

основе системы гиросилов. Модель использует аппарат кватернионов и обобщена до модели (4). после чего проведен синтез управления и анализ получившейся системы на основе метода функций Ляпунова. Рассмотрены варианты отказов в СУ с сохранением свойства живучести на основе теорем 1 и 2. При заданных условиях на характеристики системы по живучести проведен анализ возможностей заданной системы для ряда реальных ситуаций.

УДК 681.03.06

Ю.Г.Антонов, С.А.Бутырин, С.Н.Васильев, Ю.А.Демиденко,  
О.В.Долинин, В.В.Копылов, В.П.Макаров, Р.Р.Мукумов,  
С.Н.Платонов, Е.И.Сомов

#### ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ПРОТОТИП ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассматриваются вопросы разработки гибридной экспертной системы (ЭС) для проектирования гиросиловых систем управления ориентацией (СУО) космических аппаратов (КА) и инструментальных средств для создания ЭС.

В ИрВЦ СО РАН разрабатывается интеллектуализированная система программного обеспечения (ИСПО) "DIALOG", которая является развитием работ в области приложений методов логического вывода к автоматизации решения задач моделирования, анализа и синтеза СУО КА /1,2/ и ориентирована на конечных пользователей в областях, требующих совмещения интеллектуальных и алгоритмических подходов при поиске решения задач.

В настоящее время ИСПО представлена отдельными реализованными на ПЭВМ фрагментами, а именно: препроцессором с языка представления знаний ЕТЛ на С++ (разработка в/ч 73730), блоком логического вывода системы "ЭВРОЛОГ" (ИрВЦ) /3/, системой моделирования, анализа и синтеза СУО КА "ДИНАМИКА" (ИрВЦ) /4/.

Язык представления знаний ЕТЛ включает описание сети фреймов, присоединенных процедур, продукций, арифметические операторы, операторы

ры ввода/вывода, операторы управления стратегией вывода. Привлекательными факторами ЕТЛ являются ориентация на компиляцию знаний и малый объем требуемой памяти, что важно для приложений, требующих создания ЭС реального времени. Ограничение использования языка ЕТЛ состоит в его недостаточной выразительности для формализации знаний в данной предметной области. Поэтому в создаваемой ЭС применение ЕТЛ-языка предусмотрено при проверке корректности исходных данных и выборе методики проектирования.

Типовая ЭС, созданная с использованием ИСПО "DIALOG" включает: интерфейс с экспертом и пользователем, подсистему ввода знаний, блок логического вывода (БЛВ), подсистему объяснений, ввода/вывода и интерпретации знаний, подсистему моделирования, базу знаний, базу данных (БД).

Особенностью ИСПО является возможность использования принципиально различных способов описания знаний, основанных с одной стороны на продукциях и с другой - на исчислении предикатов, а именно - исчислении позитивно образованных помеченных (ПОП) формул.

Процесс разработки гибридной ЭС содержит этапы создания математических моделей СУО КА, баз знаний и данных, а также интерфейсов с пользователем и разработчиком ЭС.

Для разработки моделей КА (в виде набора программных модулей, используемых далее в гибридной ЭС) в состав ИСПО включена диалоговая система моделирования, анализа и синтеза СУО КА "ДИНАМИКА", содержащая, кроме функциональных, и инструментальные программные средства - диалоговую оболочку; систему управления базами данных; средства создания модулей; базы данных (БД); препроцессор с инструментального языка MATFOR; средства выполнения модулей.

Основным языком описания знаний в представляемом прототипе ЭС является язык позитивно образованных (ПО) формул.

Синтаксис ПО-формул:

```
<Формула> ::= <типовой квантор> ! <заключительная формула>  
           <типовой квантор><формула>! (<формула>&<формула>);  
<типовой квантор> ::= [ <квантор> <переменная> ;  
                       <типовое условие> ];  
<заключительная формула> ::= [ <типовое условие> ];  
<типовое условие> ::= <атомарная формула> ! <типовое условие>  
                    & <атомарная формула>;  
<квантор> ::=  $\forall$  |  $\exists$  ;
```

«атомарная формула» ::= «предикатный символ» («список термов»);

«список термов» ::= «терм» | «список термов», «терм»;

«терм» ::= «переменная» | «константа»;

Понятия «переменная», «константа» и «предикатный символ» очевидны и их синтаксис не приводится.

Знания предметной области и постановка задачи формализуются на языке ПО-формул. Блок логического вывода (БЛВ) ведет поиск доказательства теоремы о существовании решения задачи. Затем из доказательства извлекается план решения задачи либо само решение.

БЛВ получает на входе последовательность ПО-формул  $S_i$  ( $i=0\dots n$ ), целевая формула  $S_0$  в этой последовательности является описанием постановки задачи, а остальные  $S_i$  - знаниями.

Демонстрационная версия ЭС решает задачу проектирования системы стабилизации по каналу тангажа КА, которая сводится к выбору структуры и параметрическому синтезу непрерывного алгоритма управления (АУ) и исполнительного органа - гиродин (ГД), исходя из заданного качества и имеющихся ограничений.

ЭС использует модель канала стабилизации КА по углу тангажа  $\theta$ , реализованную с помощью системы моделирования "ДИНАМИКА" в виде процедур и состоящую из модели упругого объекта управления, модели гиродин, модели кинематики, моделей АУ (ПД-, ПИ- и ПИД- регуляторов).

Модель системы стабилизации КА по каналу тангажа имеет вид

$$\begin{bmatrix} I & 0 & d \\ 0 & J & 0 \\ d & 0 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \beta' \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_z + H \cdot \beta \\ M_G - b_G \cdot \beta' - H \cdot \omega \\ -a \cdot ((\delta / \pi) \cdot \Omega \cdot q + \omega' \cdot q) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\theta} = \omega - \omega_0; \quad M_G = \text{sat}(M_G^*, u); \quad u = H \cdot \omega_0 + k_1 \theta + k_2 \dot{\theta} + k_3 \ddot{\theta}; \quad \theta_I = \theta;$$

В процессе проектирования выбираются коэффициенты  $k_i$  в законе управления, а также кинетический момент ротора  $H$ , коэффициент демпфера гиродин  $b_G$  (если последние неизвестны или могут варьироваться).

Спроектированная замкнутая система управления должна удовлетворять требованиям качества: модель системы, линеаризованная относительно точки ( $\theta=0$ ;  $\omega=\omega_0=\text{const}$ ;  $q=0$ ;  $q'=0$ ) должна иметь заданный запас устойчивости (кроме критической координаты - угла прецессии  $\beta$ ), время регулирования  $t_p$ , колебательность  $\mu$ , статическая и динамическая ошибки по углу  $\theta$  не более заданных; полная модель системы должна

удовлетворять поставленным требованиям по времени регулирования и точности при ограничениях на угол  $\beta$ , скорость прецессии  $\dot{\beta}$  и управляющий момент ГД  $M_G$  при действии внешнего возмущающего момента  $M_z$  на заданном интервале времени.

Используемая методика проектирования в демонстрационной версии ЭС состоит в:

1) определении по заданным требованиям к качеству переходного процесса желаемого спектра SP упрощенной (с исключенными уравнениями упругих колебаний конструкции КА) модели системы;

2) модальном синтезе по спектру SP коэффициентов одного из перечисленных выше типов регуляторов в рамках упрощенной модели;

3) сборке синтезированного регулятора с полной моделью объекта;

4) вычислении спектра замкнутой линеаризованной системы стабилизации КА по каналу тангажа и анализе этого спектра с целью определения запаса устойчивости и характеристик качества;

5) прямой оценке методами ускоренного численного интегрирования характеристик качества полной нелинейной модели системы и проверке выполнения ограничений при действии возмущения, если требования качества выполнены для линейной модели;

6) принятие решения об изменении спектра SP или структуры регулятора и/или параметров ГД и возврат к шагу 2, в случае невыполнения требований качества для нелинейной модели, либо окончание проектирования в противном случае.

Экспертные знания используются на этапе предварительного определения неизвестных параметров объекта, структуры регулятора, а также при принятии решения об изменении спектра SP на последнем 6-ом этапе синтеза. Экспертные знания разделяются на:

- знания о проектируемой системе (структура системы, назначение и т.д.);

- знания о методиках проектирования, моделях (наборе моделей в БД, включая альтернативные модели измерительных приборов, ИО, АУ и др.) и используемых процедурах (соглашения о связях, сведения о входных и выходных параметрах, условиях применения, нестандартных ситуациях);

- знания о исходных параметрах, используемые для оценки их корректности и выбора методики проектирования;

- знания из предметной области: по теории управления, механике, конструкции КА, в том числе о взаимосвязи параметров, степени их влияния на характеристики качества, различные оценки, прогнозы пове-

дения проектируемой системы и др.

В дальнейшем, при переходе к полномасштабной ЭС, предполагается усложнение задачи проектирования, в том числе распространение ее на пространственную модель движения КА, различные схемы систем ГД и разнообразные режимы управления ориентацией КА.

Продемонстрируем пример спецификации одной из подзадач, решаемых демонстрационным прототипом ЭС - найти скалярный коэффициент усиления  $k$  в цепи обратной связи одноканальной системы, который обеспечивает выполнение следующих условий: замкнутая линеаризованная система должна быть устойчива, время переходного процесса  $t_p$  в нелинейной системе при начальном рассогласовании  $e_0 = \theta_0$  не более  $t_p^*$  и ошибка  $e = \max_t |e(t)| = |\theta(t)| \leq e^*$  при  $t \in [t_p^*, 3t_p^*]$ .

Для описания этой задачи используем следующие предикаты:

ТОЧ(x) - x - заданная ошибка;

BP(x) - x - заданное время регулирования;

KY(x) - x - коэффициент усиления (KY);

РТОЧ(x,y) - x - реальная ошибка при KY y;

РBP(x,y) - x - реальное время регулирования при KY y;

КУМ(x,y) - x - предыдущий и y - очередной (последующий) введенный пользователем (либо ЭС) коэффициент усиления;

НЗР(x) - x - начальное значение рассогласования;

МКУ(x) - x - верхняя граница изменения коэффициента усиления;

ПРОЦ(x,y,z,e,t) - процедура интегрирования, определяющая для начального значения рассогласования НЗР значения РТОЧ и РBP;

read() - функция ввода значений.

Правило 1.

$[\forall e^*: \text{ТОЧ}(e^*)] \wedge [\forall t_p^*: \text{BP}(t_p^*)] \wedge [\forall e_0: \text{НЗР}(e_0)] \wedge [\forall k: \text{KY}(k)]$   
 $[\forall e, t_p: \text{ПРОЦ}(e^*, t_p^*, e_0, k, e, t_p)] \wedge [\text{РТОЧ}(e, k) \& \text{РBP}(t_p, k)]:$

Правило 2.

$[\forall k_1, k_2: \text{КУМ}(k_1, k_2)] \wedge [\forall e_1: \text{РТОЧ}(e_1, k_1)]$   
 $[\forall e_2: \text{РТОЧ}(e_2, k_2)] \wedge ([\forall k_1 < k_2 \& e_1 < e_2] \wedge [\text{МКУ}(k_2)] \&$   
 $[\forall k_1 > k_2 \& e_2 > e_1] \wedge [\text{МКУ}(k_1)]);$

Правило 3.

$[\forall t_p^*: \text{BP}(t_p^*)] \wedge [\forall k^*: \text{МКУ}(k^*)] \wedge [\forall k: \text{KY}(k)] \wedge [\forall t_p: \text{РBP}(t_p, k) \& t_p > t_p^*]$   
 $[\forall kn: \text{read}(kn, k^*)] \wedge [\text{КУМ}(k, kn) \& \text{KY}(kn)]:$

Целевая формула.

$$[\forall t_p^*: BP(t_p^*)] [\forall e^*: ТОЧ(e^*)] [\forall e_0: НЭР(e_0)] [\exists k_1 KY(k_1)]$$

$$[\exists t_p: PBP(t_p, k_1) \& t_p \leq t_p^* \& write("результат : ", k_1)];$$

Правило 1 означает, что при заданных времени регулирования  $t_p^*$ , ошибке  $e^*$ , начальном рассогласовании  $e_0$  и введенном пользователем (либо сформированном ЭС) значении коэффициента усиления  $k$  следует вызвать процедуру ПРОЦ для вычисления реальных значений времени регулирования  $t_p$  и ошибки  $e$ .

Правило 2 означает следующее. Пусть для двух различных значений коэффициента усиления  $k_1$  и  $k_2$  получен результат  $e_1$  и соответственно  $e_2$ . Если при этом  $k_1 < k_2$  и  $e_1 < e_2$ , то верхняя граница изменения коэффициента усиления равна  $k_2$ ; если же  $k_1 > k_2$  и  $e_1 > e_2$ , то верхняя граница изменения коэффициента усиления равна  $k_1$ .

Правило 3 означает: если реальное время регулирования при  $t_p$  коэффициенте  $k$  превышает заданное время регулирования  $t_p^*$ , то необходимо увеличить значение коэффициента  $k$ .

Целевая формула означает: при заданных значениях времени регулирования  $t_p^*$ , ошибки  $e^*$  и начальном рассогласовании  $e_0$  требуется найти коэффициент усиления  $k$ , при котором реальное время регулирования  $t_p \leq t_p^*$  для значения "трубки" точности  $e^*$ .

В настоящее время демонстрационный прототип ЭС проходит этап верификации при конкретных исходных данных.

### Список литературы

1. Бутырин С.А., Васильев С.Н., Козлов Р.И., Матросов В.М., Мукумов Р.Р., Сомов Е.И. Вопросы интеллектуализации системы программного обеспечения для проектирования систем управления ориентацией космических аппаратов //Тез. докл. Третьей научной школы "Автоматизация создания математического обеспечения и архитектуры систем реального времени". - Саратов, 1992. - С.33-36.

2. Матросов В.М., Раевский В.А., Козлов Р.И., Сомов Е.И., Бутырин С.А., Симонов С.А. Система прикладного программного обеспечения "ДИНАМИКА" для автоматизированного проектирования систем управления движением и вопросы ее интеллектуализации //Материалы Всесоюз. научно-технич. конф. "Интеллектуальные системы в машиностроении", Ч. 2. - Самара, 1991. - С. 25-29.

3. Vassilyev S.N., Matrosov V.M., Sumenkov E.A. The System EVROLOG: Application of Logic Synthesis of Programs in Some Problems

of Computer-Aided Modelling and Investigation of Interconnected Dynamical Systems //Mathematical Modelling and Applied Mathematics. - North Holland Publ. Elsvier, 1992. - P. 447-456.

4. Matrosov V.M., Rayevsky V.A., Tytov G.P., Kozlov R.I., Somov E.I., Butyrin S.A., Symonov S.A. The Software System DYNAMICS for CAD of Control Systems //Summ. of Papers Intern. Workshop "Methods and Software for Automatic Control Systems", Irkutsk, USSR, 1991. - P. 63-64.

УДК 629.78.062.2

Ю.Г.Антонов, В.П.Макаров, В.Н.Сардинский

К ВОПРОСУ ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОВЫМ ДВИЖЕНИЕМ КА  
НА УЧАСТКЕ ФОТОГРАФИРОВАНИЯ

При фотографировании с КА участков земной поверхности необходимо исключить сдвиг изображения относительно фотопленки. В комбинированной схеме компенсации сдвига изображения эта задача решается следующим образом: продольная составляющая скорости изображения компенсируется протяжкой фотопленки со скоростью равной скорости изображения в фокальной плоскости фотоаппарата, поперечная составляющая компенсируется с помощью СУД /1,2/.

Вектор скорости изображения экспонируемого участка поверхности Земли определяется выражением

$$v_n = f/D \cdot W, \quad (1)$$

где  $D$  - дальность до участка поверхности Земли;  $f$  - фокусное расстояние объектива фотоаппарата;  $W$  - проекция на плоскость кадра вектора скорости визируемой точки на поверхности Земли.

Проекции вектора  $W$  на продольную ( $OX$ ) и поперечную ( $OZ$ ) оси кадра при малых углах  $\theta$ ,  $\phi$  можно представить в виде /2/:

$$v_x = v_{3x} - v_o - D\omega_z, \quad (2)$$

$$v_z = v_{3z} - v_o(\theta_o - \theta)\sin\gamma - v_o\phi + D\omega_x,$$