описание структуры (составных частей и связей между ними), но не алгоритм расчета. Для осуществления расчетов разработан универсальный алгоритм, подходящий для любых моделей, созданных в рамках предложенного метода, позволяющий проводить расчеты на основе структуры модели и описаний составных элементов, содержащихся в специальной библиотеке.

Реализация такого алгоритма в виде расчетного ПО позволяет использовать его для любых моделей, созданных с помощью метода моделирования, основанного на трехстадийной декомпозиции.

В рамках работ [10, 11] создана компьютерная программа, реализующая наиболее явный алгоритм организации вычислений: структура модели, описание переменных и результаты расчетов представляются в виде вложенных ассоциативных массивов изоморфно структуре ИС, предварительная обработка структуры данных отсутствует. Такая реализация обеспечивает быструю разработку, но оперативность вычислений недостаточна.

Основной целью предлагаемой работы является разработка нового алгоритма организации вычислений — с предварительной обработкой описания модели, позволяющего значительно ускорить расчеты. Приведен анализ оперативности вычислений на примере модели, созданной в рамках работы [11], внесены предложения по дальнейшему увеличению оперативности вычислений и сделаны выводы о возможностях применения метода моделирования.

Метод моделирования, основанный на трехстадийной декомпозиции. Формализация процесса создания математических моделей с использованием предложенного ранее метода моделирования заключается в представлении исследуемой системы в виде композиции стандартных элементов. Для получения такого представления применяется оригинальный трехстадийный алгоритм декомпозиции. Вначале в соответствии со схемой деления ИС модель разделяется на *компоненты* — модели составных частей ИС, далее в каждом компоненте выделяются модели гомогенных простых деталей — *простые модели* (ПМ), затем рассматривается участие гомогенных простых деталей в различных физических взаимодействиях, в результате чего ПМ разделяется на *фрагменты* — модели участия гомогенной простой детали в определенном ФВ.

Для синтеза этих составных частей модели в общую модель служат, во-первых, связи между моделями различных ФВ, включаемые в состав ПМ автоматически при наличии соответствующих фрагментов, во-

вторых, *объекты-связи* (ОС), моделирующие соединение прототипов ПМ, в-третьих, специальные зависимости между параметрами составных частей компонентов, позволяющие учитывать связи без использования имеющихся моделей ФВ (рис. 1).

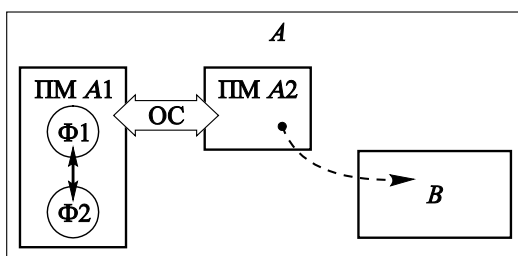


Рис. 1. Связи между составными частями компонента:
 A, B — компоненты, B вложен в A; A1, A2 — ПМ, вложенные в компонент A; Ф1, Ф2 — фрагменты, составляющие ПМ А1; сплошная двунаправленная стрелка — связь между моделями различных ФВ; широкая полая стрелка — ОС; штриховая стрелка — связь между параметрами составных частей компонента A

Среди ПМ, входящих в состав компонента, отдельно выделяются интерфейсные, которые являются моделями гомогенных простых деталей; они участвуют во взаимодействии прототипа рассматриваемого компонента с внешними для него объектами.

Поскольку для решения задач из рассматриваемой предметной области — моделирования СБС КА для информационного обеспечения управления полетом КА — достаточно учитывать ограниченный спектр ФВ, число различных предельно малых элементов модели также оказывается ограниченным и небольшим, что позволяет создать библиотеку стандартных элементов, содержащую модели ФВ, — классы фрагментов и описание связей между ними, и модели элементов ИС, — классы компонентов. Таким образом, разработка моделей сводится к заданию структуры модели, т. е. выбору стандартных элементов из библиотеки и заданию связей между ними. Такой подход позволяет создавать настраиваемые, масштабируемые, расширяемые, открытые для взаимодействия модели с высокой степенью повторного использования кода. Повторное использование стандартных элементов обеспечивает высокое качество ПО моделей. Кроме того, разработчик может сконцентрироваться на изучении структуры ИС, в результате чего повышается адекватность создаваемых моделей.

Алгоритм расчета модели. Модели, разработанные на основе изложенного подхода, являются лишь описанием структуры, т. е. состава модели и связей между составными частями. Перечень параметров модели и зависимости между ними задаются в большей степени разработ-

чиком библиотеки стандартных элементов и в меньшей — разработчиком конкретной модели при задании связей между параметрами составных частей какого-либо компонента.

При подготовке работ [10, 11] разработка стандартных элементов проводилась в два этапа. На первом этапе разрабатывались модели ФВ, включая классы фрагментов, связи между фрагментами по одному и тому же ФВ и связи между фрагментами, моделирующими различные ФВ, входящие в состав одной ПМ, на втором — модели элементов, т. е. компоненты. Каждый компонент содержал в себе вложенную структуру ПМ, ОС и компонентов низшего уровня иерархии, а также алгоритмически оформленные зависимости между параметрами вложенных элементов.

Для каждого класса фрагментов разработан перечень параметров, содержащий ВС фрагмента, и подпрограммы, реализующие зависимости между компонентами ВС. Подпрограммы разделены на три группы: обеспечивающие решение явных алгебраических уравнений, неявных алгебраических уравнений и обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка, соответственно имеющих следующий вид:

$$y_i = f_i(y_1 \dots y_N), \frac{df_i}{dy_i} = 0; \quad (1)$$

$$F_j(y_1 \dots y_N) = 0; \quad (2)$$

$$\dot{y}_k = g_k(y_1 \dots y_N). \quad (3)$$

Здесь y_p ($p = 1, \dots, N$) — компоненты ВС; f_i, F_j, g_k — заданные функции.

Для осуществления расчетов разработаны подпрограммы, вычисляющие значения функций f_i, F_j, g_k для заданного ВС y_1, \dots, y_N . Явные алгебраические и дифференциальные уравнения вида (1) и (3) решались путем соответствующего изменения значений компонентов ВС y_i и y_k , а для решения неявных алгебраических уравнений (2) использовалась стандартная реализация алгоритма Бroyдена — Флетчера — Гольдфарба — Шанно (BFGS) (см., например, [12]) из библиотеки SciPy. На ее вход подавался вектор невязок $\vec{\delta}_j = \vec{F}_j(y_1, \dots, y_N)$, рассчитанный с помощью разработанных подпрограмм, на выходе алгоритм выдавал коррекцию ВС; F_j — компоненты вектора \vec{F} .

Общая схема работы алгоритма расчета всей модели приведена на рис. 2.

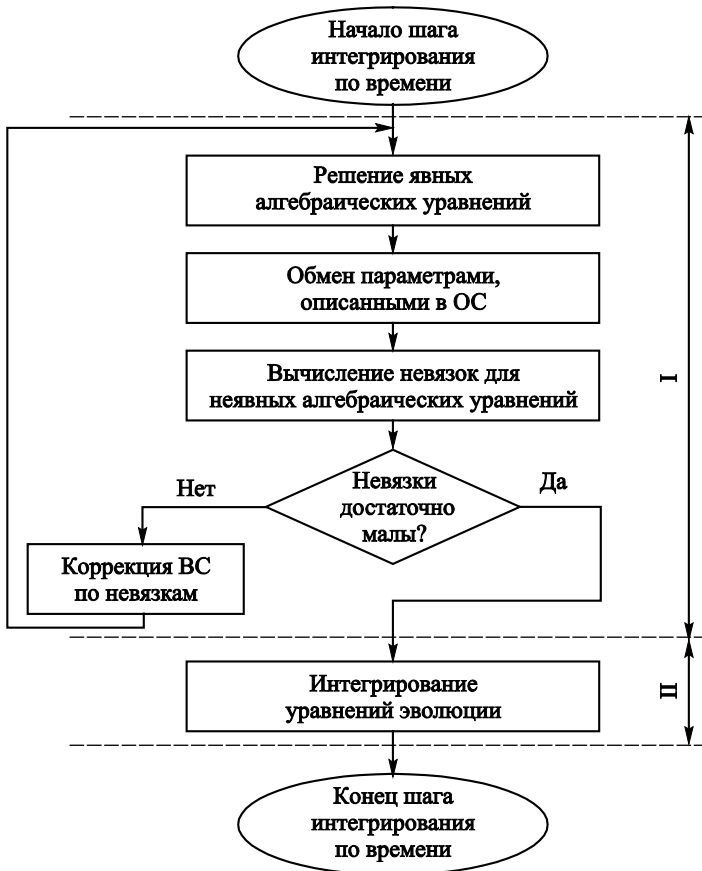


Рис. 2. Алгоритм расчета модели:

I — этап решения системы алгебраических уравнений;
 II — этап численного интегрирования

Организация вычислений. При подготовке материалов для [10, 11] была разработана программа на языке Python, реализующая следующий подход к организации вычислений. На основе стандартных контейнеров типа «словарь» (*dict*) была создана структура данных, повторяющая структуру модели, т. е. компонент верхнего уровня (вся модель) представлялся в виде словаря, в который были вложены другие словари, описывающие компоненты низших уровней, ПМ, фрагменты, ОС. Значения параметров и ссылки на расчетные подпрограммы размещались в той же структуре данных. Фрагмент описания модели приведен на рис. 3.

```

модель: # компонент высшего уровня иерархии "--- вся модель
комп: # здесь перечислены компоненты, входящие в модель
СТР: # компонент "--- система терморегулирования
# класс компонента не указан,
# значит отсутствуют специфичные параметры и подпрограммы
комп: # компоненты, входящие в состав <<СТР>>
    зр: # модель ЗР
        кл: трубка # класс компонента
        # специфичные для класса компонентов параметры
        п: { g: 0.2e-10, T: 300.0, V: 28.0e-3 }
    н2: # модель Н2
        кл: насос
        п: { T: 300.0, dp0: 0.6e5, q0: 1.0 }
    зрн2: # модель соединения Н2 и ЗР
        кл: узел
        п: {}
    к1: # модель К1
        кл: компенсатор
        п: { V0: 3.0e-3, Vfull: 6.0e-3, p0: 0.5e5 }
    ...
ос: # ОС, связывающие компоненты, входящие в состав <<СТР>>
- пм: [ [ зрн2, А ], [ зр, А ] ] # соединяет ПМ зрн2.А и зр.А
ин: # связи по принадлежности к физическим взаимодействиям
    Г: # для фрагментов, моделирующих гидродинамику:
        [ 1, 1 ] # имена контактов для фрагментов указанных ПМ
- пм: [ [ н2, А ], [ зрн2, А ] ]
ин: { Г: [ 2, 1 ] }
    ...

```

Рис. 3. Фрагмент описания модели на основе словарей

Для обработки такой структуры данных использовался оригинальный алгоритм, рекурсивно обходящий все вложенные словари, вызывающий расчетные подпрограммы и выполняющий обмен переменными, предусмотренный механизмом ОС. Такой подход является наглядным, но обладает сравнительно низким быстродействием, поскольку предусматривает большое число операций поиска по словарю и рекурсивных вызовов подпрограммы обхода структуры модели, а для использования совместно с алгоритмами, реализованными в библиотеке SciPy, требует преобразования ВС из многократно вложенного словаря в линейный вектор типа *numpy.array*.

С помощью профилировщика cProfile, входящего в состав стандартной библиотеки языка Python, был проведен анализ быстродействия реализованной программы.

На рис. 4 видно, что большая часть вычислительных ресурсов расходуется на перечисленные выше вспомогательные операции. Для увеличения оперативности вычислений в рамках предлагаемой работы разработан новый подход к организации вычислений и ПО на его основе.

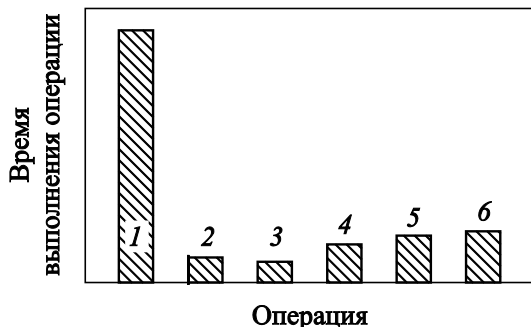


Рис. 4. Результаты анализа быстродействия первой версии расчетной программы:

1 — поиск по словарю; 2 — подготовка массива для вызова функции коррекции ВС по значениям невязок; 3 — вызовы подпрограммы обхода структуры модели; 4 — вызов расчетных подпрограмм; 5 — работа функции коррекции ВС по значениям невязок; 6 — остальные операции; (1–3 — вспомогательные операции)

Предлагаемый подход к организации вычислений. В основе нового подхода лежит перенос операций по анализу структуры модели на этап загрузки модели и хранение параметров в линейных массивах. Для сокращения расходов процессорного времени на вспомогательные операции при выполнении расчетов для параметров одного и того же типа сформированы единый линейный массив, содержащий ВС \vec{y} , подпрограммы для вычисления $\vec{f}(\vec{y})$, $\vec{F}(\vec{y})$ и $\vec{g}(\vec{y})$ полностью и единый перечень копируемых параметров, приведенных в описании ОС.

Для реализации данного подхода потребовалось решение некоторых специфических задач. В работах [10, 11] фрагменты некоторых классов содержат параметры-массивы, в то время как для алгоритма решения системы уравнений каждый параметр должен быть скалярной величиной. При разработке алгоритма анализа структуры модели определили, что каждый элемент такого массива относится к своей составной части модели и может быть выделен в отдельную переменную. Например, фрагмент, моделирующий узел электрической цепи, содержит массив параметров, в котором находятся значения тока во всех присоединенных резисторах; в этом массиве каждому элементу можно поставить в соответствие фрагмент, моделирующий соответствующий присоединенный к рассматриваемому узлу резистор.

Данная задача решена следующим образом: в алгоритм анализа структуры модели заложена функциональность, позволяющая создавать и использовать такие переменные, кроме того, реализованы

подпрограммы, обобщающие значения этих переменных. Так, для узла электрической цепи требуется подпрограмма, суммирующая все токи в присоединенных резисторах. Для ранее разработанных моделей [10–11] потребовались обобщающие подпрограммы, выполняющие суммирование всех элементов массива и суммирование только положительных элементов массива.

Формирование единой подпрограммы для вычисления вектора $\vec{f}(\vec{y})$, служащей для решения явных алгебраических уравнений, реализовано следующим образом. Алгоритм анализа структуры модели составлял массивы Ψ_i , содержащие индексы переменных в едином массиве переменных, передаваемые в каждую расчетную подпрограмму. Подпрограмма для вычисления вектора $\vec{f}(\vec{y})$ осуществляла вызов всех подпрограмм этого типа $f_i(\dots)$, передавая на вход каждой выборку из общего массива переменных в соответствии с массивами индексов Ψ_i . Переменные, рассчитанные подпрограммами $f_i(\dots)$, объединялись в общий массив согласно массивам индексов Ψ_i , который использовался для дальнейших вычислений (рис. 5).

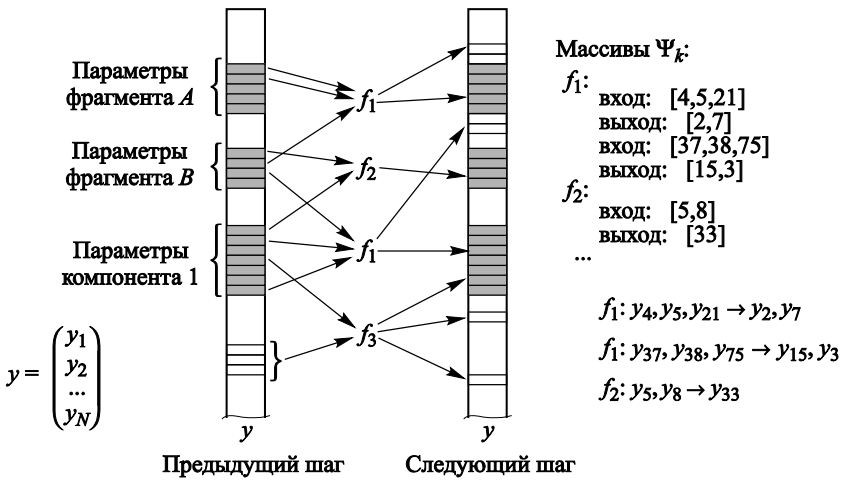


Рис. 5. Организация вычислений в новой версии расчетного ПО:

ВС всей системы хранится в едином массиве y ; при вычислениях используются специальные массивы Ψ_k , содержащие индексы параметров, подаваемых на вход функций f_k и возвращаемых этими функциями

Единые подпрограммы $\vec{F}(\vec{y})$ и $\vec{g}(\vec{y})$, служащие для решения неявных алгебраических и обыкновенных дифференциальных уравнений, были реализованы аналогично. Для обеспечения возможности отладки модели и вывода переменных на внешние средства

отображения была создана структура данных — словарь, в которой хранилось соответствие имен переменных и индексов в общем массиве переменных.

На основе предложенных алгоритмов анализа структуры модели и организации вычислений разработана оригинальная компьютерная программа.

Для сравнения быстродействия разработанной ранее и новой версии расчетного ПО проводим эксперимент. Разработанная модель [11] считывалась и исполнялась поочередно обеими версиями ПО. Время работы программ и их составных частей измерялось с помощью профилировщика. Результаты анализа быстродействия приведены на рис. 6.

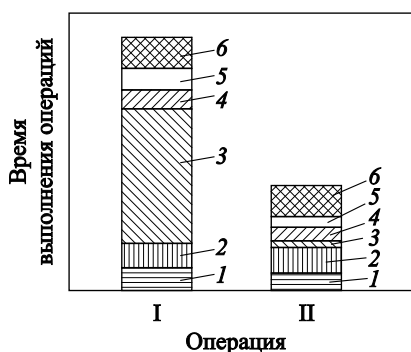


Рис. 6. Диаграмма производительности предыдущей I и новой II версий алгоритмов организации вычислений:

1 — вызов расчетных подпрограмм; 2 — работа функции коррекции ВС по значениям невязок; 3 — подготовка ВС к передаче в функцию коррекции по значениям невязок; 4 — перебор расчетных подпрограмм; 5 — запись нового значения ВС; 6 — другие операции

Новый алгоритм организации вычислений позволил более чем в 2 раза сократить время расчета декларативных моделей, созданных с использованием метода моделирования, основанного на трехстадийной декомпозиции ИС.

Полученная производительность все еще недостаточна для использования моделей в задачах информационной поддержки управления полетом КА, в частности для процессов, требующих моделирования в реальном времени: тренировок персонала управления и сопровождения летных испытаний. В настоящее время производительность ограничена большим числом вызовов расчетных подпрограмм и высокой стоимостью вызова подпрограммы в языке Python.

Для увеличения производительности можно реализовать данный алгоритм на одном из компилируемых языков программирования,

например Си, что позволит сократить затраты вычислительных ресурсов на вызовы подпрограмм.

При необходимости возможно дополнительное увеличение производительности программы расчета путем использования нескольких вычислительных устройств для решения системы алгебраических уравнений. Для этого необходимо перейти к другой библиотечной реализации алгоритмов решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений, обеспечивающей проведение параллельных вычислений, например библиотеки SUNDIALS.

Повторная разработка программы, реализующей разработанный алгоритм на компилируемом языке программирования, как и использование другой распространенной библиотеки для организации параллельных вычислений, является техническим, а не принципиальным вопросом. В связи с этим можно констатировать, что предложенный алгоритм организации вычислений позволяет решить проблему производительности при расчете моделей, разработанных с использованием метода, основанного на трехстадийной декомпозиции.

Заключение. Моделирование СБС с сосредоточенными параметрами используется на различных этапах проектирования, разработки и эксплуатации КА. В настоящее время не существует методологической основы и программных средств, обеспечивающих в достаточной степени качество ПО создаваемых сложных моделей и их адекватность. Используемые программные средства обладают рядом недостатков, отрицательно влияющих на характеристики моделей.

Разработанный авторами метод моделирования с сосредоточенными параметрами, основанный на оригинальном трехстадийном алгоритме декомпозиции, позволяет формализовать процесс разработки ПО моделей СБС КА и свести его к созданию структуры модели — перечня элементов и связей между ними. Метод дает возможность структурировать модель исследуемой системы, универсальным образом рассматривать различные ФВ и обеспечивает изоморфизм структуры исследуемой системы и ее модели.

Разработанный алгоритм организации вычислений значительно повышает оперативность расчета вследствие переноса части операций на этап загрузки модели и позволяет перейти к выполнению вычислений на нескольких устройствах параллельно, что обеспечит возможность его использования для расчета моделей в реальном времени.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соловьев В.А., Лысенко Л.Н., Любинский В.Е. *Управление космическими полетами*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 902 с.
- [2] Кравец В.Г. *Автоматизированные системы управления космическими полетами*. Москва, Машиностроение, 1995.

- [3] Микрин Е.А. *Бортовые комплексы управления космических аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 245 с.
- [4] Трудоношин В.А. *Моделирование систем с сосредоточенными параметрами* (базовый курс). 2008. URL: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=BaseCourse> (дата обращения 05.06.2016).
- [5] Аксенов А.А., Дядькин А.А., Москалев И.В. и др. Компьютерное моделирование течения и относительного движения возвращаемого аппарата и крышки люка парашютного контейнера в процессе их разделения на участке спуска. *Космическая техника и технологии*, 2015, № 2, с. 39–50.
- [6] Алабова Н.П., Брюханов Н.А., Дядькин А.А. и др. Роль компьютерного моделирования и физического эксперимента в исследованиях аэрогазодинамики ракетно-космических систем в процессе проектирования. *Космическая техника и технологии*, 2014, № 3, с. 14–21.
- [7] Антонов Ф.К., Макаровская А.В., Папченко В.В., Шаенко А.Ю. Численное и экспериментальное исследование раскрывающейся космической конструкции на основе тонкостенных композитных профилей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 49–55.
- [8] Paynter H. *Analysis and Design of Engineering Systems*. Cambridge, Mass., M.I.T. Press, 1961, 303 p.
- [9] Mukherjee A., Samantaray A.K. *Bond graph in modeling, simulation and fault identification*. New Delhi, India, I.K. International Pvt. Ltd., 2006, 512 p.
- [10] Петров Д.С. Имитационное моделирование двигательной установки космического аппарата при помощи трехстадийного метода декомпозиции. *Вестник Московского авиационного института*, 2014, т. 21, № 1, с. 43–57.
- [11] Павлов Д.В., Петров Д.С. Использование метода трехстадийной декомпозиции для моделирования системы терморегулирования космического аппарата. *Вестник Московского авиационного института*, 2015, т. 22, № 2, с. 42–54.
- [12] Rotten B. van de, Lunel S. *A Limited Memory Broyden Method to Solve High-dimensional Systems of Nonlinear Equations*. The Netherlands: Mathematisch Instituut, Universiteit Leiden, 2003, 236 p.

Статья поступила в редакцию 06.07.2016

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Павлов Д.В., Петров Д.С. Оптимизация алгоритма расчета моделей, разработанных с использованием метода, основанного на трехстадийной декомпозиции. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 8.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-08-1522>

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на XL Академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 26–29 января 2016 г.

Павлов Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доцент, начальник отдела ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва». Научные интересы: математическое моделирование в управлении космическими полетами.

Петров Дмитрий Сергеевич — магистр физики, инженер отдела ОАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва». Научные интересы: математическое моделирование, обратные задачи, управление космическими полетами.
e-mail: dmitry.s.petrov@gmail.com

Optimization of calculation algorithm for models developed with a method based on three-stage decomposition

© D.V. Pavlov, D.S. Petrov

S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia,
Korolev, 141070, Russia

The article considers the development of service systems computer models on board the spacecraft. We describe existing approaches to computer modeling, their features for such technical systems; propose a new approach which, firstly, allows us to consider the various physical interactions that occur in the system, secondly, to structure the model and, thirdly, to present it as a uniform element set. The study suggests the algorithm that makes it possible to build a software representation of the state vector and propose settlement functions of the system under study, based on a formal description of its model, made in accordance with the described approach to modeling. On the base of the algorithm we developed a computer program. The study estimates the computer program speed and the possibility of using an original approach to modeling service systems on board the spacecraft in order to inform spacecraft flight control and describes the measures to further performance improving.

Keywords: computer modeling, simulation, modeling language, spacecraft thermal control system, three-stage decomposition, customizable model.

REFERENCES

- [1] Solovov V.A., Lysenko L.N., Lyubinskiy V.E. *Upravlenie kosmicheskimi poletami* [Mission control]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 902 p.
- [2] Kravets V.G. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniya kosmicheskimi poletami* [Automated mission control system]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995.
- [3] Mikrin E.A. *Bortovye komplekсы upravleniya kosmicheskikh apparatov* [On board spacecraft control systems]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 245 p.
- [4] Trudonoshin V.A. *Modelirovaniye sistem s sosredotochennymi parametrami* [Modeling of systems with lumped parameters]. 2008. Available at: <http://bigor.bmstu.ru/?cnt/?doc=BaseCourse> (accessed June 5, 2016).
- [5] Aksenov A.A., Dyadkin A.A., Moskalev I.V. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space technics and technologies*, 2015, no. 2, pp. 39–50.
- [6] Alabova N.P., Bryukhanov N.A., Dyadkin A.A. et al. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii — Space technics and technologies*, 2014, no. 3, pp. 14–21.
- [7] Antonov F.K., Makarovskaya A.V., Papchenko V.V., Shaenko A.Yu. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2015, no. 1, pp. 49–55.
- [8] Paynter H. *Analysis and design of engineering systems*. Cambridge, MIT Press Publ., 1961, 303 p.
- [9] Mukherjee A., Samantaray A.K. *Bond graph in modeling, simulation and fault identification*. New Delhi, India, I.K. International Pvt. Ltd. Publ., 2006, 512 p.
- [10] Petrov D.S. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta — Herald of Moscow Aviation Institute*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 43–57.
- [11] Pavlov D.V., Petrov D.S. *Vestnik Moskovskogo Aviatsionnogo Instituta — Herald of Moscow Aviation Institute*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 42–54.

- [12] Rotten B. van de, Lunel S. *A limited memory Broyden method to solve high-dimensional systems of nonlinear equations*. The Netherlands, Mathematisch Instituut, Universiteit Leiden Publ., 2003, 236 p.

Pavlov D.V., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor, head of the department of S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. Research interests include mathematical modeling in space missions control.

Petrov D. S., Master of physics, engineer of the department of S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia. Research interests include mathematical modeling, inverse problems, space missions control. e-mail: dmitry.s.petrov@gmail.com