

ремонте корпусных деталей, для восстановления изношенных трущихся поверхностей, заделки трещин, для устранения дефектов литья, а так же в качестве защитного покрытия от коррозии в высокотемпературной среде.

Основные физико-технические характеристики металлополимеров BELZONA приведены ниже:

Предел прочности при сжатии – 100 МПа.

Адгезионная прочность – 20 МПа.

Предел прочности на срез соединений металлополимера:

- со сталью 18,9 МПа;
- с алюминием 11,4 МПа;
- с латунью 11,7 МПа;
- с медью 11,9 МПа.

4. Твердость по Роквеллу – 80...100 НВ.

Усадка материалов после нанесения на поверхность практически отсутствует, устойчивость к коррозии очень высокая, так же обработанная металлополимерами поверхность демонстрирует отличную устойчивость к различным химикатам: углекислоте, 10 % - ным соляным, серной и азотным кислотам, минеральным маслам, неорганическим солям.

Краткая характеристика композиционных материалов фирмы «BELZONA». [2]

Суперметалл (1111) – универсальное средство для всех ремонтов. Рабочее состояние до 20 мин. При 20 °С. Через 2 часа может подвергаться любой механической обработке. Используется при ремонте корпусных чугунных деталей, для устранения дефектов литья, восстановления изношенных валов, гнезд под-

шипников, шпоночных канавок, задигов на штоках и поршнях гидроцилиндров. Суперметалл обладает исключительной адгезией к черным и цветным металлам, их сплавам и неметаллам.

Супер XL – металл (1121) – применяется аналогично использованию металлополимера суперметалл (1111), но с более продолжительным временем рабочего состояния. Жизнеспособность при 20 °С достигает 40 минут. Широко применяется для ремонта крупногабаритных деталей.

Антифрикционный металл (1131) – этот композит обладает смазывающим свойством, имеет очень низкий коэффициент трения и рекомендуется для восстановления изношенных трущихся рабочих поверхностей скольжения подшипников, направляющих из баббита, бронзы, латуни и меди. При отверждении имеет пористую структуру удерживающая смазку.

Керамический С-металл (1321) – используется как конструкционный материал для восстановления посадочных мест на валах и в гнездах подшипников с износом до 0,2 мм. После отверждения обрабатывается только алмазным или высокооборотным абразивным инструментом. Применяется в сочетании с 1111 и 1311 как устойчивый материал к воздействию химикатов, абразивов, эрозии, кавитации. Так же используется как защитное покрытие от влияния химических реактивов. Износостойкость и устойчивость к кавитации повышается после специальной термической обработки и нанесения более трех слоев.

Показатели металлополимеров BELZONA приведены в таблице 1. [2]

Показатель	Значение показателей			
	Металл			Металлокерамика
	1111	1121	1131	1321
Предел прочности на сжатие, МПа	91	87	75	91
Адгезионная прочность, МПа.	189	196	196	210
Время отверждения, мин	20	40	15	35
Максимальная температура сухой поверхности	200	175	232	200

Появление новых материалов постепенно расширяет круг возможностей ремонтных металлополимеров. Это касается в первую очередь устойчивости к повышенным температурам, химическим средам, абразивным средам. Знание специалистами этих возможностей и обучение методам ремонта позволит лучше решать эксплуатационные задачи, а так же сэкономить значительные суммы денег.

Список литературы

1. Журнал «Ремонт, Восстановление, Модернизация» № 1, 2004г. Абакумов Ю.Ф. Металлополимерные ремонтные материалы, свойства и области применения.
2. Журнал «Ремонт, Восстановление, Модернизация» № 8, 2004г. Абакумов Ю.Ф. Металлополимерные ремонтные материалы, свойства и области применения.
3. Журнал «Ремонт, Восстановление, Модернизация» № 4, 2005г. Гаджиев А.А. Агуреев А.А. Выбор эпоксидной композиции для восстановления посадочных мест под подшипники корпусных деталей.

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ ПО УРАВНЕНИЯМ ЭЙЛЕРА В СРЕДЕ MATLAB И MATHCAD

Белочкин П.Е., Кацай Д.А.

Южно-Уральский государственный университет,
Челябинск, Россия

В статье рассмотрено моделирование алгоритма бесплатформенной системы ориентации по уравнениям Эйлера-Крылова в средах Matlab и Mathcad. Проанализировано влияние оператора дифференцирования на точность восстановления углов ориентации. Получена численная оценка ошибки моделирования при использовании операции прямого численного дифференцирования. Показано отсутствие ошибки моделирования алгоритма ориентации в случае применения процедуры символьного дифференцирования.

The paper considers the modeling algorithm strapdown system orientation Euler-Krylov in Matlab and Mathcad. Analyzed the impact of the differentiation

operator on reconstruction accuracy of orientation angles. Obtained numerical estimation error modeling using direct numerical differentiation operation. The absence of error simulation algorithm orientation in the case of symbolic differentiation procedure.

Ключевые слова: бесплатформенная система ориентации, численное дифференцирование, ошибки.

Keywords: Strapdown attitude control system, numerical differentiation, errors.

Введение

Моделирование является важным этапом при исследовании и проектировании любой информационно-измерительной системы, в том числе бесплатформенной системы ориентации (БСО), являющейся частью инерциальной навигационной системы (БИНС). Современные средства компьютерного моделирования позволяют формировать математическую модель БСО, отслеживать работу системы в реальном масштабе времени, а также представлять результаты расчетов в наглядном и удобном для дальнейшего анализа виде. Среди множества программ математического моделирования выделяются программы Mathcad и Matlab. Данные программы имеют широкое распространение благодаря простоте обучения, вычислений и инженерных расчетов.

Одной из задач моделирования БСО является определение ее точностных характеристик с учетом погрешностей чувствительных элементов и внешних возмущений. Однако результаты, полученные при моделировании работы БСО, будут также включать в себя ошибки самой среды моделирования. Данные ошибки определяются численными методами, применяемыми в конкретной среде моделирования, и являются методической погрешностью вычислительного эксперимента.

В частности, вклад в общую погрешность вносит процедура дифференцирования, применяемая при моделировании работы БСО. Целью данной работы является оценка ошибки моделирования работы БСО при применении процедуры дифференцирования в программах Mathcad и Matlab.

Задачи работы:

- 1) сформировать программу моделирования;
- 2) провести численные эксперименты;
- 3) сделать заключение.

1 Математическая модель

БИНС включает в себя два основных блока [1]:

блок измерителей параметров поступательного и углового движения объекта (например, акселерометры и датчики угловой скорости);

вычислитель (включает в себя навигационный алгоритм и алгоритм ориентации).

Как известно, алгоритм БСО может быть реализован с использованием различных кинематических параметров, таких как углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы, параметры Кэли-Клейна и др. Выбор кинематических параметров определяется спецификой конкретной навигационной задачи. В данной работе рассматривается алгоритм БСО с углами Эйлера-Крылова.

Кинематические уравнения в углах Эйлера-Крылова имеют вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \theta} [\omega_y^{i0i} \cos \gamma - \omega_z^{i0i} \sin \gamma] \\ \dot{\theta} &= \omega_x^{i0i} \sin \gamma + \omega_z^{i0i} \cos \gamma; \\ \dot{\gamma} &= \omega_x^{i0i} - \theta [\omega_y^{i0i} \cos \gamma - \omega_z^{i0i} \sin \gamma] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ψ – угол рыскания летательного аппарата (ЛА);

θ – угол тангажа ЛА;

γ – угол крена ЛА;

ω_x^{i0i} , ω_y^{i0i} , ω_z^{i0i} – проекции угловой скорости связанной с ЛА системы координат OXYZ относительно географической системы координат.

2 Моделирование алгоритма ориентации в среде Matlab

Схема моделирования уравнений (1) в пакете Simulink программы Matlab приведена в [1]. Однако в указанной схеме отсутствуют средства оценки точности моделирования. Указанный недостаток устраняется при введении в схему разности сигналов с блоков задания углов поворота ЛА (ψ , θ , γ) и сигналов на выходах алгоритма ориентации. Схема моделирования представлена на рис. 1.

В представленной схеме численное дифференцирование выполняется в блоке пересчета углов Эйлера-Крылова в проекции относительной угловой скорости на оси связанного с ЛА трехгранника. Для оценки влияния процедуры численного дифференцирования, соответствующие блоки были исключены из схемы и введены аналитические выражения для производных:

$$\dot{\psi} = A_\psi \omega_\psi \cos(\omega_\psi t); \quad \dot{\theta} = A_\theta \omega_\theta \cos(\omega_\theta t); \quad \dot{\gamma} = A_\gamma \omega_\gamma \cos(\omega_\gamma t), \quad (2)$$

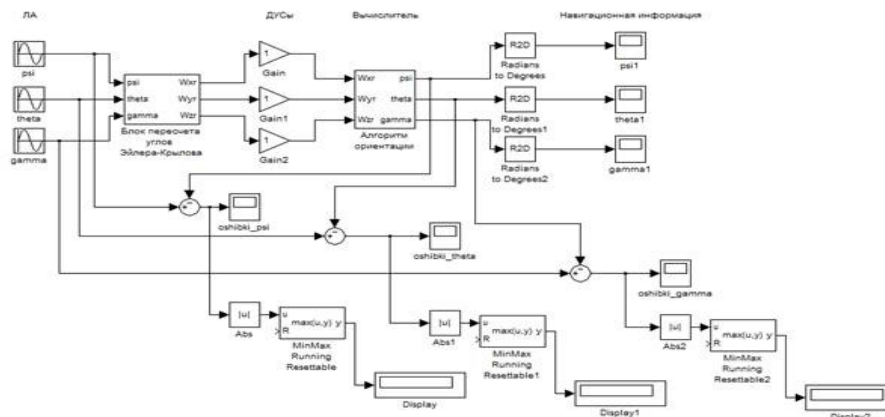


Рис. 1. Схема моделирования алгоритма ориентации в MATLAB

где A_θ , A_ψ , A_γ – амплитудные значения углов рыскания, тангажа и крена ЛА;

ω_ψ , ω_θ , ω_γ – угловые частоты изменения углов рыскания, тангажа и крена ЛА;

Моделирование выполнялось на интервале времени 50 с, с фиксированным шагом интегрирования, который варьировался в ходе вычислительного экс-

перимента. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

Как видно из полученных зависимостей, исключение блоков дифференцирования позволило уменьшить ошибку восстановления углов поворота ЛА на четыре порядка при максимальном шаге интегрирования 0,1 с. Полученный результат дает основание для утверждения того, что операция численного дифференцирования вносит наибольший вклад в погрешность моделирования алгоритма БСО.

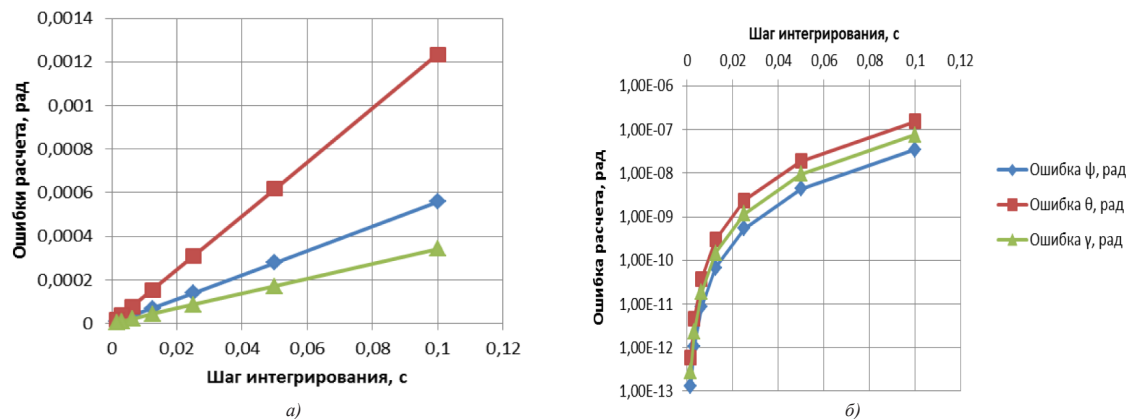


Рис. 2. Графики ошибки моделирования алгоритма ориентации в Matlab:
а) при наличии блоков дифференцирования;
б) при отсутствии блоков дифференцирования

3 Моделирование алгоритма ориентации в среде Mathcad

Одним из достоинств системы Mathcad является графический ввод выражений, что заметно уменьшает время, затрачиваемое на формирование математической модели исследуемого объекта. Данная особенность позволяет использовать выражения (1) в привычном виде, без дополнительных операций, связанных с адаптацией выражений к синтаксису среды моделирования.

В среде Mathcad при дифференцировании функций, заданных в аналитическом виде, автоматически задействуется символьный процессор, что позволяет избежать ошибок численного дифференцирования. Для оценки влияния процедуры дифференцирования в среде Mathcad была сформирована процедура моделирования алгоритма БСО по уравнениям (1).

Моделирование выполнялось на отрезке времени 10 с., с шагом 0,01 с. Точность решения, определяемая системными переменными TOL и $CTOL$, была установлена по умолчанию ($TOL = CTOL = 0,001$). Для решения системы уравнений (2) была применена встроенная в Mathcad функция $rkfixed$ решения системы дифференциальных уравнений методом Рунге – Кутты с фиксированным шагом.

По результатам моделирования (рис. 3) было установлено, что наличие операторов дифференцирования не приводит к увеличению ошибки моделирования алгоритма ориентации БСО. Данное обстоятельство подтверждает тот факт, что для функций, заданных аналитически, вычисления в среде Mathcad выполняются в символьном виде, не оказывая влияние на точность получаемых результатов.

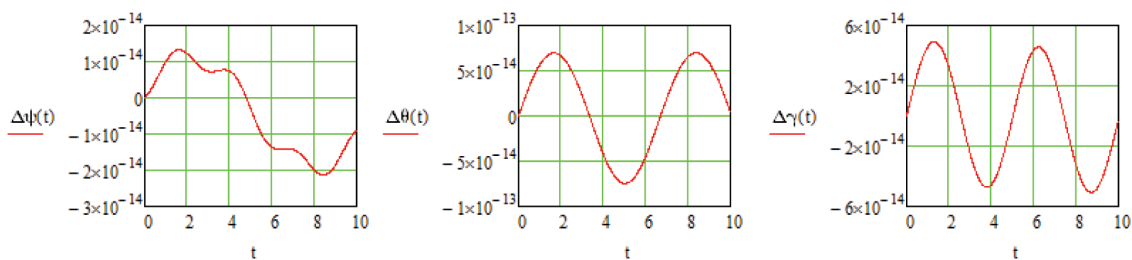


Рис. 3. Графики ошибок моделирования алгоритма ориентации в программе Mathcad

Таким образом, точность восстановления углов ориентации ЛА в среде моделирования Mathcad соответствует точности восстановления при моделировании алгоритма ориентации в среде Matlab/Simulink в случае исключения блоков численного дифференцирования, т.е. при вычислении производной в символьном виде.

Заключение

Прямое численное дифференцирование приводит к погрешностям в любой вычислительной среде,

в этой связи вычисление производных для функций, заданных в аналитическом виде, целесообразнее выполнять в символьном виде.

Список литературы

1. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов / под ред. В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. – 280 с.