

Технология проектирования и отладки сложных динамических систем

В. М. Никифоров

ФГУП «НПЦ АП имени академика Н.А. Пилюгина»
V.M.Nikiforov@gmail.ru

К. А. Неусыпин, М. С. Селезнева

МГТУ им. Н.Э. Баумана
neysipin@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача «сквозного» проектирования одноосного гиросtabilизатора с помощью комбинации 3-D программы и Matlab. Сформирована математическая модель стабилизатора и доказана её адекватность.

Ключевые слова: CAD-технология; «сквозное» проектирование; одноосный гиросtabilизатор

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие программного обеспечения, относящихся к классу CAD-программ (computer-aided design) позволяет качественно изменить процесс синтеза динамических систем (ДС). Современные CAD-программы [1, 2] позволяют:

- создавать 3-D модели ДС на физическом уровне;
- учитывать конструктивные особенности рассматриваемых объектов, которые трудно описать математически;
- проверить правильность конструктивных сопряжений различных узлов на стадии создания ДС;
- выпускать конструкторскую документацию, удовлетворяющую требованиям определённого ГОСТ и т.д.

Полученные 3-D модели ДС являются науко и информационно ёмкими объектами. Одними из распространённых пакетов 3-D моделирования являются: «Autodesk 3-d max», «AutoCad», «SolidWorks», «Компас» и др. В частности, программа SolidWorks впервые была создана в 1993 году и из-за удобного интерфейса программа нашла широкое применение [3, 4].

С другой стороны, активно развиваются программы, направленные на синтез и анализ ДС, такие как: MatLab, MathCad, Mathamatica и др., работа которых эффективна с моделями, представленными математическими [5, 6, 7].

На сегодняшний день возможность интеграции различных программ, в частности, программы SolidWorks и MatLab позволяют получать эффективные методы комбинированного проектирования ДС, объединяя физическое и математическое моделирование. Совместное применение 3-D программ с MatLab позволяет строить технологии «сквозного» проектирования, которые существенно сокращают цикл разработки ДС, повышая его на качественно

новый уровень. Возможность быстрого создания графического интерфейса, используя модуль MatLab GUI (Graphical User Interfaces) и Windows-приложение, придаёт процессу разработки гибкость и завершённость.

Смысл «сквозной» технологии состоит в эффективной передаче данных и результатов конкретного текущего этапа проектирования сразу на все последующие этапы. Данные технологии базируются на модульном построении САПР, использовании общих баз данных и баз знаний на всех этапах выполнения проекта и характеризуются широкими возможностями моделирования и контроля на всех этапах проектирования.

Особую актуальность указанные технологии имеют при проектировании сложных ДС, в частности измерительных комплексов, включающих гироскопические навигационные системы [8, 9].

В настоящей статье на примере упрощённой модели одноосного гиросtabilизатора (ОГС) на подвижном основании в режиме «грубого приведения» (ГП) решается задача терминального управления и рассматриваются основные этапы процесса 3-D технологии «сквозного» проектирования.

ОГС в режиме ГП рассматривается как абсолютно твёрдое тело, вращающееся относительно оси стабилизации в виде элементарной твердотельной площадки, имеющей одну степень свободы вокруг оси стабилизации.

I ЭТАП. СОЗДАНИЕ 3-D МОДЕЛИ ОГС НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ В SOLIDWORKS

Физическая модель ОГС, построенная в SolidWorks, включает в себя гироскоп, расположенный определённым образом на платформе, вращающейся относительно оси стабилизации. Корпус ОГС вращается относительно неподвижного основания, рис. 1, рис. 2.

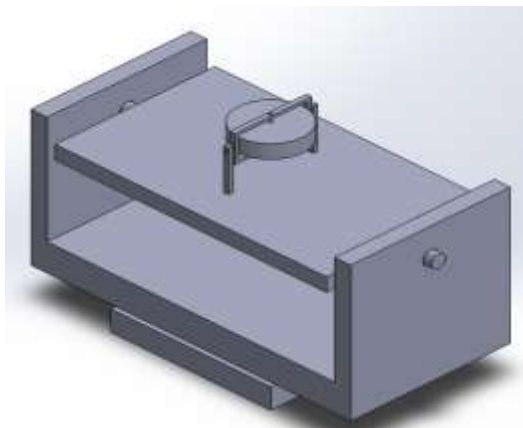


Рис. 1. (файл cborka_platforma_ZEMLIA_f_4.slx)

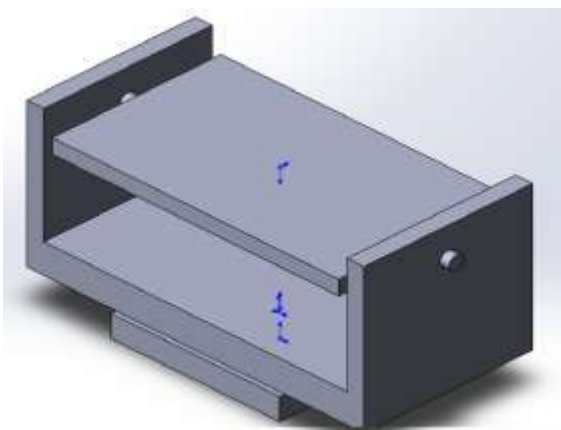


Рис. 2. (файл cborka_platforma_ZEMLIA_f_4.slx)

Упрощённая 3-D модель ОГС в режиме «ГП», представляет собой платформу, вращающуюся вокруг оси стабилизации корпуса, расположенного на подвижном основании без учёта движения гироскопа, т.к. гироскоп при прецессии достигает «технологических упоров» и не принимает дальнейшего участия в движении. Все элементы конструкции ОГС рассматриваются как абсолютно твёрдые тела, начальное положение которых представлено рис. 2. На данном этапе строится модель ДС на физическом уровне, в которой учитываются материалы деталей и все их сопряжения, люфты в узлах вращения и т.д., создаются файлы всех деталей ДС с расширением *.sldprt и файл общей сборки с расширением *.sldasm. На данном этапе можно проверить правильность сборки ДС, её работоспособность и в конечном итоге выпустить необходимую конструкторскую и технологическую документацию. Однако на данном этапе невозможно провести анализ динамических свойств ДС, параметров качества управления, синтез регуляторов ДС и т.д.

II ЭТАП. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОГС

Как было отмечено в Введении возможность интеграции программ, строящих 3-D модели на физическом уровне с программами, формирующими математические модели (ММ), в частности, программы SolidWorks и MatLab, позволяет качественно поднять уровень разработки и существенно сократить время цикла изготовления ДС.

После конвертации файла, полученного на I-м этапе в формате *.sldasm формируется файл в формате *.xml а затем файл формата Simulink Matlab *.slx. Файл, преобразованный из формата *.sldasm в *.slx, для рассматриваемого ОГС, представлен на рис. 2.

Дополнив Simulink-модель, представленную на рис. 2, соответствующими точками входа и выхода, получим модель для получения линеаризованной модели в пространстве состояний (см. рис. 3).

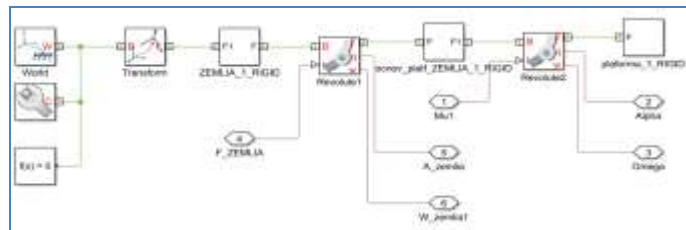


Рис. 3.

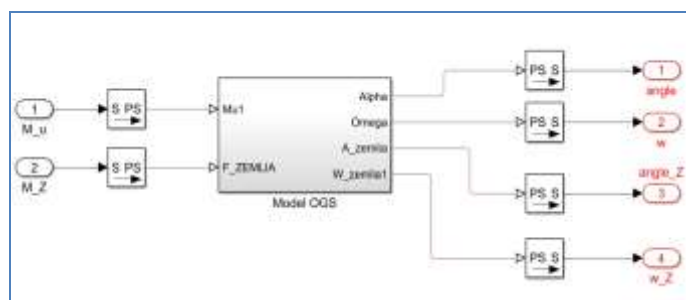


Рис. 4.

После применения команды **linmod** и **ss** получим четвёрку матриц сопровождения модели пространства состояния в следующем виде:

sys =

$$\begin{aligned} \mathbf{A} = & \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 & x4 \\ x1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ x2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x3 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ x4 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} u1 & u2 \\ x1 & 0 & 0 \\ x2 & 0 & 33.69 \\ x3 & 0 & 0 \\ x4 & 895.9 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} x1 & x2 & x3 & x4 \\ y1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ y2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ y3 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ y4 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} u1 & u2 \\ y1 & 0 & 0 \\ y2 & 0 & 0 \\ y3 & 0 & 0 \\ y4 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Continuous-time state-space model.

Модель в форме передаточных функций представлены ниже:

From input 1 to output...

$$W11(s) = \frac{895.9}{s^2 + 0.08959s}, \quad W12(s) = \frac{895.9}{s + 0.08959}, \quad W13(s) = 0, \quad W14(s) = 0.$$

From input 2 to output...

$$W21(s) = 0, \quad W22(s) = 0, \quad W23(s) = \frac{33.69}{s^2 + 0.003369s}, \quad W24(s) = \frac{33.69}{s + 0.003369}.$$

При преобразовании файла с форматом *.xml в формат Simulink *.xls формируется m-файл *DataFile.m в котором заданы все габаритно-массовые характеристики, сопряжения деталей а также ориентация ДС.

Итогом II-го этапа проектирования является переход от физической модели к линеаризованной математической модели в пространстве состояния (передаточной функции).

III ЭТАП. РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОГС В РЕЖИМЕ «ГРУБОГО ПРИВЕДЕНИЯ»

На данном этапе необходимо провести анализ адекватности математической модели, полученной на II-м этапе реальной модели, полученной на I-м этапе. Для этой цели промоделируем терминальное управление в режиме ГП ОГС, считая, что чувствительный элемент гироблока находится на технологическом упоре и не принимает участия в движении.

Для проверки адекватности полученных математических моделей рассмотрим решение терминальной задачи для управления ОГС. Воспользуемся ранее полученными терминальными законами управления для различной степени «мягкости» k_m для ОГС на неподвижном основании [10]:

$$\begin{aligned} \text{при } k_m = 0 & \quad M_u = 6 \cdot \frac{a_k - a(t)}{(t_k - t)^2} - \frac{2 \cdot \omega_k + 4 \cdot \omega(t)}{t_k - t}; & \text{при } k_m = 1 & \quad M_u = 12 \cdot \frac{a_k - a(t)}{(t_k - t)^2} - 6 \cdot \frac{\omega_k + \omega(t)}{t_k - t}; \\ \text{при } k_m = 2 & \quad M_u = 20 \cdot \frac{a_k - a(t)}{(t_k - t)^2} - \frac{12 \cdot \omega_k + 8 \cdot \omega(t)}{t_k - t}; & \text{при } k_m = 3 & \quad M_u = 30 \cdot \frac{a_k - a(t)}{(t_k - t)^2} - 10 \cdot \frac{2 \cdot \omega_k + \omega(t)}{t_k - t}. \end{aligned}$$

Примечание. Под показателем степени «мягкости» управления k понимается максимальный порядок производной от управляющего воздействия равной нулю в конечный момент времени в векторе конечного состояния.

Например, для $k_m = 3$ вектор конечного состояния имеет следующий вид:

$$Q = (q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6)^T = \begin{pmatrix} \alpha(t_k) = \alpha_k, \omega(t_k) = \omega_k, M_u^{(0)}(t_k) = M_{u0k} = 0 \\ M_u^{(1)}(t_k) = M_{u1k} = 0, M_u^{(2)}(t_k) = M_{u2k} = 0, M_u^{(3)}(t_k) = M_{u3k} = 0 \end{pmatrix}^T.$$

Реализация математического моделирования терминального управления ОГС в режиме ГП на основании полученных моделей (1)...(3), представлена на рис. 4 и 5. Физическая и математическая модели представлены на рис. 4 соответственно блоками MODEL OGS и LTI MODEL OGS.

В результате моделирования появляется анимация терминального управления ОГС в режиме ГП. Сравнение выходных характеристик (углов отклонения и угловые скорости платформы) терминального управления ОГС в режиме ГП при неподвижном основании для физической и математической моделей показали одинаковые зависимости, что свидетельствует об адекватности рассматриваемых моделей (рис. 7).

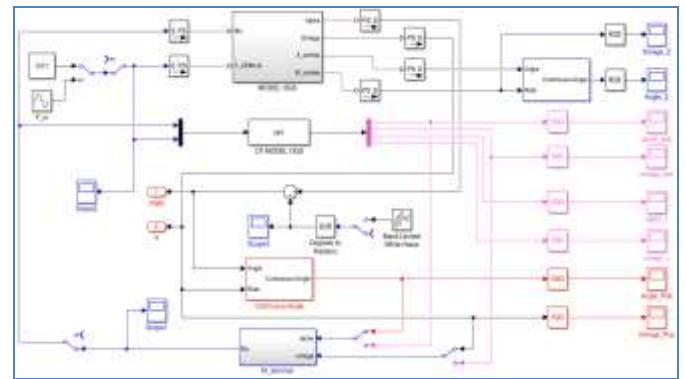


Рис. 5.

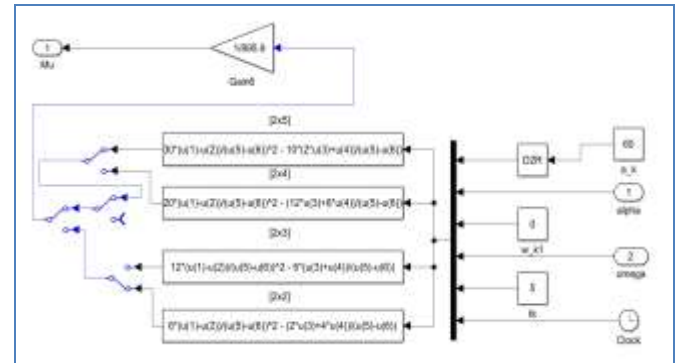


Рис. 6.

На данном этапе проводится уточнение математической модели.

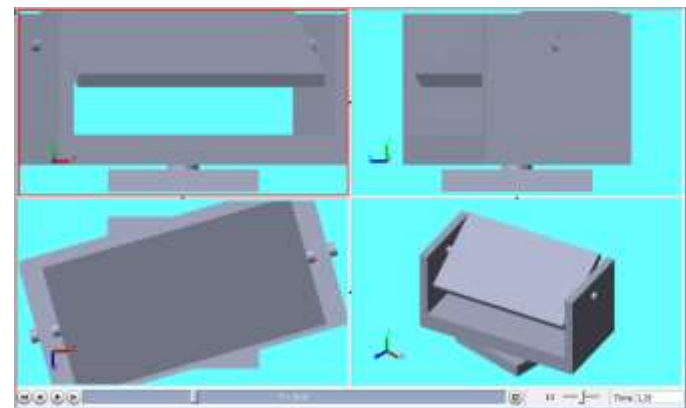


Рис. 7.

IV ЭТАП. ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА CAD – ТЕХНОЛОГИИ «СКВОЗНОГО» ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОГС В РЕЖИМЕ ГП

Для гибкости и удобства решения конкретных задач целесообразно создать интерфейс в среде Matlab, используя приложение GUI. Необходимые опции на экране интерфейса зависят от класса решаемой задачи.

V ЭТАП. СОЗДАНИЕ WINDOWS-ПРИЛОЖЕНИЯ CAD – ТЕХНОЛОГИИ «СКВОЗНОГО» ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Для автоматизации процесса «сквозного проектирования» целесообразно использовать компилятор Matlab, позволяющий преобразовывать программы Matlab в Windows-приложения и библиотеки, которые могут работать независимо от самой системы Matlab. Можно компилировать m-файлы, MEX-файлы и другие коды Matlab.

Команда **deploytool** вызывает среду разработки, которая позволяет создать проект, добавить к проекту необходимые файлы, создать приложение или библиотеку и сделать инсталляционный пакет для распространения пользователю.

Созданное приложение можно установить на другой компьютер, имеющий ту же операционную систему, что и компьютер, на котором было создано приложение. Кроме созданного программного обеспечения в состав пакета для установки должен входить файл MCRInstaller.exe. Этот файл содержит архив, содержащий все библиотеки Matlab, необходимые для работы Matlab.

Активизация разработанного приложения вызовет графический интерфейс. Загруженный файл сборки из SolidWorks трансформируется в соответствующий файл Simulink. После определения необходимых точек входа и выхода возможно формирование математической модели. После задания необходимых возмущающих и управляющих воздействий решается требуемая задача и определяются необходимые выходные параметры.

При недостижимости заданных выходных параметров необходимо внести коррекции в конструкцию изделия и повторить процесс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Машков С.В. Программа Autodesk AutoCAD. Учебное пособие по автоматизированному проектированию. М., Альянс-пресс, 2007. 448 с.
- [2] В.Н. Гузненков, П.А. Журбенко, Т.П. Бондарева. SolidWorks 2016. Трехмерное моделирование деталей и выполнение электронных чертежей. 2017. 128 с.
- [3] Н.Е. Суфляева. AutoCAD в инженерной графике. Русская версия. Краткий курс 2D-черчения. 2011. 32 с.
- [4] Туголуков Е.Н., Ткачев А.Г., Рухов А.В. и др. Проектирование сложных систем. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, 2008. 32 с.
- [5] А.М. Бонч-Бруевич. Анализ результатов схемотехнического моделирования в пакетах Multisim 10 и MATLAB. 2013. 28с.
- [6] Гандер В., Гржебичек И. Решение задач в научных вычислениях с применением Maple и MATLAB. ISBN: 985-6642-06-X. Издательство "Вассамедина" 2005г. 520 стр.
- [7] В.П. Дьяконов. MATLAB 6.0/6.1/6.5/6.5 + SP1 + Simulink 4/5. Обработка сигналов и изображений. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 592 с.
- [8] Алгоритмы обработки информации навигационных систем и комплексов летательных аппаратов / [М.С. Селезнева и др.]; Министерство образования и науки Российской Федерации; МГТУ им. Н.Э. Баумана. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 234[4]с. : ил.
- [9] К.А.Пупков, К.А. Неусыпин. Вопросы теории и реализации систем управления. М.: Биоинформ. 1997г.
- [10] Никифоров В.М., Трунов Ю.В., Ширяев А.С. Векторное «сверхмягкое» терминальное управление одноосным гиросtabilизатором в режиме «грубого приведения» ТРУДЫ ФГУП «НПЦАП» «СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ» №3. М.: ООО «Издат - Принт», Воронеж 2017. ISSN 1991-5950